

Nachwort

Wir sind am Ende unseres Weges durch die „Wärmelehre“, die „thermische Physik“ oder die „statistische Thermodynamik“ angekommen. Was wird uns in Erinnerung bleiben, wenn wir uns nun wieder anderen Themen zuwenden? Ich will versuchen, das kurz zusammenzufassen. Im Wesentlichen sollten wir drei Dinge im Kopf behalten:

1. Temperatur und Wärme sind keine Eigenschaften der einzelnen Atome oder ihrer Bestandteile, sondern sie entstehen durch das Zusammenwirken von sehr vielen solcher Teilchen. Um Temperatur und Wärme zu verstehen, sind wir einen weiten Weg von der Mikrophysik zur Makrophysik gegangen. Die entscheidende Größe war dabei die Anzahl der Verteilungsmöglichkeiten der Energie auf die Bestandteile eines Systems.
2. Die vier Hauptsätze der Thermodynamik sind universelle Gesetzmäßigkeiten und sind unabhängig von der Art der Teilchen in einem System. Dies können Elementarteilchen, Atome, Kristalle, Zellen, Lebewesen, Sterne oder Galaxien sein. Die Hauptsätze, insbesondere der erste und zweite, regeln den Verlauf aller Vorgänge in Natur und Technik. Man wird diese Hauptsätze für die Bewältigung des „Energieproblems“ der Menschheit ganz unmittelbar gebrauchen müssen.
3. Es gibt eine fundamentale, noch ungelöste Frage in der irreversiblen Thermodynamik: Wie hängt die nur im Gleichgewicht wohl definierte Entropie mit der Entropieproduktion bei Transportvorgängen zusammen und lässt sich letztere mikroskopisch begründen? Von der Einsicht in diese Problematik wird es unter anderem abhängen, wie gut wir die moderne Mikro- und Nanotechnologie in der Praxis nutzen können, vor allem in der Biophysik und in der Medizin. So hängt zum Beispiel das optimale Verhalten eines Nanopartikels davon ab, wieviel Energie aus dem Wärmebad seiner Umgebung in nutzbare Arbeit umgesetzt werden kann, und unter welchen Bedingungen das geschieht.

Wenn man diese drei Dinge im Kopf behält, sollte einem die Anwendung der Thermodynamik zur Lösung technischer und biologischer Probleme keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bereiten. Freilich muss man wissen, wie die Zustandzahl oder die Zustandssumme eines Systems durch Abzählen der Energiezustände berechnet werden kann; aber dies muss man nur „im Prinzip“ wissen. Für ein

spezielles Problem ergibt es sich zum Beispiel aus den Lösungen der Schrödinger-Gleichung für das betrachtete System.

So gerüstet können wir in der Thermodynamik „den Wald trotz seiner vielen Bäume sehen“, wie Ralph Baierlein einmal bemerkte. Freilich erschweren die „Bäume“ manchmal den Durchblick, obwohl sie für den Wald unbedingt gebraucht werden. Wenn man aber versucht, zu viele davon zu fällen, dann stirbt auch der Wald. Daher habe ich in diesem Buch versucht, so viele „Bäume“ stehen zu lassen, dass der „Wald“ in seiner ganzen Schönheit erhalten bleibt. Man darf Nichts zu stark vereinfachen, sonst missachtet man die Warnung von Mark Zemansky, der seine jahrzehntelange Lehrerfahrung so zusammenfasste:

„Teaching thermal physics
Is as easy as a song:
You think you make it simpler
When you make it slightly wrong!“

München, 2010

Klaus Stierstadt

Anhänge

Anhang A

Literaturempfehlungen, eine persönliche Auswahl

Für das Grundstudium

- A. Babloyantz**, „Molecules, Dynamics and Life“, Wiley, New York, NY 1986
(Gut lesbare Einführung in die *irreversible* Thermodynamik, in die Musterbildung und dissipative Strukturen in offenen Systemen.)
- H. D. Baehr**, „Thermodynamik“, Springer, Berlin 1988 (6. Aufl.)
(Ingenieurwissenschaftliche Einführung in die technischen Anwendungen der Thermodynamik. Enthält viele anwendungsorientierte Einzelheiten, die man in der physikalischen Literatur nicht findet.)
- R. Baierlein**, „Thermal Physics“, Cambridge University Press, Cambridge 1999
(Eine vorzügliche Einführung auf statistischer Grundlage aber auf etwas höherem Niveau. Enthält zahlreiche erhellende Überlegungen und Erklärungen zu den grundlegenden Fragen, die sonst oft gar nicht angesprochen werden.)
- S. J. Blundell und K. M. Blundell**, „Concepts in Thermal Physics“, Oxford 2006
(Ein didaktisch hervorragendes Lehrbuch, straff gegliedert und von großer Stofffülle. Neben Schroeder (s. u.) das beste Neuere auf dem Markt.)
- G. Cerbe und H.-J. Hoffmann**, „Einführung in die Thermodynamik“, Hanser, München 2002 (13. Aufl.)
(Ingenieurwissenschaftliche Einführung in die technische Thermodynamik mit vielen konkret durchgerechneten Beispielen.)
- G. Falk und W. Ruppel**, „Energie und Entropie“, Springer, Berlin 1976
(Eine elementare Einführung auf der Basis des etwas unkonventionellen Konzepts der Energieformen. Rein thermodynamisch aber mit vielen tief-schürfenden und aufschlussreichen Erklärungen.)
- H.-W. Kammer und K. Schwabe**, „Thermodynamik irreversibler Prozesse“, VCH/ Physik-Verlag, Weinheim 1985
(Eine kurzgefasste Einführung in die Thermodynamik von Transportprozessen und in ihre Entropieproduktion. Teilweise recht instruktiv aber etwas knapp.)
- C. Kittel und H. Krömer**, „Physik der Wärme“, R. Oldenbourg, München 1993 (4. Aufl.)
(Gut lesbare Einführung. Historisch gesehen der zweite Versuch einer statistischen Begründung auf Grundstudium-Niveau am Beispiel eines Spinsy-

stems. Die Nomenklatur ist leider etwas unkonventionell und das Buch enthält etliche Druck- und Übersetzungsfehler. Viele originelle Anwendungen. Englisches Original erschien 1980.)

F. Mandl, „Statistical Physics“ (Manchester Physics Series), Wiley, London 1988 (2. Aufl.)

(Gute Einführung auf statistischer Basis. Sehr sorgfältige Diskussion wichtiger und oft missverständlicher Zusammenhänge.)

F. Reif, „Statistical Physics“ (berkeley physics course Bd. 5), McGraw-Hill, New York, NY 1964

(Der erste bahnbrechende Versuch die Wärmelehre schon im Grundstudium statistisch zu begründen. War Vorbild für viele nachfolgende ähnlich aufgebaute Lehrbücher. Auch in deutscher Übersetzung erschienen: Vieweg, Braunschweig 1990, 3. Aufl.)

D. V. Schroeder, „An Introduction to Thermal Physics“, Addison-Wesley, San Francisco, CA 1999

(Bis heute das *non-plus-ultra*, weil didaktisch hervorragend, optimal gegliedert und modern. Die statistische Begründung wird parallel an drei verschiedenen Modellen entwickelt (Gas, Spins, Kristall), wodurch das Verständnis der thermodynamischen Zusammenhänge auf eine sehr solide Basis gestellt wird. Enthält auch gute Einführungen in die Energieumwandlung und die chemische Thermodynamik.)

K. Stowe, „Introduction to Statistical Mechanics and Thermodynamics“, Wiley, New York, NY 1984

(Gute Einführung auf statistischer Grundlage. Leider etwas unkonventionelle Behandlung des chemischen Potentials. Didaktisch sehr ausführliche Darlegung der fundamentalen Tatsachen und Zusammenhänge.)

M. W. Zemansky und R. H. Dittman, „Heat and Thermodynamics“, McGraw-Hill, New York, NY 1997 (7. Aufl.)

(Gründliche und originelle Einführung in die Thermodynamik und viele ihrer Anwendungen. Statistische Begründung nur als Unterabschnitt. Die 5. Auflage von 1968 ist noch ausführlicher und informativer. Ein viel benutzter Standard-Text.)

Für das Hauptstudium

M. Bailyn, „A Survey of Thermodynamics“, American Institute of Physics, Woodbury, NY 1994

(Sehr tiefeschürfende, historisch fundierte Behandlung der grundlegenden Fragen und Probleme der Thermodynamik und zum Teil auch ihrer statistischen Begründung.)

R. Becker, „Theorie der Wärme“, Springer, Berlin 1961

(Das klassische Lehrbuch der statistischen Thermodynamik in deutscher Sprache. Eine Fundgrube für selten diskutierte Probleme und Fragen.)

- H. B. Callen**, „Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics“, J. Wiley, New York, NY 1985 (2. Aufl.)
(Sehr gründliche Einführung in die Thermodynamik und teilweise auch ihrer statistischen Begründung. Sorgfältige und tiefeschürfende Diskussion der Grundlagen. Viel zitierter Standard-Text.)
- B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer und B. Roulet**, „Grundlagen der Statistischen Physik“, W. de Gruyter, Berlin 1994 (französisches Original 1989)
(Eine „Bibel der Thermodynamik“ von 1 400 Seiten. Außerordentlich sorgfältige Diskussion vieler grundlegender Probleme. Leider ist der Stoff recht unübersichtlich angeordnet.)
- T. Fließbach**, „Statistische Physik“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1999 (3. Aufl.)
(Kompakte und gut durchdachte Darstellung mit dem Charakter eines Nachschlagewerks, nicht so sehr eines systematischen Lehrbuchs. Die Thermodynamik wird als Unterabschnitt behandelt. Wegen seiner Übersichtlichkeit sehr zu empfehlen. Die Kürze geht aber manchmal auf Kosten der Vollständigkeit.)
- P. Glansdorff und I. Prigogine**, „Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations“, Wiley, London 1971
(Eine Einführung in die irreversible Thermodynamik. Enthält die Darstellung der fundamentalen Zusammenhänge bei der Entropieproduktion in offenen Systemen.)
- W. Greiner, L. Neise und H. Stöcker**, „Theoretische Physik Band 9: Thermodynamik und statistische Mechanik“, Harri Deutsch, Thun 1993 (2. Aufl.)
(Ein vielbenutztes Standardwerk mit ausgesprochen verständlichen Erklärungen und vielen erhellenden Hinweisen auf die Praxis.)
- S. R. de Groot und P. Mazur**, „Grundlagen der Thermodynamik irreversibler Prozesse“, Bibliographisches Institut, Mannheim 1969
(Das grundlegende Werk zur irreversiblen Thermodynamik, didaktisch sorgfältig auf gehobenem Niveau und mit statistischer Begründung.)
- R. J. Jellitto**, „Thermodynamik und Statistik“ (Studien Texte), Aula-Verlag, Wiesbaden 1985
(Einführung in die Thermodynamik mit zahlreichen erhellenden Erklärungen zu oft gestellten, aber selten beantworteten Fragen.)
- L. E. Reichl**, „A Modern Course in Statistical Physics“, Wiley, New York, NY 1998 (2. Aufl.)
(Grundlegende und systematische Behandlung der gesamten Thermodynamik und der statistischen Physik auf gehobenem Niveau. Ein Standard-Text für das Hauptstudium.)
- F. Reif**, „Physikalische Statistik und Physik der Wärme“, W. de Gruyter, Berlin 1975 (englisches Original 1965)
(Die ausführliche Version zum Berkeley-Kurs von F. Reif (s. oben) mit vielen, sehr sorgfältigen Erklärungen der grundlegenden Zusammenhänge. Ein Standard-Text für das Hauptstudium, aber nicht so theoretisch orientiert wie das Buch von L. E. Reichl (s. oben).)

J. R. Waldram, „The Theory of Thermodynamics“, Cambridge University Press, Cambridge 1985
(Gute Einführung auf statistischer Grundlage. Theoretisch orientiert mit vielen sorgfältig überlegten Argumenten.)

Anhang B

Didaktische Anmerkungen

Die Problematik der Wärmelehre im Grundstudium

Die Fragen „Was ist Wärme, was ist Temperatur?“ werden von etwa 75% der Physikstudenten im Vorexamen und von ca. 50% im Hauptexamen falsch oder unvollständig beantwortet. Das scheint auf einen fundamentalen Mangel unserer derzeitigen Lehr- und Vorlesungspraxis hinzuweisen. Denn bei anderen, ähnlich lautenden Fragen nach der Natur physikalischer Phänomene begegnet man keiner so tiefen Unkenntnis.

Nun wird die Thermodynamik ja im Allgemeinen als schwierig und abstrakt angesehen, was sich unter anderem darin ausdrückt, dass bekannte Physiker erst gegen Ende ihres wissenschaftlichen Wirkens anfangen, sich mit ihr zu beschäftigen: „Woran erkennt man, dass ein Physiker alt wird?: Er beginnt Rotwein zu trinken und Thermodynamik zu treiben.“ Auf die Dauer sollten aber Schwierigkeiten und Abstraktheit dieser Disziplin nicht als Entschuldigungsgründe für die mangelhafte Ausbildung der Studenten herhalten. Wir leben über hundert Jahre nach Boltzmann und sollten in dieser Zeit genügend darüber nachgedacht haben „wie wir’s unsern Kindern sagen könnten“.

Ein Problem sind hierbei unsere Prüfungsordnungen. Die Wärmelehre wird fast überall als Stoff der Vor- und Zwischenprüfung angesehen. Das scheint mir noch auf vor-Boltzmannschen Gewohnheiten zu beruhen, als man in der Wärmelehre ein Anhängsel der Mechanik sah. Inzwischen wissen wir aber, dass sie eines der begrifflich schwierigsten Gebiete der Physik ist. Andererseits hängen alle Eigenschaften der Materie von der Temperatur ab, und die Entropie bestimmt den Ablauf aller Prozesse. Die Wärmelehre sollte daher vernünftigerweise am Anfang des Hauptstudiums gelehrt werden, nach der Einführung in die Quanten- und Atomphysik, aber vor der Festkörperphysik. Diese Erkenntnis ist in einigen modernen Physikkursen auch bereits berücksichtigt, so zum Beispiel im Berkeley-Kurs oder im Manchester-Kurs. An vielen Universitäten hat man davon aber noch keine Notiz genommen. Man versucht, die Wärmelehre auf einem zu niedrigen Niveau und mit ungenügenden Voraussetzungen einzuführen. Dabei wiederholt man im Wesentlichen Schulstoff. Die wichtigen Begriffe Temperatur und Entropie sowie der fundamentale Unterschied zwischen Wärme und Arbeit bleiben dann im Nebel der Ab-

straktion. Die thermischen Größen werden zwar mit dem „ungeordneten“ Anteil der Energie der Moleküle erklärt; wie groß dieser Anteil wirklich ist, und wie man ihn berechnet, wird aber nicht gezeigt. Als Folge davon erscheint den Studierenden die Wärmelehre in ihren Grundlagen unverständlich und in ihren Anwendungen langweilig. Dieses Urteil kann man auch von fortgeschrittenen Studenten immer wieder hören; von Professoren wird es bedauert, aber als mehr oder weniger unvermeidlich angesehen. Mark Zemansky bemerkte dazu einmal: „Few branches of physics have supported as many controversies as thermodynamics; few have gone through as many changes of style, and few have caused as much confusion“ (American Journal of Physics, Bd. 25 (1957), S.349–351).

Aus meiner 40jährigen Erfahrungen mit Vorlesungen über Wärmelehre kann ich behaupten: Es gibt einen Königsweg für eine mikroskopisch begründete Thermodynamik, und sie muss nicht abstrakt bleiben. Der Weg führt von den Grundgesetzen der Mechanik und von der de-Broglie-Beziehung direkt zu mikroskopischen Ausdrücken für Temperatur, Wärme, Arbeit und Entropie. Die thermischen Größen werden dabei auf die Eigenschaften der Atome und Moleküle zurückgeführt sowie auf ihr Zusammenwirken. Man sieht dann mit beispielhafter Deutlichkeit, dass ein Ensemble vieler Teilchen Eigenschaften haben kann, die das einzelne Teilchen nicht besitzt. Man spricht heute von emergenten Eigenschaften. Wärme wird als eine Art der *Energieänderung* erkannt, die mit einer Variation der Zahl der einem Körper zugänglichen Mikrozustände verbunden ist; bei der Arbeit bleibt diese Zahl unverändert. Diese Einsicht nimmt, richtig interpretiert, die Wärmelehre ihre negativen Attribute, ihre Abstraktheit und ihre Langeweile.

Die Situation in einführenden Lehrbüchern

„Wärme ist eine (nicht näher bezeichnete) Eigenschaft, die beim Temperatureausgleich zwischen zwei Körpern übertragen wird; Temperatur ist eine (nicht näher bezeichnete) Eigenschaft, welche die Richtung des Wärmeflusses zwischen zwei Körpern bestimmt.“ So oder ähnlich kann man es in vielen einführenden Lehrbüchern lesen. Damit ist natürlich gar nichts erklärt. Es kommt dann auch später nichts Erhellendes nach. Oft wird „definiert“: „Wärme ist diejenige Energieänderung, die nicht durch Arbeit bewirkt wird.“ Es wird aber nicht erläutert, was in diesem Zusammenhang die Arbeit ist. In einem weit verbreiteten deutschen Lehrbuch heißt es: „Wärme ist ungeordnete Molekülbewegung. Wärmeenergie ist kinetische Energie dieser Bewegung. Temperatur ist ein lineares Maß für den Mittelwert dieser Energie.“ Ob ein Student mit diesen „Definitionen“ etwas anfangen kann, sei dahingestellt. Andere Autoren einführender Lehrbücher sind etwas ehrlicher. Sie sagen zum Beispiel, dass Temperatur und Wärme kollektive Eigenschaften von Systemen vieler Teilchen sind, die etwas mit ihren quantenmechanischen Energiezuständen zu tun haben, aber schwer auf einfache Weise zu erklären sind. Man wird diesbezüglich auf die Lehrbücher der theoretischen Physik verwiesen.

Zur Illustration seien hier noch einige weitere Zitate aus verbreiteten neueren Lehrbüchern angeführt: „Man nennt die in einen Körper hineingesteckte Energie,

die zur Temperaturerhöhung führt, die Änderung ΔQ seiner Wärmemenge Q . – „Man definiert die Temperatur durch $(m/2)\overline{v^2} = (3/2)kT$.“ „Temperatur ist eine Eigenschaft, von der es abhängt, ob ein System mit anderen im thermischen Gleichgewicht ist oder nicht.“ – „Wärme ist die Differenz zwischen innerer Energie und der Arbeit, die an einem System geleistet wird, dessen Umgebungen auf verschiedenen Temperaturen sind, und das einen Prozess durchläuft.“ Damit dürfte wohl der Gipfel der Verwirrung erreicht sein.

Natürlich kann man es auch richtig und viel besser machen: Seit dem berühmten Aufsatz von F. J. Dyson, „What is Heat?“ (Scientific American Bd. 191 (September 1954), S. 58–63) hat sich auch bei Autoren einführender Lehrbücher die Erkenntnis durchgesetzt, dass man Wärme und Temperatur von Anfang an auf mikroskopischer Grundlage lehren kann und sollte. Zu den Ersten dieser Autoren gehören unter anderen F. Reif („Statistische Physik“, Berkeley–Physik–Kurs Bd. 5, englisches Original 1964), C. Kittel und H. Krömer („Physik der Wärme“, englisches Original 1969), F. Mandl („Statistical Physics“, Manchester Physics Series, 1971). Die Ausrede, „auf einfachem Niveau geht das nicht“, zieht also heute nicht mehr. In jüngster Zeit sind zwei ausgezeichnete einführende Lehrbücher in englischer Sprache erschienen, deren didaktische Qualität kaum noch zu übertreffen sein dürfte: Daniel V. Schroeder, „An Introduction to Thermal Physics“ (Addison-Wesley, San Francisco 1999) und Stephen J. Blundell und Katherine M. Blundell, „Concepts in Thermal Physics“ (Oxford UP, Oxford 2006). In beiden wird die Wärmelehre von Anfang an mikroskopisch begründet, und beide Bücher sind eine gute Grundlage für eine Vorlesung im dritten bis fünften Semester. Leider sind sie bis heute nicht ins Deutsche übertragen, was bei der begrifflich schwierigen Materie aber wünschenswert wäre.

Anhang C

Umrechnung von Energie- und Leistungseinheiten

In der Energieumwandlungstechnik rechnet man oft mit anderen Einheiten als in der Physik. Diese Einheiten wurden aus der Praxis entwickelt, besonders in der Erdöl- und Kohleindustrie. Außerdem werden international oft die britischen und amerikanischen Einheiten benutzt. In dieser Tabelle sind einige Umrechnungsfaktoren für Energie- und Leistungseinheiten zusammengestellt. Es bedeuten:

t SKE = Tonnen Steinkohle-Einheiten,

t ÖE = Tonnen Öleinheiten,

Barrel = 159 Liter Öl entsprechend 0,140 t ÖE,

BTU = British thermal unit,

Quad = (US-)Quadrillionen BTU = 10^{15} BTU.

Energie	J, Ws	kWh	cal	t SKE	t ÖE	Barrel	BTU	Quad	eV	MeV
1 J, 1 Ws =	1	2,778 $\cdot 10^{-7}$	2,388 $\cdot 10^{-1}$	3,412 $\cdot 10^{-11}$	2,388 $\cdot 10^{-11}$	1,701 $\cdot 10^{-10}$	9,479 $\cdot 10^{-4}$	9,479 $\cdot 10^{-19}$	6,242 $\cdot 10^{18}$	6,242 $\cdot 10^{12}$
1 kWh =	3,600 $\cdot 10^6$	1	8,598 $\cdot 10^5$	1,228 $\cdot 10^{-4}$	8,598 $\cdot 10^{-5}$	6,124 $\cdot 10^{-4}$	3,412 $\cdot 10^3$	3,412 $\cdot 10^{-12}$	2,247 $\cdot 10^{25}$	2,247 $\cdot 10^{19}$
1 cal =	4,187	1,163 $\cdot 10^{-6}$	1	1,429 $\cdot 10^{-10}$	1,000 $\cdot 10^{-10}$	7,123 $\cdot 10^{-10}$	3,970 $\cdot 10^{-3}$	3,970 $\cdot 10^{-18}$	2,614 $\cdot 10^{19}$	2,614 $\cdot 10^{13}$
1 t SKE =	2,931 $\cdot 10^{10}$	8,142 $\cdot 10^3$	7,000 $\cdot 10^9$	1	7,000 $\cdot 10^{-1}$	4,986	2,778 $\cdot 10^7$	2,778 $\cdot 10^{-8}$	1,830 $\cdot 10^{29}$	1,830 $\cdot 10^{23}$
1 t ÖE =	4,187 $\cdot 10^{10}$	1,163 $\cdot 10^4$	1,000 $\cdot 10^{10}$	1,429	1	7,123	3,970 $\cdot 10^7$	3,970 $\cdot 10^{-8}$	2,614 $\cdot 10^{29}$	2,614 $\cdot 10^{23}$
1 Barrel =	5,879 $\cdot 10^9$	1,633 $\cdot 10^3$	1,404 $\cdot 10^9$	2,006 $\cdot 10^{-1}$	1,404 $\cdot 10^{-1}$	1	5,571 $\cdot 10^6$	5,571 $\cdot 10^{-9}$	3,670 $\cdot 10^{28}$	3,670 $\cdot 10^{22}$
1 BTU =	1,055 $\cdot 10^3$	2,931 $\cdot 10^{-4}$	2,519 $\cdot 10^2$	3,600 $\cdot 10^{-8}$	2,519 $\cdot 10^{-8}$	1,795 $\cdot 10^{-7}$	1	1,000 $\cdot 10^{-15}$	6,583 $\cdot 10^{21}$	6,583 $\cdot 10^{15}$
1 Quad =	1,055 $\cdot 10^{18}$	2,931 $\cdot 10^{11}$	2,519 $\cdot 10^{17}$	3,600 $\cdot 10^7$	2,519 $\cdot 10^7$	1,795 $\cdot 10^8$	1,000 $\cdot 10^{15}$	1	6,583 $\cdot 10^{36}$	6,583 $\cdot 10^{30}$
1 eV =	1,602 $\cdot 10^{-19}$	4,450 $\cdot 10^{-26}$	3,826 $\cdot 10^{-20}$	5,466 $\cdot 10^{-30}$	3,826 $\cdot 10^{-30}$	2,725 $\cdot 10^{-29}$	1,519 $\cdot 10^{-22}$	1,519 $\cdot 10^{-37}$	1	1,000 $\cdot 10^{-6}$
1 MeV =	1,602 $\cdot 10^{-13}$	4,450 $\cdot 10^{-20}$	3,826 $\cdot 10^{-14}$	5,466 $\cdot 10^{-24}$	3,826 $\cdot 10^{-24}$	2,725 $\cdot 10^{-23}$	1,519 $\cdot 10^{-16}$	1,519 $\cdot 10^{-31}$	1,000 $\cdot 10^6$	1

Leistung	W, J/s	kW	J/d	J/a
1 W, 1 J/s =	1	0,001	$8,640 \cdot 10^4$	$3,154 \cdot 10^7$
1 kW =	1000	1	$8,640 \cdot 10^7$	$3,154 \cdot 10^{10}$
1 J/d =	$1,157 \cdot 10^{-5}$	$1,157 \cdot 10^{-8}$	1	365
1 J/a =	$3,171 \cdot 10^{-8}$	$3,171 \cdot 10^{-11}$	$2,740 \cdot 10^{-3}$	1

Anhang D

Natur- und Maßsystem-Konstanten

Fundamentalkonstanten

Lichtgeschwindigkeit (exakt per Definition)	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Gravitationskonstante	$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Planck-Konstante	$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
	$\hbar = h/2\pi =$
	$1,05457266 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Elektrische Elementarladung	$e_0 = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C (A s)}$

Teilchenmassen

Elektron	$m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Proton	$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Magnetische Momente

Elektron	$\mu_e = 9,2847701 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2$
Proton	$\mu_p = 1,41060761 \cdot 10^{-26} \text{ A m}^2$
Neutron	$\mu_n = 0,96623707 \cdot 10^{-26} \text{ A m}^2$

Maßsystemfaktoren

Induktionskonstante (exakt per Definition)	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ $= 12,566370 \dots \cdot 10^{-7} \text{ V s/A m}$
Influenzkonstante (exakt per Definition)	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ $= 8,854187 \dots \cdot 10^{-12} \text{ A s/V m}$
Boltzmann-Konstante	$k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Avogadro-Zahl	$N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Allgemeine Gaskonstante	$R = kN_A =$ $8,314510 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Absoluter Nullpunkt (exakt per Definition)	$T_0(0 \text{ K}) = -273,15^\circ \text{C}$

Normalbedingungen („physikalisch“)

Normaltemperatur	$T_n = 273,15 \text{ K}(= 0^\circ \text{C})$
Normaldruck	$P_n = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} (= 1 \text{ atm})$
Molvolumen idealer Gase	$V_n(T_n, P_n) = 2,241410 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$

Anhang E

Umrechnungsfaktoren für mechanische und thermische Einheiten

Länge

1 Fermi (Fm)	= 10^{-15} m
1 Ångström (Å)	= 10^{-10} m
1 Seemeile (sm)	= 1 852 m
1 Astronomische Einheit (AE)	= $1,496 \cdot 10^{11}$ m
1 Lichtjahr (Lj)	= $9,461 \cdot 10^{15}$ m
1 Parsec (pc)	= $3,086 \cdot 10^{16}$ m

Fläche

1 Barn (b)	= 10^{-28} m ²
* 1 Ar (a)	= 100 m ²
* 1 Hektar (ha)	= 10 ⁴ m ²

Volumen

* 1 Liter (l)	= 10^{-3} m ³
---------------	----------------------------

Winkel

* 1 Rad (rad)	= 57,296°
* 1 Rechter (L)	= 90° (= $\pi/2$ rad)
* 1 Minute (')	= 0,016667° (= 60'')
* 1 Sekunde (")	= $(2,777778 \cdot 10^{-4})^\circ$

Zeit

* 1 Minute (min)	= 60 s
* 1 Stunde (h)	= 3 600 s (= 60 min)
* 1 Tag (d)	= $8,64 \cdot 10^4$ s (= 24 h)
1 „tropisches“ Jahr (a)	= $3,155693 \cdot 10^7$ s (= 365,242199 d)

Masse

1 MeV/c ²	= 1,782663 · 10 ⁻³⁰ kg
* 1 atomare Masseneinheit (u)	= 1,6605402 · 10 ⁻²⁷ kg
* 1 Karat (Kt)	= 2 · 10 ⁻⁴ kg
1 Doppelzentner (dz)	= 100 kg
* 1 Tonne (t)	= 1000 kg
1 Sonnenmasse (M _s)	= 2 · 10 ³⁰ kg

Kraft

1 Dyn (dyn)	= 10 ⁻⁵ N
1 Pond (p)	= 9,80665 · 10 ⁻³ N
1 Großdyn (Dyn)	= 1 N
1 Kilopond (kp)	= 9,80665 N

Druck

1 Dyn pro Quadratcentimeter (dyn/cm ²)	= 0,1 Pa (= 1 µbar)
1 Millimeter Wassersäule (mm WS)	= 9,80638 Pa
1 Torr (Torr)	= 1,33322 · 10 ² Pa
1 technische Atmosphäre (at)	= 9,80665 · 10 ⁴ Pa
* 1 Bar (bar)	= 10 ⁵ Pa
1 physikalische Atmosphäre (atm)	= 1,01325 · 10 ⁵ Pa
1 Kilopond pro Quadratmillimeter (kp/mm ²)	= 9,80665 · 10 ⁶ Pa

Energie

* 1 Elektronenvolt (eV)	= 1,60217733 · 10 ⁻¹⁹ J
1 Erg (erg)	= 10 ⁻⁷ J
1 Großerg (Erg)	= 1 J
1 Kalorie (cal)	= 4,1868 J
1 Kilopondmeter (kp m)	= 9,80665 J
1 Literatmosphäre (l atm)	= 1,01325 · 10 ² J
1 Kilokalorie (kcal)	= 4,1868 · 10 ³ J
1 Kilowattstunde (kWh)	= 3,6 · 10 ⁶ J

Leistung

1 Pferdestärke (PS)	= 735,49875 W
---------------------	---------------

Temperatur ↔ Energie (T = E/k)

1 K ≙ 1,380658 · 10 ⁻²³ J/Teilchen	= 8,617386 · 10 ⁻⁵ eV/Teilchen
1 eV/Teilchen ≙ 1,160445 · 10 ⁴ K	

Durchflussmenge

1 Falstaff (Fs) = 1 gallon/min = 4,546 l/min	= 7,577 · 10 ⁻⁵ m ³ /s
--	--

Viskosität

Dynamische Viskosität: 1 Poise (P)	= 0,1 Pa s
Kinematische Viskosität: 1 Stokes (St)	= 10 ⁻⁴ m ² /s

Oberflächenspannung

1 Dyn pro Zentimeter (dyn/cm)	= 10 ⁻³ N/m
-------------------------------	------------------------

* als SI-Einheiten zugelassen

Literaturhinweise zu den Abbildungen

- [As] Ashoori, R. C., *Nature* **379**, 413 (1996)
- [At] Atkins, P. W., *Physikalische Chemie*. VCH, Weinheim (1987)
- [Ba1] Baehr, H. D., *Thermodynamik* (6. Aufl.). Springer, Berlin (1988)
- [Ba2] Baierlein, R., *Thermal Physics*. Cambridge UP, Cambridge (UK) (1999)
- [Ba3] Bailyn, M., *A Survey of Thermodynamics*. AIP Press, New York, NY (1994)
- [Ba4] Barker, J. A. u. D. Henderson, *Rev. Mod. Phys.* **48**, 587 (1976)
- [Be1] Becker, R. u. W. Döring, *Ferromagnetismus*. Springer, Berlin (1939)
- [Be2] Becquerel, J., W. J. de Haas u. J. van den Handel, *Physics* **III**, 1133 (1936)
- [Be3] Bennett, C. H., *Sci. Am.* **257**(5), 88 (1987)
- [B11] Blickle, V., T. Speck, L. Helden, U. Seifert u. C. Bechinger, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 070603 (2006)
- [B12] Blum, J., S. Bruns, D. Rademacher, A. Voss, B. Willenberg u. M. Krause, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 230601 (2006)
- [Br] Brun, E., *Ordnungshierarchien*. Naturf. Ges. Zürich, Zürich (1986)
- [Ca] Carberry, D. M., J. C. Reid, G. M. Wang, E. M. Sevick, D. J. Searles, u. D. J. Evans, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 140601 (2004)
- [Ce] Cerbe, G. u. H.-J. Hoffmann, *Einführung in die Thermodynamik* (13. Aufl.). Hanser, München (2002)
- [Ch] Chikazumi, S., *Physics of Magnetism*. Wiley, New York, NY (1964)
- [Cl] Clusius, K., *Z. Phys. Chem.* **B31**, 459 (1936)
- [Co] Cohen, A. E., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 093109 (2005)
- [De] Demtröder, W., *Experimentalphysik 3*. Springer, Berlin (1996)
- [Do] Dorf Müller, T., *Thermodynamik*. In: Bergmann–Schaefer, *Experimentalphysik Bd. 1* (11. Aufl.). de Gruyter, Berlin (1998)
- [Ed1] Eder, F. X., *Arbeitsmethoden der Thermodynamik Bd. II*. Springer, Berlin (1983)
- [Ed2] Edgeworth, R., B. J. Dalton u. T. Parnell, *Eur. J. Phys.* **5**, 198 (1984)
- [Fa] Farrar, J. M., T. P. Schaefer u. Y. T. Lee, *AIP Conf. Proc.* **11**, 279 (1973)
- [Fl] Flowers, B. H. u. E. Mendoza, *Properties of Matter*. Wiley, London (1970)
- [Fo] Foong, S. K., *Eur. J. Phys.* **27**, 933 (2006)
- [Fr] Fricke, J., *Phys. i. u. Zeit* **15**, 42 (1984)
- [Ga] Garnier, N. u. S. Ciliberto, *Phys. Rev.* **E71**, 060101 (2005)
- [Go1] Goetzberger, A., B. Voß u. J. Knobloch, *Sonnenenergie: Photovoltaik*. Teubner, Stuttgart (1997)
- [Go2] Goulko, O., *Facetten der Entropie*. Facharbeit St. Anna-Gymnasium, München (2001/2003)
- [Ha1] Hammond, A. L., W. D. Metz u. T. H. Maugh II, *Energie für die Zukunft*. Umschau, Frankfurt/M (1974)
- [Ha2] Hanneken, J. W., *Am. J. Phys.* **65**, 159 (1997)
- [Ha3] Hantel, M., *Klimatologie*. In: Bergmann–Schaefer, *Experimentalphysik Bd. 7*. de Gruyter, Berlin (1997)

- [He1] Heinloth, K., Energie und Umwelt. Teubner, Stuttgart (1996)
- [Ji] Jia, D., Am. J. Phys. **75**, 111 (2007)
- [Ka1] Kappler, E., Naturwiss. **27**, 649 (1939)
- [Ka2] Karl, T. R. u. K. E. Trenberth, Science **302**, 1719 (2003)
- [Ki] Kittel, C., Introduction to Solid State Physics (4. Aufl.). Wiley, New York, NY (1971)
- [Kn] Kneller, E., Ferromagnetismus. Springer, Berlin (1962)
- [Ko] Koenig, D. R., E. M. Weig u. J. P. Kotthaus, Nat. Nanotechnol. **3**, 482 (2008)
- [Le] Lenk, K. R. u. W. Gellert (Hrsg.), Fachlexikon ABC Physik. Deutsch, Zürich (1974)
- [Li1] Libchaber, A., Physics **109 & 110B**, 1583 (1982)
- [Li2] Liphardt, J., S. Dumont, S. B. Smith, I. Tinoco Jr. u. C. Bustamante, Science **296**, 1832 (2002)
- [Ma] Maitland, G. C., M. Rigby, E. B. Smith u. W. A. Wakeham, Intermolecular Forces. Clarendon, Oxford (1981)
- [Mi] Misner, C. W., K. S. Thorne u. J. A. Wheeler, Gravitation. Freeman, San Francisco, CA (1973)
- [Mo] Morrish, A. H., The Physical Principles of Magnetism. Wiley, New York, NY (1965)
- [Pe1] Perrin, J., Ann. Chim. Phys. (ser. 8) **18**, 1 (1909)
- [Pe2] Pershan, P. S., Phys. Today **35**(5), 34 (1982)
- [Po] Porsche, J., Dissertation Univ. Stuttgart (2001)
- [Ra1] Rahmstorf, S., A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, R. F. Keeling, D. E. Parker, R. C. J. Somerville, Science **316**, 709 (2007)
- [Ra2] Raith, W., Elektromagnetismus. In: Bergmann–Schaefer, Experimentalphysik Bd. 2. de Gruyter, Berlin (1999)
- [Re1] Reif, F., Statistical Physics, Berkeley Physics Course Vol. 5. McGraw-Hill, New York, NY (1965)
- [Re2] Reif, F., Grundlagen der Physikalischen Statistik und der Physik der Wärme. de Gruyter, Berlin (1975)
- [Re3] Reuter, H., M. Hantel u. R. Steinacker: Meteorologie. In: Bergmann–Schaefer, Experimentalphysik Bd. 7. de Gruyter, Berlin (1997)
- [Sa] Saito, R., M. Fujita, G. Dresselhaus u. M. S. Dresselhaus, Appl. Phys. Lett. **60**, 2204 (1992)
- [Se] Sears, F. W. u. M. W. Zemansky: University Physics (4. Aufl.). Addison-Wesley, Reading, MA (1970)
- [Si] Simon, J. u. H. Wagner, Phys. i. u. Zeit **27**, 69 (1996)
- [Sch] Schroeder, D. V., An Introduction to Thermal Physics. Addison-Wesley, San Francisco, CA (1999)
- [St1] Stierstadt, K., Physik der Materie. VCH, Weinheim (1989)
- [St2] Stierstadt, K., Atommüll – wohin damit? WGV, Weinheim (2006)
- [Ta] Taube, M., Evolution of Matter and Energy. Springer, New York, NY (1985)
- [Te] Terray, A., J. Oakey u. D. W. M. Marr, Science **296**, 1841 (2002)
- [Th] Thorpe, S. A., J. Fluid Mech. **46**, 299 (1971)
- [Wa1] Walton, A. J., Three Phases of Matter (2. Aufl.). Clarendon, Oxford (1983)
- [Wa2] Wang, G. M., E. M. Sevick, E. Mittag, D. J. Searles, u. D. J. Evans, Phys. Rev. Lett. **89**, 050601 (2002)
- [Ze1] Zeilik, M. u. J. Gaustad, Astronomy. Harper & Row, Cambridge, MA (1983)
- [Ze2] Zemansky, M. W.. Heat and Thermodynamics (5. Aufl.). Mc Graw-Hill, New York, NY (1968)
- [Ze3] Zemansky, M. W. u. R. H. Dittman, Heat and Thermodynamics (7. Aufl.). McGraw-Hill, New York, NY (1997)

Namensverzeichnis

Hier wurde nur die jeweils erste Erwähnung im Text aufgenommen

A

Amontons, Guillaume, 15
Andrews, Thomas, 360
Avogadro, Amadeo, 16

B

Bardeen, John, 277
Becquerel, Antoine C., 277
Becquerel, Henry A., 277
Black, Joseph, 4
Bohr, Niels, 53
Boltzmann, Ludwig, 5
Born, Max, 83
Bose, Satyendra Nath, 398
Boyle, Robert, 16
Bragg, William H., 491
Bragg, William L., 491
Brattain, Walter, 277
Brillouin, Léon, 168
Brown, Robert, 564

C

Callen, Herbert B., 571
Carnot, Sadi, 114
Celsius, Anders, 15
Clapeyron, Benoit P., 16
Clausius, Rudolf, 20
Clusius, Klaus, 144
Couette, Maurice M. A., 399
Curie, Pierre, 346

D

Dalton, John, 27
de Broglie, Louis V., 82
Debye, Peter, 108
Diesel, Rudolf, 240
Duhem, Pierre, 525

Dulong, Pierre L., 108
Dyson, Freeman F., 116

E

Eckart, Carl, 430
Eigen, Manfred, 435
Einstein, Albert, 67
Ericsson, John, 250
Euler, Leonhard, 119
Evans, Denis, 574

F

Fahrenheit, Gabriel D., 18
Fermi, Enrico, 514
Fick, Adolf, 384
Fourier, Jean Baptiste, 384
Fowler, Ralph H., 22

G

Galilei, Galileo, 12
Gay-Lussac, Joseph L., 16
Gerlach, Walther, 94
Giauque, William F., 144
Gibbs, Josiah Willard, 69
Grove, William R., 273

H

Hagen, Gotthilf, 401
Hall, Edwin H., 389
Heisenberg, Werner, 63
Helmholtz, Hermann von, 541
Hund, Friedrich, 499

I

Ising, Ernest, 94

J

Jarzynski, Christopher, 587
 Jaynes, Edwin T., 138
 Jeans, James H., 322
 Johnson, John B., 571
 Johnston, H. L., 144
 Joule, James P., 9

K

Kirchhoff, Gustav, 168

L

Landé, Alfred, 481
 Langevin, Paul, 473
 Legendre, Adrien, 521
 Lennard-Jones, John E., 447
 Linde, Carl v., 252
 Lorentz, Hendrik A., 475

M

Mach, Ernst, 564
 Mariotte, Edmé, 16
 Maxwell, James C., 36
 Mayer, Julius R., 114

N

Navier, Claude, 417
 Néel, Louis, 488
 Nernst, Walther, 170
 Newcomen, Thomas, 219
 Newton, Isaac, 385
 Nußelt, Ernst, 418
 Nyquist, Harry, 571

O

Ohm, Georg Simon, 384
 Onsager, Lars, 385
 Ostwald, Wilhelm, 564
 Otto, Nikolaus, 240

P

Papin, Denis, 219
 Pauli, Wolfgang, 497
 Penrose, Roger, 320
 Perrin, Jean Baptiste, 67
 Petit, Alexis T., 108
 Pfeffer, Wilhelm, 551

Planck, Max, 61
 Poiseuille, Jean L., 401
 Pound, Robert V., 103
 Prigogine, Ilya, 430
 Purcell, Edward M., 103

R

Rankine, William J. M., 18
 Rant, Zoran, 271
 Raoult, Francois Marie, 558
 Rayleigh, Lord J. W., 419

S

Sackur, Otto, 67
 Schönborn, Christian F., 273
 Schottky, Walter, 98
 Schrödinger, Erwin, 60
 Searles, Debra, 574
 Seebeck, Thomas J., 13
 Shannon, Claude, 176
 Shockley, William, 277
 Smoluchowski, Marian von, 576
 Sommerfeld, Arnold, 152
 Stefan, Josef, 304
 Stern, Otto, 94
 Stirling, James, 69
 Stirling, Robert, 226
 Stokes, George, 417
 Szilard, Leo, 169

T

Tetrode, Hugo M., 67
 Thompson, Benjamin, Graf Rumford, 114
 Thomson, William, Lord Kelvin, 7

V

Van der Waals, Jan D., 441
 van't Hoff, Jacobus, 554

W

Wankel, Felix, 245
 Waterston, John J., 209
 Watt, James, 219
 Weiss, Pierre, 476
 Welton, A., 571
 Wheatstone, Charles, 15
 Wilson, Kenneth G., 363

Sachverzeichnis

Stichwörter aus Überschriften sind durch Fettdruck gekennzeichnet. (T) bedeutet Tabelle

A

abgeschlossene Systeme, 53, 136
Entropie, 136
absoluter Nullpunkt, 17, 18, 173
Absorptionskoeffizient, 370
Abwärme, 221, 268, 298
Nutzung, 268
Adiabate, 237
Gleichung, 237
adiabatisch, 24
adiabatische Expansion, 154, 179, 459, 460
ideales Gas, 179
ins Vakuum, 459
mit Arbeitsleistung, 460
adiabatische Umwandlung, 154
Aggregatzustand, 338
Anergie, 271
Anfangsuszeptibilität, 481, 491
Antiferromagnetika, 491
Temperaturabhängigkeit, 491
angeregte Zustände, 201
Atome, 201
Antiferromagnetika, 489
charakteristische Temperaturen, 489(T)
Antiferromagnetismus, 488
Arbeit, 20, 114, 115, 222
geleistete, 115
technische, 222
verrichtete, 115
verschiedene Sorten, 114
Vorzeichenkonvention, 115
Arbeitsdiagramm, 233, 256
reales, 256
Arbeitskolben, 232
Arbeitsspeicher, 221
Arbeit und Wärme, 113, 123, 125, 128
'Geheimnis' des Unterschieds, 125

mikroskopischer Unterschied, 123
statistische Definition, 128

Argon, 28
Zahlenwerte, 28(T)
atomare Größen, 32
Messmethoden, 32
Atome, 32, 34, 504
Masse, 32
Volumen, 34
Atom Müll, 307
Abfälle, 307
Atomstrahlapparatur, 34, 448
Ausdehnungskoeffizient, 37, 379
äußere Parameter, 122
Austausch, 499
direkter, 499
Austauschenergie, 502
Austauschintegral, 502
Avogadro-Zahl, 16, 567

B

barometrische Höhenformel, 199, 200
Barrel, 605
Beobachtungszeit, 129
Beugung, 491
Bevölkerungswachstum, 289
Beweglichkeit, 569
Bildungswärme, 550
biologische Evolution, 435, 437
Biomasse, 291
Biosphäre, 435, 437
Entropieproduktion, 435
Blasenammer, 454
Bohr'sches Magneton, 481
Boltzmann-Faktor, 194
Boltzmann-Konstante, 16, 59, 139, 567
Berechnung, 139

- Boltzmanns Grabstein, 136
 Boltzmann-Verteilung, 187, 191
 Boltzmann-Wahrscheinlichkeit, 194
 Bose-Einstein-Kondensat, 398
 Bose-Kondensation, 398
 Bragg-Bedingung, 491
 Brennelement, 308
 Brennstoffe, 291
 fossile, 291
 Brennstoffzelle, 273
 Energiebilanz, 274
 Entropiebilanz, 275
 Entropieproduktion, 275
 Wirkungsgrad, 274
 Brillouin-Funktion, 479, 495
 British Thermal Unit. (BTU), 605
 Brownsche Bewegung, 564, 567, 569, 572
 Diffusion, 406
 Kompensation, 572
 Messtechnik, 569
 Temperaturabhängigkeit, 567
 Zeit, 567
 Brownsche Teilchen, 575
 Brutreaktor, 318
- C**
- Carnot-Maschine, 260, 263
 wärmeleitende, 263
 Wärmeleitung, 260
 Carnot-Prozess, 234, 238, 263
 Energiediagramme, 235
 Kühlmaschine, 238
 Reibungsverluste, 263
 Wirkungsgrad, 236, 238
 Carnot-Wirkungsgrad, 223
 Celsius-Skala, 18
 cgs-System, 487
 Chemie, 523
 chemische Arbeit, 541
 chemisches Potenzial, 119, 520, 541, 543–548,
 550, 559
 äußere Felder, 559
 Austausch von Teilchen, 546
 Bedeutung, 543
 Druckabhängigkeit, 546
 freie Enthalpie, 545
 Messung, 550
 Osmose, 551
 reale Gase, 548
 Temperatur, 546
 verschiedene Systeme, 547
 Zahlenwert, 543
 Clausius' Beziehung, 266
 Clausius-Clapeyron-Gleichung, 356
 Clausius-Rankine-Prozess, 247
 Clausius' Ungleichung, 135, 162, 266
 CO₂-Gehalt, 301
 Atmosphäre, 301
 Luft, 301
 Couette-Strömung, 399
 ebene, 399
 Coulomb-Blockade, 537
 Curie-Gesetz, 475
 Curie-Konstante, 475, 482
 ferromagnetische, 482
 paramagnetische, 475
 Curie-Punkt, 346, 470, 483
 Curie-Weiss-Gesetz, 482
- D**
- Dampf, 246
 definiert, 246
 Dampfdruck, 556
 verdünnte Lösung, 556
 Dampfdruckerniedrigung, 556
 Dampfdruckkurve, 353, 357
 verschiedener Stoffe, 357
 Dampfmaschinen, 220, 246, 247, 248
 Arbeitsdiagramm, 247
 atmosphärische, 220
 Wirkungsgrad, 248
 Dämpfungsfaktor, 370
 Debye, 511
 T³-Gesetz, 511
 Debye-Frequenz, 508
 Debye-Temperatur, 511, 512(T)
 Temperaturabhängigkeit, 513
 Defektelektroden, 279
 Desinformation, 176
 diathermisch, 24
 Dieselmotor, 240, 244
 Wirkungsgrad, 244
 Differenziale, 115
 unvollständige, 115
 vollständige, 115
 Diffusion, 402, 404, 407
 nichtstationäre, 405
 zeitabhängige, 407
 Dipole, 94, 470, 471
 magnetische, 470
 Wechselwirkung, 471
 Direktumwandler, 218
 Dispersionskräfte, 446
 Dissipation, 578
 vollständige, 578
 dissipative Strukturen, 431, 435

- Doppelfenster, 421
- Dotierungen, 278
- Drehimpuls, 42
 - Quantisierung, 42
- Drehimpulsquantenzahl, 42, 480
- Drift, 409
- Driftbewegung, 409
- Driftdiffusion, 408, 574
- Drift–Diffusions–Gleichung, 414
- Driftgeschwindigkeit, 409, 565
- Driftterm, 576
- dritter Hauptsatz der Thermodynamik, 170, 174
 - Verfeinerung, 174
- Druck, 24
- Dulong–Petit–Gesetz, 108
- Dunkelsperrstrom, 280
- dynamische Strukturen, 10

- E**
- Eigenvolumen, 444
- Eigenwerte, 85
- Einheitszelle, 92
- Einstein–Kristall, 104, 105, 503, 505
 - Modell, 104
- Einstein–Relation, 569, 577
- Einteilchensystem, 32
- Elektrizitätsleitung, 410
- elektrochemisches Potenzial, 559
- emergente Eigenschaften, 32
- Emissionskoeffizient, 423, 425
- Endlager, 310
- Energie, 8, 9, 53, 74, 81, 115–117, 119, 163, 218, 273, 520, 603
 - Absolutwerte, 119
 - Änderungsformen, 115
 - äußere, 218
 - Direktumwandlung, 273
 - Erscheinungsformen, 8, 163
 - freie, 520
 - Größenordnung, 9
 - ideales Gas, 74
 - makroskopische, 74
 - Quanten, 53
 - Schwankungen, 81
 - thermische, 218
 - Übertragungsarten, 163
 - Übertragungsgröße, 117
 - Verteilung auf die Freiheitsgrade, 116
 - Zustandsformen, 115
- Energiebedarf, 288, 291
 - biologischer, 288
 - Deckung, 291
- Energiebilanz, 114
 - Energie–Bilanzgleichung, 116
 - Energie(erhaltungs)satz, 116
- Energiediagramm, 233, 256
- Energiedreieck, 218
- Energieeinheiten, 605(T)
- Energieerhaltungssatz, 55, 222
- Energieflussdiagramm, 293
 - Deutschland, 293
- Energieformen, 216, 288, 312
 - alternative, 312
 - erneubare, 312
 - sekundäre, 288
 - Umwandelbarkeit, 216
- Energieintervall, 194
- Energieniveau, 72, 202
 - Abstand, 72
 - Wasserstoffatom, 202
- Energieniveauschema, 210
 - Vielteilchensystem, 210
- Energieproblem, 287
 - kurzfristige Lösung, 298
- Energiequellen, 312, 316
 - nicht funktionierende, 316
 - unerschöpfliche, 312
 - utopische, 316
- Energieschale, 64, 92
- Energieskala, 125
 - Niveauabstände, 125
- Energietransport, 415
 - Wärme, 415
- Energieübertragung, 115
 - Arten, 115
- Energieumwandlung, 8, 215, 216, 292, 299
 - Geräte, 215
 - Maschinen, 215
 - Methoden, 216
 - schädliche Nebenwirkungen, 299
 - Verluste, 292
- Energiewandler, 259, 260, 264
 - magnetische, 259
 - reversible, 260
 - Wirkungsgrade, 264(T)
- Energiezustände, 53, 60, 86, 88, 90
 - diskrete, 53
 - eines Gases, 90
 - eines Teilchens, 86, 88(T)
 - klassisches Teilchen, 60
 - würfelförmiger Behälter, 88
- Entartung, 54
- Enthalpie, 248, 353, 520, 522

- Entropie, 4, 69, 118, **133**, 135, 138–140, 142, **143**, 152, **159**, 162, 166, **170**, 173, **175**
 additiv, 166
 allgemeiner Nutzen, **159**
 Berechnung, **139**, **143**
 Clausius–Definition, 162
 experimentelle Bestimmung, **140**
 in Grundvorlesung, 139
 Information, 173, **175**
 kalorimetrische, 140
 kalorimetrische Bestimmung, 142
 Messung, **139**
 Natur- und Geisteswissenschaften, 138
 spektroskopische, 140
 $T \rightarrow 0$, **170**
 Temperaturabhängigkeit, 142, 143, **159**
 Zustandsfläche, 152
 Zustandsgröße, 135
 Entropiebegriff, **134**
 Überblick, **134**
 Entropieberechnung, **152**
 Beispiele, **152**
 Entropiebeziehungen, **139**
 Boltzmann, **139**
 Clausius, **139**
 Entropiedefinition, 136, 579
 Boltzmanns, 136
 Nichtgleichgewichts–Zustände, 579
 Entropieerzeugung, **428**, 436
 lineare Transportprozesse, **428**
 Sonnenstrahlung, 436
 Entropiemeter, 141
 Entropieproduktion, **181**, 184, **291**, 295, **426**,
 435–437, 579
 biologische Evolution, 295
 dissipative Strukturen, 431
 elektrisches Netzwerk, **181**
 Menschheit, **436**
 negative, 579
 Transportprozesse, **426**
 Entropieproduktionsdichte, 427
 Entropiesatz, 136
 Entropievernichtung, 579
 Erdatmosphäre, 199, 208
 Erde, 314
 Energieflussdiagramm, 314
 Erdgas, 295
 Erdöl, 295
 Erdwärme, 316
 Energieformen, 312
 alternative, 312
 erneuerbare, 312
 Ergodenhypothese, 166
 Ericsson–Prozess, 250
 erneuerbare Energie, 312
 Ersatzprozess, 151
 reversibler, 151
 erster Hauptsatz der Thermodynamik, 20, 113,
 114, 116, 364, 521, 541, 585
 Euler–Gleichung, 119, 365, 521, 531, 550
 erweiterte, 365
 Evolution, **435**
 biologische, **435**
 Exergie, **271**
 Expansion, 461
 bei konstanter Enthalpie, 461
 Expansionsrate, 245
 extensive Größen, 143, 338, 364(T), 521
 Exzenter, 219

F
 Fahrenheit–Skala, 18
 FCKW, 254
 Ferrimagnetika, 496, 499
 Eigenschaften, 499(T)
 Suszeptibilität, 496
 Temperaturabhängigkeit, 496
 Ferrimagnetismus, **492**
 Ferrite, 494
 Ferrofluid, 259
 Ferromagnetika, 486
 Eigenschaften, 486(T)
 Ferromagnetismus, 470, **476**
 Fick’sches Gesetz, 384, 404, 406
 erstes, 404
 zweites, 406, 576
 Fixpunkt, 15
 FKW, 254
 Flächenbedarf, 315
 Weltbevölkerung, 315
 Fluchtgeschwindigkeit, 207, 208(T)
 Fluchttemperatur, 208
 Flugzeugtriebwerk, 251
 Fluide, **452**
 Gleichgewichtseigenschaften, **452**
 Fluktuationen, 362
 Universalität, 362
 Fluktuations–Dissipations–Theorem, 571
 Fluktuationstheoreme, **571**, 574, 575, 577, 579,
 580, 583, 585
 Begründung, 575
 Computersimulationen, 579
 Entropieproduktion, 574
 Experiment, 583, 585
 integriertes, 580

stationäre Prozesse, 579
 Übergangsprozesse, 579
 Fluktuierende Kraft, 566
 Fluor–Chlor–Kohlenwasserstoffe, 254
 Fluss, 385, 428
 Flüssigkeitsthermometer, 12
 Fossile Brennstoffe, 295
 Vorräte, 295
 Fourier–Gesetz, 384, 395
 Wärmeleitung, 395
 freie Bildungsenthalpie, 550
 freie Energie, 372, 520, 522, 528
 Helmholtz'sche, 372
 Freie–Energie–Theorem, 587
 freie Enthalpie, 354, 520, 523, 524
 Bedeutung, 524
 freie Weglänge, 391, 392
 mittlere, 392
 Freiheitsgrad, 44, 185, 209
 Rotation, 44
 Fusionsreaktion, 317

G

galvanomagnetische Effekte, 390
 Gasatom, 34
 Geschwindigkeit, 34
 Streuung, 449
 Gas, 29
 Druck, 29
 Kühlmittel, 459
 Gasentladungs–Muster, 433
 Gasmodell, 27
 ideales, 28
 Gasmolekül, 48
 Bewegungsformen, 48
 Geschwindigkeit, 204
 Gasthermometer, 13
 Gefrierpunktniedrigung, 558
 Gesamtenergie, 90
 ideales Gas, 90
 mikroskopische, 90
 Geschwindigkeit, 36
 mittlere, 36
 v_{rms} , 36
 wahrscheinlichste, 36
 Geschwindigkeitsverteilung, 47
 Gibbs–Duhem–Gleichung, 525, 531
 Gibbs–Funktion, 520
 freie Enthalpie, 520
 Gibbs'sche freie Energie, 354
 Gibbs'sche Fundamentalfunktion, 541
 Gibbs'sches Paradoxon, 158
 Gibbs–Verteilung, 196

Gleichgewicht, 22, 426, 427
 Definition, 22
 lokales, 427
 Gleichgewichtsbedingungen, 190
 Gleichgewichtseigenschaften, 337
 reiner Stoffe, 337
 Gleichgewichtsfläche, 25
 Gleichgewichts–Thermodynamik, 10
 Gleichgewichts–Zustand, 22
 thermischer, 22
 Gleichverteilungssatz, 44, 46, 208, 211
 der Energie, 208
 Gletscher, 306
 Schmelzen, 306
 Grad Celsius, 6
 Granate, 494
 Gravitations–Selbstenergie, 324
 gravitochemisches Potenzial, 559
 Große Zustandssumme, 539
 Nutzen, 537
 Großes Potenzial, 525, 536, 537
 großkanonisch, 536
 Grundannahme der statistischen Mechanik, 56,
 188, 194
 Grundzustand, 19, 170
 GuD–Kraftwerk, 271
 Guggenheim–Potenzial, 531
 Guru, 197, 199
 schwebender, 197

H

Hagen–Poiseuille–Gesetz, 401
 Hall–Effekt, 389
 Harmonischer Oszillator, 106
 Heaviside–Lorentz–System, 487
 Hebelgesetz, 341, 345
 Phasenumwandlung, 345
 Heißdampf, 341
 Heißluftmotor, 226, 231
 Energiebilanz, 231
 Wirkungsgrad, 231
 Heißluftturbine, 250
 geschlossene, 250
 Helmholtz–Funktion, 520
 freie Energie, 520
 Heterogeneffekte, 389
 H –Funktion, 535
 Hilfsfeld, 366, 475
 magnetisches, 366, 475
 Homogeneffekte, 389
 Hydrierung, 297
 Hyperzyklus, 435

I

ideale Gase, **24, 40, 68, 115, 117, 258**
 mehratomige, **40**
PVT-Fläche, **115**
 Suszeptibilitäten, **36**
 Zustandsänderungen, **258**
 Zustandszahl, **68**

ideale Gasgleichung, **25**

idealer Kristall, **93, 104, 122, 161**
 Entropie, **161**

idealer Paramagnet, **93, 120, 161, 203**
 Zustandsumme, **203**

ideales Gasgesetz, **16**

Ignoranz, **176, 178**

Impulsraum, **64**

Impulsraumvolumen, **65**

Impulstransport, **398**

Information, **175**

Informationsgehalt, **176, 177**
 Entropieformel, **177**

Informationsmaß, **176, 179**
 Beispiele, **176(T)**

Informationstheorie, **176**

innere Energie, **20, 31, 96**

inneres Potenzial, **541**

Instabilitäten, **431**

integrierender Nenner, **135**

Intensive Größen, **338, 364(T)**
 konjugierte, **364**

intrinsische Eigenschaft, **75, 93, 473**
 Atome, **75**
 magnetische, **473**

Inversionskurve, **466**
 Gleichung, **466**

Inversionstemperaturen, **465, 466(T)**

ionisierende Wirkung, **309**
 Strahlen, **309**

Isenthalpe, **466**

Isentrope, **237**

Ising-Modell, **94**

Isobare, **26, 342**

Isochore, **26, 342**

isoenergetischer Prozess, **149**

Isolierfenster, **420**

Isotherme, **26, 342**

isotherme Umwandlung, **153**

ISSFT, **580**

ITFT, **580**

J

Jarzynski-Gleichung, **587**
 Experiment, **589**

Jeans-Dichte, **323**

Jeans-Masse, **322**

Jeans-Radius, **322**

Joule-Effekt, **459**

Joule-Kelvin-Effekt, **461**

Joulesche Stromwärme, **182**

Joule-Thomson-Effekt, **461**

Joule-Thomson-Koeffizient, **462, 465, 466(T)**
 Temperaturabhängigkeit, **465**

K

Kalorie, **20**

Kalorimeter, **19, 20, 141**

kalorische Zustandsgleichung, **31, 97, 108**
 Einstein-Kristall, **108**
 idealer Paramagnet, **97**

Kältemaschinen, **252**

kanonische Verteilung, **195**

kanonische Zustandsumme, **533**

Kelvin-Effekt, **459**

Kelvin-Helmholtz-Instabilität, **433**

Kernbrennstoff, **291**

Kernenergie, **307, 312**
 Preis, **312**

Kernfusion, **317**

kinetische Gastheorie, **30**

kinetischer Druck, **201**

kinetischer Koeffizient, **385**

Klima, **306**

Klimaanlage, **252, 254, 255**

Klimamodelle, **301**

Koexistenzkurve, **246, 441**

Kohäsionsdruck, **444**

Kohle, **297**

kollektive Eigenschaften, **5**

Kolloid, **259**
 magnetisches, **259**

Kompensationstemperatur, **495, 499**

Komplexionen, **54**
 Anzahl, **54**

Kompressibilität, **37, 374, 380**
 adiabatische, **374, 380**
 isotherme, **374, 380**

Kompressionsfaktor, **456**

Kompressionsmodul, **37**

Kompressionsrate, **245**
 Dieselmotor, **245**

Kompressionsverhältnis, **243**
 Ottomotor, **243**

kondensierte Materie, **11, 338**
 Erscheinungsformen, **338**

konjugierte extensive und intensive Größen,
364(T)

- Kontaktspannung, 559
 - Kontinuitätsgleichung, 406, 417
 - Konvektion, 416, 422
 - erzwungene, 422
 - freie, 422
 - Korrelationslänge, 360
 - korrespondierende Zustände, 457
 - Kräfte, 385, 428
 - thermodynamische, 385, 428
 - Kraftkonstante, 46
 - molekulare, 46
 - Kraft–Wärme–Kopplung, 269
 - Kraft–Wärme–Maschinen, 224
 - Kreiskolbenmotor, 245
 - Kreisprozess, 151, 223, 227, 256, 259
 - idealer Paramagnet, 259
 - reversibler, 151, 223
 - Kristallenergie, 105
 - Kristallgitter, 104
 - Federmodell, 104
 - kritischer Exponent, 359
 - kritischer Mischungspunkt, 362
 - kritische Fluktuationen, 360, 483
 - kritische Isotherme, 341, 452
 - kritische Opaleszenz, 362, 441
 - kritische Phänomene, 357, 360
 - Universalität, 359, 360
 - kritischer Punkt, 246, 341, 343(T), 452, 456
 - Koordinaten, 456
 - kritisches Potenzgesetz, 359
 - kritische Temperatur, 443(T)
 - Kühlmaschinen, 219, 221, 224, 234, 252, 254, 268
 - Entropieerzeugung, 268
 - Leistungsfaktoren, 254
 - reversible, 224
 - Kühlmittel, 459
 - Gase, 459
 - Kühlschrank, 224, 252
 - Kühlung, 422
- L**
- Landé-Faktor, 481, 502
 - Langevin-Funktion, 473, 477
 - Langevin-Gleichung, 477
 - Laser, 104
 - latente Wärme, 172, 352
 - Lauftrad, 249
 - Leerlaufspannung, 280
 - Legendre-Transformation, 354, 365, 372, 521, 525
 - Variablen-Änderung, 521
 - Leistung, 263, 290
 - Leistungen, Natur und Technik, 290
 - maximale, 263
 - Leistungsbedarf, 269, 291
 - Deutschlands, 269
 - primärer, 291
 - Leistungseinheiten, 606(T)
 - Leistungsfaktor, 219, 224
 - Leistungszahl, 224
 - Leitfähigkeit, 412
 - Leitungselektronen, 514
 - Wärmekapazität, 514
 - Lennard-Jones-Potenzial, 447
 - Leuchtkraft, 326
 - Sonne, 326
 - Leuchtstoffröhre, 412
 - Levitation, 197, 199
 - Linde-Verfahren, 467, 469
 - lineare Kette, 506
 - Schwingungsformen, 506
 - Löcher, 279
 - lokales Gleichgewicht, 427
 - Lorentz-Kraft, 389, 475
- M**
- magnetisches Moment, 94
 - Atome, 95
 - magnetische Arbeit, 121
 - magnetische Energie, 96
 - magnetische Erregung, 475
 - magnetische Kühlung, 175
 - magnetische Maßsysteme, 487
 - Umrechnungsfaktoren, 488(T)
 - magnetische Ordnung, 93, 103, 469
 - Atomkerne, 103
 - magnetische Permeabilität, 366
 - relative, 366
 - magnetische Suszeptibilität, 366
 - magnetische Wechselwirkung, 496
 - Ursachen, 496
 - Magnetisierung, 99, 346, 475, 479, 489
 - alternierende, 489
 - diamagnetische, 475
 - Messmethoden, 99
 - Temperaturabhängigkeit, 346
 - Magnetisierungskurven, 346
 - Magnetit, 470
 - magnetochemisches Potenzial, 559
 - magnetokalorischer Effekt, 483, 485–486
 - Energieumwandlung, 485
 - Wärmetauscher, 486
 - Magneton, 487
 - effektives, 487
 - makroskopisch, 11

- Makrozustand, 87
 - Marangoni-Effekt, 432
 - Maschinen, 221, 223, **256**, **265**, 266, 267
 - Entropiebilanz, 267
 - ideale, 223
 - Leistungsfaktor, 265
 - Optimierung, **265**
 - periodisch arbeitende, 221
 - reale, **256**
 - umweltschonend, 265
 - Verluste, 265
 - Wirkungsgrad, 265
 - zweiter Hauptsatz, 266
 - zyklische, 265
 - Maschinen-Diagramm, 267
 - Massenenergie, 319
 - Massenspektrometer, 33
 - Massensuszeptibilität, 488
 - Maßsystem-Konstanten, 607(T)
 - maximale Arbeit, 528
 - Maxwell-Beziehungen, **529**, 530
 - Maxwell-Konstruktion, 456
 - Maxwell-Kugel, 205
 - Maxwells Dämon, **167**
 - Maxwell-Verteilung, **204**, 205
 - Geschwindigkeiten, **204**
 - Maxwell-Verteilungsfunktion, 206
 - normierte, 206
 - Meeresspiegel, 306
 - Anstieg, 306
 - mesoskopisch, 11
 - metastabile Systeme, 171–172
 - metastabile Zustände, 453
 - mikroskopisch, 11
 - Mikrozustand, 54, 57, 87, 106
 - Mischungsentropie, **157**, 180
 - Mischungskalorimeter, 21
 - mittlere Geschwindigkeit, 206
 - mksA-System, 487
 - Modellsysteme, **109**
 - Unterschiede, **109**
 - Mol, 16, 25
 - Moleküle, 41–42, 45, 46, 445
 - Kräften zwischen, 445
 - Rotation, 41
 - Rotationsenergie, 42
 - Schwingung, 45
 - Schwingungsenergie, 46
 - Trägheitsmoment, 41
 - Molekularfeld, 477, 482, 494
 - Weiss'sches, 482
 - Molekularfeldkonstante, 490
 - Molekularkräfte, **440**
 - Molekülschwingungen, 45
 - Molsuszeptibilität, 475, 488
 - Molwärme, 21, 39, 505, 512
 - Argon, 512
 - Festkörper, 505
 - Temperaturabhängigkeit, 505, 512
 - Moment, 480
 - effektives, 480
 - Multiplizität, 54
- N**
- nacktes Teilchen, 544
 - Nanomaterialien, 572
 - Beispiele, 572
 - Nanotechnologie, 571
 - Nassdampf, 341
 - Naturkonstanten, 607(T)
 - Navier-Stokes-Gleichung, 417
 - Nebelkammer, 454
 - Néel-Temperatur, 489, 499
 - ferrimagnetische, 499
 - negative Temperatur, 104
 - Negentropie, 179
 - Nernstscher Wärmesatz, 170
 - Neutronen, 491, 493
 - Newton'sches Gesetz, 385, 399
 - Scherströmung, 385, 399
 - Nichtgleichgewicht, **426**
 - Nichtgleichgewichts-Thermodynamik, 10
 - Normalbedingungen, 26, 550
 - chemische, **550**
 - Normalvolumen, 26
 - Mol, 26
 - n -Raum, 507
 - Nußelt-Zahl, 418
 - Nullpunktsenergie, 19, 105, 108, 140, 170, 504
 - Nullpunktsentropie, 172
 - nullter Hauptsatz der Thermodynamik, **22**
 - Nutzenergie, 289
- O**
- offene Systeme, 435
 - Lebensvorgänge, 435
 - Ohm'sches Gesetz, 384, 412
 - Öleinheiten (ÖE), 605
 - Onsager-Gleichung, 389
 - optische Pinzette, 583
 - Ordnungsparameter, **347**, 349(T), 360
 - Phasen, **347**
 - Ordnungsphänomene, 172
 - Ortsraum, 64
 - Ortsraumvolumen, 65

- Osmose, **551, 555**
 chemisches Potenzial, **551**
 Energieumwandlung, **555**
 osmotischer Druck, **551, 553**
 Ottomotor, **240–242**
 Wirkungsgrad, **242**
 Ozeane, **306**
 Erwärmung, **306**
- P**
 Paramagnetismus, **473**
 partieller Differenzialquotient, **37**
 Schreibweise, **37**
 Pascal (Einheit), **26**
 Pauli–Prinzip, **497**
 Pauli–Wechselwirkung, **497**
 permanente Magnete, **470**
 Permutabilität, **54**
 perpetuum mobile zweiter Art, **266**
 Pfeffer’sche Zelle, **551, 555**
 Molekülmasse, **555**
 Molmasse, **555**
 Pferdestärke, **219**
 Phasen, **337, 338**
 Charakterisierung, **338**
 Existenzbedingungen, **338**
 Phasengeschwindigkeit, **370**
 Phasenraum, **61, 62, 68**
 $6N$ –dimensionaler, **68**
 Zellen, **62**
 Phasenübergänge, **338, 357**
 diskontinuierliche, **357**
 kontinuierliche, **357**
 Phasenumwandlungen, **350, 356, 358**
 erster Art, **358**
 verschiedene Arten, **356**
 photovoltaischer Effekt, **277**
 physikalische Atmosphäre, **26**
 Planck–Konstante, **42, 61**
 Plancksches Strahlungsgesetz, **285**
 Plutonium, **311**
 pn–Übergang, **279**
 Poise (Einheit), **399**
 Polarisationsdrift, **413**
 Polytrope, **257**
 Polytropenexponent, **257**
 Potenzgesetze, **360**
 Potenziale, thermodynamische, **520, 528**
 Messung, **528**
 Mikrophysik, **532**
 Primärenergie, **217, 288**
 Proton–Proton–Zyklus, **324**
- Q**
 Quad (Einheit), **605**
 Quantenmechanik, **86**
 Quantenpunkt, **537, 539, 540**
 Besetzungszahl, **539**
 Strom–Spannungs–Messung, **540**
 Quantenzustand, **194**
 quasistatisch und reversibel, **149**
 Unterschied, **149**
 quasistatische Zustandsänderungen, **128**
 Quasiteilchen, **279**
- R**
 radioaktive Strahlung, **309**
 Raumkühlung, **224**
 Raumladungs–Doppelschicht, **279**
 Rayleigh–Zahl, **419**
 Reaktionswärme, **274**
 Reaktor, **308**
 Transurane, **308**
 reale Gase, **439, 443, 452, 457**
 Gleichgewichtseigenschaften, **452**
 kalorische Größen, **457**
 Zustandsdiagramm, **452**
 Zustandsgleichungen, **440, 443**
 reale Kristalle, **503**
 reale Magnete, **469**
 reale Maschinen, **259**
 Wirkungsgrade, **259**
 Reflexion, **424**
 Regenerator, **228, 232**
 integrierter, **232**
 reine Stoffe, **170**
 Relaxationszeit, **129**
 Response–Eigenschaften, **363**
 Response–Größen, **363**
 Klassifikation, **363**
 Response–Koeffizienten, **37, 363, 370, 380**
 Beziehungen, **370**
 Messmethoden, **380**
 Response–Matrix, **367(T), 368**
 erweiterte, **368**
 Suszeptibilitäten, **367(T)**
 Restentropie, **172**
 reversibel und quasistatisch, **148**
 Begriffe, **148**
 reversibler Prozess, **135**
 Reversibilität, **145**
 reversible Änderung, **146, 147**
 nahe am Gleichgewicht, **147**
 nicht dissipativ, **146**
 quasistatisch, **146**
 vollständig umkehrbar, **147**

- Richtungsquantelung, 94
 Riesen–Magnetowiderstand, 502
 RKKY–Wechselwirkung, 501
 rms–Geschwindigkeit, 207
 RNA–Molekül, 589
 Dehnung, 589
 Rotation, 569
 Brownsche, 569
 Rotations–Diffusionskoeffizient, 569
 roter Riesenstern, 331
- S**
- Sackur–Tetrode–Gleichung, 144, 159, 285
 ideales Gas, 159
 Photonen, 285
 Sattldampf, 341
 Sättigungsmagnetisierung, 474
 Sättigungsmoment, 499
 Schallgeschwindigkeit, 380, 507
 Scherströmung, 398
 Scherviskosität, 399
 Schmelz(druck)kurve, 352, 353
 Schmelzpunkte, 352(T)
 Schmelzwärme, 141
 Schottky–Anomalie, 98
 Schrödinger–Gleichung, 60
 Schwankungserscheinungen, 563
 schwarzer Zwergstern, 331
 schwarzes Loch, 320
 Gravitationsenergie, 320
 Schwingungen, 104
 Atom, 104
 Schwingungsenergie, 46, 504
 Atom, 504
 Quantisierung, 46
 Schwingungsfreiheitsgrade, 46
 Schwingungsmoden, 46, 105
 Schwingungsquantenzahl, 46, 105
 Sekundärenergie, 273, 289, 291
 Selbstdiffusion, 404
 SI–system, 487
 Siedekurve, 353
 Siedepunkt, 352(T)
 Siedepunktserhöhung, 558
 Siliziumzelle, 281
 Verluste, 281
 Solarkonstante, 281, 292
 Solarzelle, 277, 280, 283
 Strom–Spannungs–Kennlinie, 280
 Verlustminimierung, 283
 Wirkungsgrad, 280
 Sonne, 312, 320, 321, 324, 325, 327, 330, 331
 Energiebilanz, 327
 Energieproduktion, 320, 324
 Energietransport, 325
 Entropieproduktion, 327
 Entstehung, 321
 Strahlungsenergie, 312
 Struktur, 321
 Thermodynamik, 320
 Wärmekapazität, 330
 Zukunft, 331
 Sonnenenergie, 291
 Sonnenenergie, 299
 Nutzung, 299
 Sonnenlicht, 282, 326
 spektrale Zusammensetzung, 326
 Spektrum, 282
 Sonnenspektrum, 284, 326
 Erdoberfläche, 284
 Sonnenstrahlung, 326
 Erdnähe, 326
 Spaltprodukte, 307–308
 Radioaktivität, 308
 Spannungskoeffizient, 37
 Spätschäden, 309
 spezifische Wärme, 21, 39
 Spin, 94, 470, 502
 Spindrift, 413
 Spin–Hall–Effekt, 390
 Spinodale, 453
 Spinordnung, 489, 492, 494
 antiferromagnetische, 489
 ferrimagnetische, 494
 unkompensierte antiferromagnetische, 492
 Spinstrom, 560
 Spinsystem, 93, 94, 122
 Spintemperatur, 101
 idealer Paramagnet, 102
 negative, 103
 Spintronik, 559
 Spinumkehr, 502
 spontane Magnetisierung, 346, 470
 Spurenstoffe, 301
 Atmosphäre, 301
 SSFT, 579
 stationäre Strömungen, 392
 statistische Physik, 10, 11
 statistisches Gewicht, 54
 Stefan–Boltzmann–Gesetz, 294, 304, 423, 424
 Stefan–Boltzmann–Konstante, 304
 Steinkohle–Einheiten (SKE), 605
 Sternatmosphären, 207
 Stirling–Näherung, 69
 Stoffeigenschaften, 6, 375
 Temperaturabhängigkeit, 6, 375

- Stoffmenge, 25
 - Einheit, 25
 - Stokes (Einheit), 400
 - Stoßzeit, 394
 - mittlere, 394
 - Strahlendosis, 309
 - Strahlenkrankheit, 309
 - Strahlentod, 309
 - Strahltriebwerk, 251
 - Strahlung, 416
 - Strahlungsgesetz, 423
 - Kirchhoff'sches, 423
 - Streuung, 493
 - Stromdichte, 291, 385
 - Strömung, 400
 - laminar, 400
 - turbulent, 400
 - Sublimation, 353
 - Sublimations(druck)kurve, 353
 - Superaustausch, 499
 - supraflüssige Phase, 346
 - Suszeptibilität, 37, 363, 367(T), 368, 369, 475, 490
 - höherer Ordnung, 369
 - konventionelle, 368
 - magnetische, 475
 - Temperaturabhängigkeit, 490
 - verallgemeinerte, 37, 363
 - Suszeptibilitäten idealer Gase, 36
 - Systeme, 53, 186, 187, 188, 191, 195, 487
 - kanonische, 195
 - makrokanonische, 195
 - mikrokanonische, 195
 - wechselwirkende, 188, 191
 - Wechselwirkung, 187
 - System vieler Teilchen, 31
 - Gesamtenergie, 31
- T**
- Tandemzelle, 284
 - Taylor–Wirbel, 432
 - Teertropfen–Experiment, 402
 - Teilchen im Gravitationsfeld, 199
 - Teilchen im Kasten, 82
 - Temperatur, 4, 30, 51, 53, 74, 75, 81, 90, 97, 107
 - Definition, 53, 75, 90
 - Messmethoden, 11
 - Schwankungen, 81
 - statistische, 97, 107
 - Vergleich, gemessen und berechnet, 74
 - Temperatenausgleich, 52, 54
 - Temperaturdefinition, 74
 - Boltzmanns, 74
 - Temperaturleitzahl, 396
 - Temperaturmessung, 11
 - Temperaturskalen, 15, 18
 - TFT, 579
 - thermischer Kontakt, 53
 - thermisches Gleichgewicht, 22
 - thermische Zustandsgleichung, 25, 99
 - idealer Paramagnet, 99
 - Thermodynamik, 10
 - thermodynamische Potenziale, 519, 526, 532
 - Bedeutung, 520
 - Definition, 520
 - Extremaleigenschaft, 526
 - Responsegrößen, 532(T)
 - thermodynamische Systeme, 526
 - thermodynamische Wahrscheinlichkeit, 54
 - Thermoelement, 13
 - Thermomagnetische Effekte, 389, 390
 - Thermometer, 11, 12
 - Thermorezeptoren, 11, 76
 - Thomson–Effekt, 459
 - tödliche Dosis, 309
 - Brennelement, 309
 - Transportgesetze, 384
 - konventionelle, 384
 - Transportgleichungen, 428
 - lineare, 428
 - Transport–Koeffizienten, 38, 364, 385, 387(T), 415
 - Zusammenhänge, 415
 - Transportmatrix, 386, 387(T)
 - Transportprozesse, 383, 384, 385, 392, 431
 - Entropieerzeugung, 428
 - mikroskopisches Schema, 392
 - weit entfernt vom Gleichgewicht, 431
 - Überblick, 384
 - Transurane, 307
 - Treibhauseffekt, 299, 300, 306
 - Erdatmosphäre, 300
 - Triebkraft, 385, 428
 - Triebkraft der Wärmeleitung, 429
 - Tripellinie, 341, 343
 - Tripelpunkt, 17, 341, 343(T)
 - Wasser, 17
 - Tripelpunktzelle, 17
 - Turbinen, 249
- U**
- Überhitzung, 454
 - Umgebung, 135
 - Umrechnungsfaktoren für mechanische und thermische Einheiten, 609(T)

Umwandlungsenthalpie, **350, 351, 352**
 Umwandlungsentropie, **353**
 Umwandlungsmethoden, **298**
 Effizienz, **298**
 Energie, **298**
 Umwandlungswärme, **352**
 Unbestimmtheits-Beziehung, **63**
 Unerreichbarkeit von $T = 0$, **173**
 Universalität, **359**
 kritische Punkte, **359**
 Unordnung, **175**
 Untergittermagnetisierung, **489**
 Unterkühlung, **454**
 Ununterscheidbarkeit, **110**
 Uranvorräte, **297**

V

Van-der-Waals-Gleichung, **441**
 Van-der-Waals-Isothermen, **453**
 Van-der-Waals-Koeffizienten, **456**
 Van-der-Waals-Konstanten, **443(T)**
 Van't Hoff'sche Gleichung, **554, 555**
 verbotenes Volumen, **445**
 Verbrennungsmotoren, **240**
 Verbrennungsturbine, **250**
 offene, **250**
 Verdampfung, **351**
 Verdampfungswärme, **141, 252**
 Verdrängerkolben, **232**
 Verflüssigung, **468**
 Gas, **468**
 Verlustenergie, **221**
 Vielfachheit, **54**
 Vielteilchensystem, **32**
 Virialentwicklung, **440**
 Virialkoeffizienten, **441, 448, 450**
 Potenzial, **448**
 Temperaturabhängigkeit, **450**
 Virialsatz, **327**
 Viskosität, **398**
 dynamische, **400**
 kinematische, **400**
 Volumenviskosität, **399, 417**
 Vorräte, Brennstoffe, **295**
 Vorzugsrichtung, **490**
 Magnetisierung, **490**

W

Wahrscheinlichkeit eines Zustands, **136**
 Wahrscheinlichkeitsdichte, **204, 209**
 wahrscheinlichste Geschwindigkeit, **206**
 Wankel-Motor, **245**
 Wärme, **4, 114, 129**
 Definition, **114**

 Messmethoden, **11**
 Problematik des Wortes, **129**
 Wärmeausdehnung, **37**
 Wärmebad, **81, 192**
 Wärmediagramm, **233**
 Wärmedurchgang, **415, 416**
 Wärmeflüsse, **426**
 drei Übergangsarten, **426**
 Wärmehalt, **522**
 Wärmekapazität, **21, 39, 41, 74, 98, 108, 109, 118, 141, 182, 330, 483, 484, 514**
 Ferromagnetika, **484**
 idealer Paramagnet, **98**
 ideales Gas, **74**
 Metalle, **514**
 negative, **330**
 Temperaturabhängigkeit, **41**
 Temperaturverlauf, **484**
 tiefe Temperatur, **514**
 Wärme-Kraft-Maschinen, **134, 219, 221, 267, 522**
 Entropieerzeugung, **267**
 zyklische, **134**
 Wärmelehre, **4**
 Wärmeleitfähigkeit, **395, 397**
 Stoffe, **397**
 Wärmeleitung, **395, 428**
 Entropieproduktion, **428**
 Wärmeleitung oder Strahlung, **156**
 Wärmemessung, **19**
 Wärmepumpe, **224, 226, 252, 256**
 Gesamtleistungsfaktor, **256**
 Überlegenheit, **226**
 Wärmespeicher, **270**
 Wärmetransport, **420, 422**
 Mehrfachschichten, **420**
 Strahlung, **422**
 Wärmetransportgleichung, **417**
 Wärmeübergang, **415, 416**
 Wärmeübergangs-Koeffizient, **418, 425, 426**
 Strahlung, **425**
 Wärme und Arbeit, **22, 113, 123, 124, 127**
 qualitativer Unterschied, **123, 124, 127**
 Wasser, **379**
 Dichtemaximum, **379**
 Response-Koeffizienten, **379**
 Wasserkraftwerke, **291**
 Wasserstoffmolekül, **503**
 Wechselwirkung, **94, 188, 190, 191**
 magnetische, **94**
 mechanische, **190**
 thermische, **188, 191**

- Wechselwirkungsenergie, 470
 - magnetostatische, 470
- weißer Zwergstern, 331
- Weiss-Konstante, 477, 482
- Weiss'sche Molekularfeldtheorie, 479
- Weiss-Temperatur, 490
- Wellenfunktion, 83
- Welle-Teilchen-Dualismus, 82
- Weltbevölkerung, 288, 292, 295, 315
 - Energie- bzw. Leistungsbilanz, 292
 - Entropiebilanz, 292
- Widerstandsthermometer, 14
- Wirkung, 63
- Wirkungsgrad, 219, 221
 - Energiewandler, 264(T)
 - Maschinen, 219
 - reale Maschinen, 259
- Z**
- Zähigkeit, 400
- Zellengröße, 63
- Zustände, 56
 - erreichbare, 56
 - metastabile, 56
- Zustandsänderung, 128, 145, 256
 - ideale Gase, 258(T)
 - quasistatisch, 128
 - reversibel, 145
- Zustandsdiagramme, 340, 345
 - verschiedener Stoffe, 345
- Zustandsdichte, 65, 505, 508, 509, 513
 - Aluminium, 513
 - Debye, 509
 - Einstein, 509
- Zustandsfläche, 24, 25, 100, 340, 342, 345-347, 469, 472
 - Ferromagnet, 345
 - Helium-4, 346
 - idealer Paramagnet, 100
 - magnetische, 469, 472
 - Seifenlösung, 347
 - Wege, 342
- Zustandsfunktion, 76, 82, 97
 - Analyse, 76
 - ideales Gas, 82
 - quantenmechanische Herleitung, 82
- Zustandsgleichung, 16, 24
 - thermische, 16
- Zustandsgrößen, 25
- Zustandssumme, 65, 194, 197, 533, 534, 536
 - große, 197
 - ideales Gas, 534
 - mikrokanonische, 65
 - und Zustandszahl, 533
- Zustandszahl, 54, 65, 101, 118
 - Arbeit, 118
 - idealer Paramagnet, 101
 - Wärme, 118
- Zwangsbedingung, 145
- Zweiphasengebiete, 246, 344
- zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, 136, 162, 163, 165, 166, 222, 232, 239, 240, 252, 285, 526, 528, 582
 - Grundannahme, 165
 - Naturgesetz, 166
 - Solarzelle, 285
 - Verletzung, 582
 - verschiedene Formen, 162
 - Versionen, 163
 - Wahrscheinlichkeitsaussage, 166
- Zwischenlagerung, 311