

Fundamente, Fragmente, offene Fragen -  
ein Streifzug durch das Gebäude der allgemeinen  
und der technischen Physik

Wolfgang Jacobsen

Februar 2020

## Zusammenfassung

Dieses Lehrbuch der allgemeinen und technischen Physik wendet sich primär an Physikstudenten im Hauptstudium. Der Autor heißt aber genauso Physiker mit abgeschlossenem Studium sowie Leser ohne physikalische Vorkenntnisse willkommen bei dem Bemühen, zumindest aus dem Studium des einen oder anderen Teils dieses Buches einen Nutzen zu ziehen. Das Buch besteht aus den *Heften* Mechanik, Elektrostatik, Magnetostatik, Elektrodynamik, Quantenmechanik, Thermodynamik, Kristallphysik, Elementarteilchenphysik und Kosmologie, Optik, Materialwissenschaft, Strukturanalyse und Elektronik. Die für die jeweiligen Hefte erforderlichen mathematischen Grundlagen werden diesen jeweils stichwortartig vorangestellt. An die Einleitung schliesst sich ein Heft über die besondere Denkweise des Physikers an. Jedes Heft enthält eine Reihe von Aufgaben, deren Lösungen im Anhang zusammengefasst sind.

Die Entscheidung, ob man dieses Buch eher mit einem konventionellen Lehrbuch der Experimentalphysik oder der theoretischen Physik vergleichen kann, bleibt dem Leser überlassen. Es enthält eine Reihe ausgesprochen technisch orientierter Kapitel ebenso wie etliche die Fundamente der theoretischen Physik diskutierende Passagen.



Abb. 1

Dr. Wolfgang Jacobsen

Geboren 25. April 1940 in Lübeck

1956 - 1958 ; 1960 - 1961 Studium der Physikalischen Technik an der Physikalisch-Technischen Lehranstalt in Lübeck-Schlutup

1958 Prüfung z. Technischen Assistent für Physik

1958-1960 Physikalischer Assistent der BASF Ludwigshafen (Röntgenfeinstruktur und Röntgenkleinwinkelstreuung von Polymeren)

1961 Prüfung z. Physik-Ingenieur

1961-1966 Entwicklungsingenieur der Bayer AG Leverkusen (Entwicklung elektronischer Messgeräte und digitaler Datenerfassungssysteme)

1966 - 1970 Studium der Physik an der Universität (TH) Karlsruhe

1970 Diplom-Prüfung in Physik

1975 Promotion

1970-1975 Wissenschaftlicher Assistent der Universität Karlsruhe (Mathematische Physik)

1975-1999 Physiker der Bayer AG Leverkusen

Qualitätsprüfung photographischer Filme und Papiere;

Mitarbeit (teilweise Projektleitung) in den Forschungsprojekten: Aufgedampfte magnetische Speicher - polymere Zahnfüllungsmassen (Amalgamersatz) - polymere Hochleistungsverbundwerkstoffe - Polymer-Pulvertechnologie - polymere optische Fasern - elektrochrome Displays.

1999 Pensionierung

Anyone who stops learning is old, whether at twenty or eighty.

Anyone who keeps learning stays young.

The greatest thing in life is to keep your mind young.

Henry Ford



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung (*)</b>	<b>25</b>
1.1	Warum habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (*) . . . . .	25
1.2	Was möchte ich mit diesem Lehrbuch erreichen? (*) . . . . .	26
1.3	Für wen habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (*) . . . . .	28
1.4	Nach welchen Kriterien habe ich die Inhalte ausgewählt? (*) . . . . .	28
1.5	Hinweise zum Umgang mit diesem Lehrbuch (*) . . . . .	30
1.6	Danksagungen (*) . . . . .	35
1.7	Kennzeichnungen v. Größen u. Verknüpfungen (-) . . . . .	37
1.8	Abkürzungen (-) . . . . .	46
<b>2</b>	<b>Die besondere Denkweise des Physikers (*)</b>	<b>51</b>
2.1	Größen und Einheiten (*) . . . . .	51
2.2	Gesetze und Modelle (*) . . . . .	58
2.3	Das Experiment: Zentrum wissenschaftlicher Arbeit (*) . . . . .	63
2.4	Bilanzen und Erhaltungssätze (*) . . . . .	66
2.5	Mathematik - die Muttersprache des Physikers (*) . . . . .	68
2.6	Systeme und deren Umgebungen (*) . . . . .	72
2.6.1	Begriffsdefinitionen (*) . . . . .	72
2.6.2	Rückgekoppelte Systeme (*) . . . . .	74
2.7	Tipps, Tricks und Spezialitäten (*) . . . . .	76
2.7.1	Der Umgang mit dimensionsbehafteten Gleichungen (*) . . . . .	77
2.7.2	Richtiges Publizieren und Patentieren (*) . . . . .	78
2.7.3	Die Arbeitsteilung v. öffentlicher u. industrieller Forschung (-)	83
2.7.4	Fehlerrechnung (*) . . . . .	88
2.8	Aufgaben (-) . . . . .	95
2.9	Zahlenwerte (-) . . . . .	96
2.10	Literatur (-) . . . . .	97
<b>3</b>	<b>Mechanik - aller Anfang ist schwer (-)</b>	<b>99</b>
3.1	Mathematische Grundlagen der Mechanik (-) . . . . .	100
3.1.1	Elementare Geometrie (-) . . . . .	101
3.1.2	Elementare Vektoralgebra (-) . . . . .	116
3.1.3	Die Fundamente der modernen Mathematik (-) . . . . .	135

3.1.4	Der konstruktive Aufbau der reellen Zahlen (*)	151
3.1.5	Auf dem $\mathbb{R}^1$ definierte Funktionen (*)	157
3.1.6	Flächen und Kurven im $\mathbb{R}^3$ (-/-)	158
3.1.7	Die Ableitung einer Funktion (*)	159
3.1.8	Die Integration einer Funktion (*)	161
3.1.9	Reihenentwicklung von Funktionen (*)	166
3.1.10	Analysis von Funktionen mehrerer Veränderlicher (-)	175
3.1.11	Differenzialgleichungen (-/-)	180
3.1.12	Integralgleichungen (-/-)	180
3.1.13	Vektoranalysis (-)	180
3.1.14	Die Berechnung von Extremwerten (-)	196
3.1.15	Koordinatensysteme (-)	200
3.2	Geometrische Mechanik (-)	212
3.2.1	Ort und Bewegung von Körpern (-)	213
3.2.2	Bewegung starrer Körper (-)	214
3.2.3	Periodische Bewegungen (-)	216
3.2.4	Die Keplerschen Gesetze (-)	222
3.2.5	Die Ursache von Bewegungen (*)	223
3.2.6	Die Relativitätsprinzipien des Anschauungsraums (*)	230
3.2.7	Physikalische Vektoren (-/-)	233
3.2.8	Die Vereinheitlichung von Raum und Zeit (*)	233
3.2.9	Die wichtigsten Aussagen der speziellen Relativitätstheorie (-)	239
3.2.10	Die Gravitation (-)	257
3.2.11	Beschleunigte Bezugssysteme (-/-)	277
3.2.12	Tensor-Algebra (-)	278
3.2.13	Grundzüge der Differenzial-Geometrie (-/-)	282
3.2.14	Grundzüge der allgemeinen Relativitätstheorie (-)	283
3.3	Dynamische Mechanik (-)	292
3.3.1	Systeme, Variablen, Zustände (*)	293
3.3.2	Energie, Energieformen (*)	294
3.3.3	Die Energieform Translationsenergie (*)	295
3.3.4	Die Energieform Rotationsenergie (-)	299
3.3.5	Die Energieform Lageenergie (*)	301
3.3.6	Die Energieform Ladungsenergie (-)	303
3.3.7	Die Energieform Volumenenergie (-)	305
3.3.8	Die innere Energie (-)	306
3.3.9	Erhaltungssätze (-)	307
3.3.10	Stoßprozesse (-)	307
3.3.11	Die Gravitationsenergie (-)	309
3.3.12	Energie-Reservoir / Gibbs-Funktionen / Homogenität (*)	312
3.3.13	Austauschprozesse / Gleichgewicht (-)	316
3.3.14	Die Bewegungsgleichungen physikalischer Systeme (-)	317

3.3.15	Hydrostatik (-)	321
3.3.16	Strömungsmechanik (-)	324
3.3.17	Periodische Strömungen (-/-)	331
3.3.18	Relativistische Mechanik (-)	333
3.4	Messung mechanischer Größen (-)	340
3.4.1	Die Längenmessung (-)	341
3.4.2	Die Zeitmessung (-)	346
3.4.3	Die Messung von Winkeln und Richtungen (-)	352
3.4.4	Die Messung von Geschwindigkeiten (-)	353
3.4.5	Die Impulsmessung (-/-)	356
3.4.6	Die Energiemessung (-/-)	357
3.4.7	Die Massenbestimmung (-)	357
3.4.8	Die Messung der Massendichte (-/-)	360
3.4.9	Die Messung des statischen Drucks (-/-)	360
3.4.10	Die Messung von Gravitationswellen (-/-)	360
3.5	Mechanik des täglichen Lebens (-)	361
3.5.1	Die astronomischen Grundlagen unseres Kalenders (-)	361
3.5.2	Die Gesetzmäßigkeiten des Sonnenstands (-)	365
3.5.3	Die Mondphasen (-)	374
3.5.4	Transit-Konstellationen von Himmelsobjekten (*)	376
3.5.5	Navigation (-)	380
3.5.6	Die Gesetzmäßigkeiten von Ebbe und Flut (-)	389
3.5.7	Mechanische Maschinen (-)	394
3.5.8	Hydraulische Maschinen (-/-)	398
3.5.9	Die Verteilung von Gasen in der Atmosphäre (-)	398
3.5.10	Strömungsantriebe (-/-)	400
3.5.11	Windkraftanlagen (-)	401
3.5.12	Segeln (-)	405
3.5.13	Musik / Musikinstrumente / Sprache (-)	424
3.6	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	455
3.6.1	Umgang mit partiellen Ableitungen (*)	455
3.6.2	Der Vektorbegriff in der Mathematik und in der Physik (-/-)	457
3.6.3	Parameterdarstellung von Funktionen (-/-)	457
3.6.4	Die Kinderschaukel (-/-)	457
3.6.5	Die Pioneer-Anomalie (-)	457
3.6.6	Unser Planetensystem (-)	459
3.6.7	Extensive Größen und deren Ströme in der Ökonomie (-)	468
3.7	Aufgaben (-)	471
3.8	Zahlenwerte (-)	476
3.9	Literatur (-)	478

<b>4</b>	<b>Elektrostatik - Basis von Blitz und Fax (-)</b>	<b>481</b>
4.1	Komplexe Zahlen und Funktionen (-) . . . . .	482
4.1.1	Algebra der komplexen Zahlen (*) . . . . .	482
4.1.2	Die Ableitung komplexer Funktionen (*) . . . . .	488
4.1.3	Die Integration komplexer Funktionen (*) . . . . .	491
4.1.4	Die Singularitäten komplexer Funktionen (-/-) . . . . .	495
4.2	Mathematische Grundlagen des System-Response (-) . . . . .	496
4.2.1	Linear Response, Suszeptibilität (*) . . . . .	496
4.2.2	Nicht-instantaner Linear Response (*) . . . . .	498
4.2.3	Frequenzabhängigkeit der linearen Suszeptibilität (*) . . . . .	499
4.2.4	Suszeptibilität einfacher Modellsysteme (-) . . . . .	503
4.2.5	Systemantwort auf eine Sprungfunktion (-) . . . . .	505
4.2.6	Nichtlineare Response-Funktionen (-/-) . . . . .	506
4.2.7	Komplexwertige physikalische Größen (-) . . . . .	506
4.3	Grundfakten der Elektrostatik (-) . . . . .	513
4.3.1	Die Energieform elektrische Energie (*) . . . . .	513
4.3.2	Das elektrische Feld einer Punktladung (-) . . . . .	518
4.3.3	Elektrostatische Felder beliebiger Ladungsverteilungen (-) . . . . .	521
4.3.4	Die elektrische Feldenergie (-) . . . . .	525
4.3.5	Einige Beispiele von Ladungsverteilungen (-) . . . . .	527
4.4	Materie im elektrischen Feld (-) . . . . .	529
4.4.1	Ladungsverteilung in leitenden Materialien (-) . . . . .	529
4.4.2	Polarisierbare Materialien (-) . . . . .	534
4.4.3	Das Gesamtsystem aus Materie und elektrischem Feld (-) . . . . .	538
4.4.4	Dielektrische Materialien (-) . . . . .	546
4.4.5	Ferro-elektrische Materialien (-/-) . . . . .	549
4.4.6	Die dielektrische Funktion (-) . . . . .	549
4.4.7	Nichtlineare Polarisation (-/-) . . . . .	550
4.5	Nicht-elektrisch induzierte Polarisation (-) . . . . .	550
4.5.1	Der Piezo-Effekt (-) . . . . .	551
4.5.2	Die Pyro-Elektrizität (-/-) . . . . .	552
4.6	Reibungselektrizität (-) . . . . .	552
4.6.1	Experimentelle Grundphänomene der Reibungselektrizität (-) . . . . .	553
4.6.2	Physikalische Deutung der Reibungselektrizität (-) . . . . .	554
4.7	Messung elektrostatischer Größen (-/-) . . . . .	556
4.7.1	Elektrostatische Spannungsgeneratoren (-/-) . . . . .	556
4.7.2	Elektrostatische Kondensatoren (-/-) . . . . .	556
4.7.3	Das Elektrometer (-/-) . . . . .	557
4.7.4	Die Bestimmung der Elementarladung (-) . . . . .	557
4.8	Elektrostatik des täglichen Lebens (-) . . . . .	558
4.8.1	Elektrostatik der Erdatmosphäre (-) . . . . .	559
4.8.2	Der elektrostatische Kopierer (-) . . . . .	564



4.8.3	Elektrostatische Sprühvorrichtungen (-/-) . . . . .	566
4.8.4	Elektrostatische Probleme in Produktionsbetrieben (-/-) . . . . .	566
4.9	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-) . . . . .	568
4.9.1	Nutzen/Grenzen der Fourier-Darstellung v. $\chi(t)$ (-/-) . . . . .	568
4.9.2	Verhalten im Freien bei Gewitter (-) . . . . .	568
4.10	Aufgaben (-) . . . . .	570
4.11	Zahlenwerte (-/-) . . . . .	571
4.12	Literatur (-) . . . . .	572
<b>5</b>	<b>Magnetostatik - das Kraftpaket (-)</b>	<b>573</b>
5.1	Die Grundfakten der Magnetostatik (-) . . . . .	573
5.1.1	Die Energieform magnetische Energie (-) . . . . .	575
5.1.2	Das magnetische Feld (-) . . . . .	577
5.1.3	Die magnetische Feldenergie (-) . . . . .	581
5.2	Materie im magnetischen Feld (-) . . . . .	581
5.2.1	Das Gesamtsystem aus Materie und magnetischem Feld (-) . . . . .	582
5.2.2	Diamagnetische Materialien (-) . . . . .	586
5.2.3	Paramagnetische Materialien (-) . . . . .	587
5.2.4	Ferromagnetische Materialien (-/-) . . . . .	587
5.3	Messung magnetischer Größen (-/-) . . . . .	587
5.4	Magnetostatik des täglichen Lebens (-/-) . . . . .	588
5.5	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-) . . . . .	588
5.6	Aufgaben (-/-) . . . . .	588
5.7	Zahlenwerte (-/-) . . . . .	588
5.8	Literatur (-) . . . . .	589
<b>6</b>	<b>Elektrodynamik - Maxwells Lebenswerk (-)</b>	<b>591</b>
6.1	Die Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Effekten (*) . . . . .	591
6.1.1	Die magnetische Erzeugung elektrischer Felder (*) . . . . .	592
6.1.2	Die elektrische Erzeugung magnetischer Felder (-) . . . . .	593
6.1.3	Selbstinduktion / Induktivität (-) . . . . .	598
6.1.4	Die Lorentz-Kraft (-) . . . . .	600
6.1.5	Feldtheoretische Formulierung d. elektrodynamischen Gesetze (-) . . . . .	603
6.1.6	Relativistische Elektrodynamik (-/-) . . . . .	608
6.2	Die periodischen Lösungen der Maxwell-Gleichungen (-) . . . . .	609
6.2.1	Die Wellengleichung des elektromagnetischen Feldes (*) . . . . .	610
6.2.2	Die Lösungen der Wellengleichung (-/-) . . . . .	611
6.2.3	Elektromagnetische Strahlung (-) . . . . .	611
6.3	Messung elektrodynamischer Größen (-/-) . . . . .	620
6.4	Elektrodynamik des täglichen Lebens (-) . . . . .	620
6.4.1	Der Elektromotor (-) . . . . .	622

6.4.2	Der Generator (-/-)	624
6.4.3	Der Transformator (-)	624
6.4.4	Das Kraftwerk (-)	625
6.4.5	Das Drehstromkonzept (-)	627
6.4.6	Das Stromnetz (-)	629
6.5	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	633
6.6	Aufgaben (-/-)	633
6.7	Zahlenwerte (-/-)	633
6.8	Literatur (-)	634
<b>7</b>	<b>Quantenmechanik - Revolution des physikalischen Weltbildes (-)</b>	<b>635</b>
7.1	Teilchen und Wellen im Bild der klassischen Physik (*)	636
7.2	Die entscheidenden experimentellen Fakten (*)	638
7.2.1	Quantisierung ruhemasseloser Strahlung (*)	638
7.2.2	Interferenz ruhemasse-behafteter Teilchen (*)	640
7.2.3	Die Stabilität der Atome (*)	641
7.2.4	Die statistische Natur physikalischer Messergebnisse (*)	643
7.2.5	Die Unschärferelation (-)	643
7.2.6	Der Tunneleffekt (*)	645
7.2.7	Die Ununterscheidbarkeit identischer Teilchen (*)	646
7.2.8	Das Korrespondenzprinzip (*)	647
7.3	Die Grundstruktur der Quantenmechanik (*)	648
7.4	Mathematische Strukturen der Quantenmechanik (*)	661
7.4.1	Vektorräume (*)	662
7.4.2	Lineare Unabhängigkeit / Definition einer Basis (*)	663
7.4.3	Die Determinante einer Matrix (-)	666
7.4.4	Untervektorräume (-)	666
7.4.5	Norm / Skalarprodukt / Vollständigkeit / Orthogonalität (*)	667
7.4.6	Funktionen-Räume (-)	671
7.4.7	Operatoren / Eigenvektoren / Hermitezität (-)	682
7.4.8	Verknüpfung von Operatoren (-)	687
7.4.9	Diagonalisierung von Operatoren (-/-)	688
7.4.10	Maßtheorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung (-)	689
7.5	Die konsistente Formulierung der Quantenmechanik (-)	707
7.6	Darstellungsarten der Quantenmechanik (-/-)	709
7.6.1	Darstellung der Zustände als Funktionen im Ortsraum (Schrödinger-Darstellung) (-/-)	709
7.6.2	Darstellung der Zustände über die Eigenzustände einer diskret verteilten Observablen (Heisenberg-Darstellung) (-/-)	710
7.6.3	Dichtefunktionale (-/-)	710
7.7	Die wichtigsten Operatoren (-)	710
7.7.1	Der Orts-Operator (-)	710

7.7.2	Der Impuls-Operator (-)	711
7.7.3	Der Drehimpuls-Operator (-/-)	712
7.7.4	Der Operator des elektromagnetischen Feldes (-/-)	713
7.7.5	Der Operator des magnetischen Momentes (-/-)	714
7.7.6	Der Spin-Operator (-/-)	714
7.7.7	Der Teilchenzahl-Operator (-)	714
7.7.8	Der Energie-Operator (-)	714
7.7.9	Die Operatoren für Ströme extensiver Größen (-/-)	715
7.7.10	Äußere und innere Variablen (-/-)	715
7.8	Faktorisierende Systeme / 2. Quantisierung (-)	715
7.8.1	Wechselwirkungsfreie Untersysteme (-)	715
7.8.2	Systeme aus identischen Teilchen (-)	716
7.8.3	Die 2. Quantisierung (-)	720
7.9	Anwendungsbeispiele (-)	723
7.9.1	Das Teilchen im Kasten-Potenzial (-)	724
7.9.2	Der harmonische Oszillator (-)	731
7.9.3	Das Elektron im Coulombfeld (-)	740
7.9.4	Das elektromagnetische Strahlungsfeld (-/-)	745
7.9.5	2-Zustands-Systeme (-/-)	745
7.10	Der quasi-klassische Grenzfall (-/-)	746
7.11	Verschränkte Zustände (-/-)	746
7.12	Quantenmechanische Störungstheorie (-)	746
7.12.1	Die zeitunabhängige Störung eines nicht entarteten Systems (-)	747
7.12.2	Die Störungstheorie eines entarteten Systems (-)	749
7.12.3	Die Theorie zeitabhängiger Störungen (-/-)	750
7.12.4	Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten (-/-)	750
7.12.5	Streuprozesse (-)	751
7.13	Anwendungen der Störungstheorie (-/-)	753
7.13.1	Das Elektronensystem der Atome (-/-)	753
7.13.2	Quantenmechanik der chemischen Bindung (-)	753
7.13.3	Strahlungs-Emission und -Absorption (-/-)	757
7.13.4	Der Raman-Effekt (-)	757
7.13.5	Magnetische Resonanz (-/-)	760
7.13.6	Mehrphotonen-Prozesse (-/-)	760
7.14	Quantenfeldtheorie (-/-)	760
7.14.1	Quantenelektrodynamik (-/-)	761
7.15	Makroskopische quantenmechanische Systeme (-)	761
7.15.1	Elementare Anregungen / Quantenkondensation (-)	762
7.15.2	Das Bose-Einstein-Kondensat (-)	763
7.15.3	Die Supraleitung (-/-)	764
7.15.4	Die Suprafluidität (-/-)	764
7.16	Offene Fragen der Quantenmechanik (-/-)	764

7.17	Quantenmechanik des täglichen Lebens (-)	765
7.17.1	Physik der Atomkerne (-)	765
7.17.2	Physik der H-Bombe u. des Fusions-Reaktors (-)	779
7.17.3	Physik der Kernspaltungs-Bombe u. des Spaltungs-Reaktors (-)	789
7.17.4	Die Lagerung radioaktiver Abfälle (-)	802
7.17.5	Nuklearmedizin (-/-)	808
7.17.6	Einheiten für die Messung radioaktiver Strahlung (-)	810
7.17.7	Wechselwirkung zw. Kommunikations-Strahlung u. Materie (-)	812
7.18	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	815
7.18.1	Der Thorium-Reaktor (-/-)	815
7.18.2	Der Umgang mit Wahrscheinlichkeitsgrößen (-)	816
7.18.3	Abschätzungen mit Hilfe von Mittelwerten (-)	817
7.18.4	Testverfahren (-)	818
7.18.5	Natürliche Kernspaltungs-Reaktoren (-)	819
7.18.6	Die kalte Fusion (-/-)	821
7.19	Aufgaben (-)	821
7.20	Zahlenwerte (-)	824
7.21	Literatur (-)	827
<b>8</b>	<b>Thermodynamik - Verknüpfung von Mikro- und Makro-Kosmos (*)</b>	<b>829</b>
8.1	phänomenologische Gleichgewichts-Thermodynamik (*)	830
8.1.1	Die Energieform thermische Energie (*)	830
8.1.2	Die Energieform chemische Energie (-)	832
8.1.3	Energie-Umwandlungen (*)	834
8.1.4	2 Hauptsätze der Thermodynamik (*)	837
8.1.5	Energieartige Gibbs-Funktionen (*)	838
8.1.6	Entropieartige Gibbs-Funktionen (*)	840
8.1.7	Isotherme Austauschprozesse (-)	841
8.1.8	Materialparameter (*)	842
8.1.9	Zustandsgleichungen (*)	851
8.1.10	Ideale Gase (*)	854
8.1.11	Reale Gase / van-der-Waals-Gleichung (-)	859
8.1.12	Chemische Reaktionen (-)	862
8.1.13	Phasen, Phasengrenzen, Stabilität (*)	872
8.1.14	Koexistenz von Phasen (*)	877
8.1.15	Phasendiagramme, Phasenübergänge (*)	883
8.1.16	Innere Variablen, Phasenübergänge 2. Art (-)	889
8.1.17	Lösungen (*)	892
8.1.18	Die Energieform Grenzflächenenergie (-)	897
8.2	Thermodynamik der dissipativen Ströme (-)	903
8.2.1	Der Nichtgleichgewichtszustand (-)	903
8.2.2	Verallgemeinerte Ströme und thermodynamische Kräfte (-/-)	904

8.2.3	Transportkoeffizienten (-/-)	905
8.2.4	Teilchen-Diffusion (-/-)	905
8.2.5	Wärmeleitung (-/-)	905
8.2.6	Irreversible Strömungsmechanik (-/-)	906
8.2.7	Stationäre elektrische Ströme (-/-)	908
8.3	Elektrochemie (-)	908
8.3.1	Die Energieform elektrochemische Energie (-)	909
8.3.2	Elektrolyt, Dissoziation (-)	911
8.3.3	Das abgeschirmte Coulomb-Potenzial (-)	912
8.3.4	Einige Elektrolyt-Systeme (-)	914
8.3.5	Elektrochemische Kontakte (-/-)	918
8.3.6	Stationäre Ströme in Elektrolyten (-/-)	918
8.3.7	Gasentladungen (-/-)	919
8.3.8	Plasmen (-/-)	919
8.4	Statistische Thermodynamik (*)	919
8.4.1	Mikro- und Makrozustände (*)	920
8.4.2	Thermischer Kontakt / Gleichgewicht / Entropie (*)	923
8.4.3	Der Nullpunkt der Entropie (*)	926
8.4.4	Weitere Austauschprozesse (*)	927
8.4.5	Entropie-Reservoirs / Boltzmannfaktor / Zustandssumme (*)	929
8.4.6	Die großkanonische Zustandssumme (*)	932
8.4.7	Vielteilchen-Systeme aus wechselwirkungsfreien Teilchen (*)	934
8.4.8	Statistische Thermodynamik der Phasenübergänge (-)	939
8.4.9	Theorie der Fluktuationen (-/-)	941
8.5	Thermodynamik der elektromagnetischen Strahlung (-)	941
8.5.1	Das Photonengas im thermodynamischen Gleichgewicht (*)	942
8.5.2	Strahlungsemission und -absorption (*)	945
8.5.3	Aktuelle Fragen der Strahlungs-Thermodynamik (-/-)	952
8.6	Messung thermodynamischer Größen (-)	952
8.6.1	Temperaturmessung (-)	952
8.6.2	Messung der Grenzflächen-Energie (-/-)	952
8.6.3	Messung von Reaktions-Enthalpien (-/-)	952
8.6.4	Messung elektrochemischer Kontaktpotenziale (-/-)	953
8.7	Das Klima der Erde (-)	953
8.7.1	Strahlungsbilanz der Planeten / Treibhauseffekt (-)	954
8.7.2	Ein einfaches Modell des globalen Klimas (-)	963
8.7.3	Die Struktur der Erd-Atmosphäre (-)	978
8.7.4	Globale thermische Ausgleichsströme / das globale Klima (-)	985
8.7.5	Die erdgesichtliche Entwicklung des globalen Klimas (-)	1003
8.7.6	Das Systemverhalten des Erdklimas (-)	1014
8.7.7	Eine Deutungs-Hypothese des globalen Klimas (-)	1031
8.8	Thermodynamik des täglichen Lebens (-)	1046

8.8.1	Technische Verfahren zur Herstellung chemischer Produkte (-)	1046
8.8.2	Wärmetransport durch Leitung, Konvektion und Strahlung (-)	1050
8.8.3	Wärmespeicher (-/-)	1052
8.8.4	Das Wasser (-)	1053
8.8.5	Das Feuer (-)	1054
8.8.6	Die Gebäudetemperierung (-)	1057
8.8.7	Wirbelstürme (-)	1060
8.8.8	Elektrochemie des täglichen Lebens (-/-)	1066
8.8.9	Wärme­kraft­ma­schin­en (-)	1067
8.8.10	Kühlmaschinen und Wärmepumpen (-)	1079
8.8.11	Thermodynamik der Energieversorgung (-)	1084
8.9	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1108
8.9.1	Alltags-Probleme beim Umgang mit thermischen Begriffen (-)	1108
8.9.2	Die Analogie von Wärmestrom und elektrischem Strom (-/-)	1110
8.9.3	Einige energietechnische Vorurteile (-)	1111
8.9.4	Meerwasser-Entsalzung (-/-)	1115
8.9.5	Das Klima im Grand Canyon und der Treibhauseffekt (*)	1115
8.9.6	Das Klima im Wald (-)	1117
8.9.7	Chancen e. positiven anthropogenen Klima-Beeinflussung (-)	1119
8.10	Aufgaben (-)	1122
8.11	Zahlenwerte (-)	1127
8.12	Literatur (-)	1131
<b>9</b>	<b>Kristallphysik - Dominanz der Symmetrie (-)</b>	<b>1135</b>
9.1	Der ideale Kristall (-/-)	1138
9.1.1	Symmetrie-Operationen / Einheitszelle (-)	1138
9.1.2	Die wichtigsten Kristallklassen (-/-)	1139
9.1.3	Langreichweitige und kurzreichweitige Ordnung	1140
9.2	Anregungen des Gittersystems (-/-)	1140
9.3	Anregungen des Elektronensystems (-/-)	1141
9.3.1	Das Elektron im periodischen Potenzial (-/-)	1141
9.3.2	Die Dichtefunktionaltheorie (-/-)	1141
9.3.3	Plasmonen (-/-)	1141
9.4	Metalle (-/-)	1141
9.5	Halbleiter (-/-)	1141
9.6	Kristall-Kontakte (-/-)	1141
9.7	Wechselwirkungen zwischen Gitter- und Elektronensystem (-/-)	1141
9.8	Geordnete Systeme von eingeschränkter Dimension (-/-)	1141
9.8.1	2-dimensionale geordnete Systeme (-/-)	1142
9.8.2	1-dimensionale geordnete Systeme (-/-)	1142
9.8.3	0-dimensionale Systeme (-/-)	1142
9.9	Ungeordnete makroskopische Systeme (-/-)	1142

9.10	Kristallphysik des täglichen Lebens (-/-)	1142
9.11	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	1142
9.12	Aufgaben (-/-)	1142
9.13	Zahlenwerte (-/-)	1142
9.14	Literatur (-/-)	1143

**10 Elementarteilchen, Kosmologie:**

	<b>Physik ganz klein / ganz gross (-)</b>	<b>1145</b>
10.1	Physik der Elementarteilchen (-)	1145
10.1.1	Der Elementarteilchen-Zoo (-)	1146
10.1.2	Die Ruhemasse der Elementarteilchen (*)	1150
10.1.3	Die starke und die schwache Wechselwirkung (-/-)	1154
10.1.4	Neutrinos (-)	1154
10.1.5	Die SU(3)-Gruppe (-/-)	1160
10.1.6	Das Quark-Modell (-)	1160
10.1.7	Das Grundkonzept der Quantenchromodynamik (-)	1166
10.1.8	Die Theorie der schwachen Wechselwirkung (-/-)	1170
10.2	Astronomie (-)	1170
10.2.1	Dynamik der Stern-Entstehung (-)	1171
10.2.2	Fusions-Prozesse in Sternen (-)	1181
10.2.3	Stationäre Zustände v. Sternen (-)	1190
10.2.4	Spätzustände von Sternen (-)	1203
10.2.5	Sternumwandlungen (-)	1214
10.2.6	Physik der Sterne / Zusammenfassende Darstellung (-)	1227
10.2.7	Die Entstehung von Planetensystemen (-)	1228
10.2.8	Physik unserer Sonne (-/-)	1238
10.2.9	Physik unserer Erde (-)	1239
10.2.10	Physik unserer Planeten (-)	1269
10.2.11	Asteroide und Kometen (-)	1350
10.2.12	Galaxien (-)	1366
10.2.13	Sternhaufen (-)	1380
10.2.14	Astronomische Objekte / Zusammenfassung	1382
10.2.15	Galaxien-Cluster (-)	1386
10.2.16	Historische Entwicklung der astronomischen Forschung (-/-)	1386
10.3	Kosmologie (-)	1387
10.3.1	Die Unsymmetrie von Materie und Antimaterie (-)	1387
10.3.2	Die kosmologische Rotverschiebung (-/-)	1388
10.3.3	Die 3 · K-Hintergrundstrahlung (-)	1388
10.3.4	Die Raum-Zeit-Entwicklung des Kosmos (-)	1392
10.3.5	Die Bildung der Elemente (-)	1397
10.3.6	Dunkle Materie und dunkle Energie (-/-)	1398
10.3.7	Offene Fragen der Kosmologie (-/-)	1401

10.4	Elementarteilchenphysik und Kosmologie des täglichen Lebens . . . . .	1401
10.4.1	Die kosmische Strahlung und der Sonnenwind (-) . . . . .	1401
10.5	Messung von Kenndaten der Elementarteilchen (-/-) . . . . .	1407
10.5.1	Kanalstrahl-Experimente (-/-) . . . . .	1407
10.5.2	Teilchenbeschleuniger (-/-) . . . . .	1407
10.5.3	Teilchendetektoren (-/-) . . . . .	1407
10.6	Messung astronomischer und kosmologischer Größen (-/-) . . . . .	1408
10.6.1	Terrestische Teleskope (-/-) . . . . .	1408
10.6.2	Weltraum-Teleskope (-) . . . . .	1408
10.6.3	Radio-Astronomie (-/-) . . . . .	1411
10.6.4	Entfernungen (-) . . . . .	1412
10.6.5	Geschwindigkeiten (-/-) . . . . .	1416
10.6.6	Massenbestimmungen (-/-) . . . . .	1416
10.6.7	Geometrische Abmessungen (-) . . . . .	1416
10.6.8	Altersbestimmungen (-) . . . . .	1418
10.6.9	Spezielle Verfahren zur Bestimmung weiterer Kenndaten (-) .	1421
10.6.10	Der Seismograph (-) . . . . .	1422
10.6.11	Der Nachweis exosolarer Planeten (-/-) . . . . .	1422
10.6.12	Die Internationale Raumstation (-) . . . . .	1425
10.7	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-) . . . . .	1427
10.8	Aufgaben (-) . . . . .	1428
10.9	Zahlenwerte (-) . . . . .	1430
10.10	Literatur (-) . . . . .	1434
<b>11</b>	<b>Optik - Schwerpunkt aktueller Forschung (-)</b>	<b>1437</b>
11.1	Grundfakten der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung (-) . . .	1439
11.1.1	Das Superpositionsprinzip (-) . . . . .	1440
11.1.2	Beugung und Interferenz (-/-) . . . . .	1441
11.1.3	Die Polarisierung (-) . . . . .	1441
11.1.4	Die Prinzipien von Huygens und Fermat (-) . . . . .	1444
11.1.5	Die Kohärenz elektromagnetischer Strahlung (-) . . . . .	1445
11.1.6	Die Optische Abbildung (-/-) . . . . .	1447
11.1.7	Die Näherung der geometrischen Optik (-/-) . . . . .	1447
11.2	Lineares optisches Materialverhalten (-) . . . . .	1447
11.2.1	Reflexion und Brechung (*) . . . . .	1448
11.2.2	Absorption, Streuung, Fluoreszenz (*) . . . . .	1457
11.2.3	Reflexion und Brechung in absorbierenden Medien (-/-) . . . .	1462
11.3	Polarisations-spezifisches Materialverhalten (-) . . . . .	1462
11.3.1	Die Response-Funktion polarisationsverändernder Materialien (-) . . . . .	1462
11.3.2	Dichroismus (-) . . . . .	1464
11.3.3	Doppelbrechung (-) . . . . .	1466



11.3.4	Zirkular-Dichroismus / Optische Drehung (-)	1468
11.4	Feld-induziertes polarisationsabhängiges Verhalten (-/-)	1470
11.4.1	Elektrisch induzierte Doppelbrechung (-/-)	1471
11.4.2	Magnetisch induzierte Doppelbrechung (-/-)	1472
11.5	Nichtlineares optisches Materialverhalten (-/-)	1472
11.5.1	(diverse Abschnitte der nichtlinearen Optik) (-/-)	1473
11.6	Passive optische Elemente (-)	1473
11.6.1	Materialien für optische Elemente (-)	1473
11.6.2	Linsen (*)	1474
11.6.3	Spiegel (-)	1483
11.6.4	Prismen (-/-)	1485
11.6.5	Gitter (-)	1485
11.6.6	Optische Fasern (-)	1486
11.6.7	Blenden (*)	1488
11.6.8	Filter (-)	1489
11.6.9	Die Ulbricht-Kugel (-)	1492
11.6.10	Optisch-diffraktive Elemente (-/-)	1492
11.6.11	Polarisationsspezifische Elemente (-)	1493
11.6.12	Mikrostrukturierte Oberflächen (-/-)	1493
11.7	Messgrößen für optische Strahlungsströme (-)	1493
11.7.1	Messgrößen der Strahlungsemission (*)	1495
11.7.2	Messgrößen der Bestrahlung (-)	1500
11.7.3	Messgrößen des Strahlungsfeldes (-)	1501
11.7.4	Spektrale Gewichtung optischer Strahlung (*)	1503
11.7.5	Zusammenfassende Darstellung (-)	1504
11.8	Optische Strahlungsquellen (-)	1506
11.8.1	Strahlungsquellen mit vereinfachtem Abstrahlungsverhalten (*)	1508
11.8.2	Thermische Strahler (*)	1511
11.8.3	Gasentladungslampen (-)	1515
11.8.4	Licht emittierende Dioden (LEDs) (-)	1517
11.8.5	Laser (-)	1518
11.9	Strahlungsdetektoren (-)	1520
11.9.1	Empfindlichkeit, Signaldynamik (*)	1521
11.9.2	Lineare und logarithmische Strahlungsdetektion (*)	1523
11.9.3	Halbleiter-Photodioden (-)	1525
11.9.4	CCD-Chips (-)	1526
11.9.5	Photomultiplier / Multichannel Plates (-)	1528
11.9.6	Avalanche-Photodioden (-/-)	1531
11.10	Grundlagen des optischen Gerätebaus (*)	1531
11.10.1	Das Zusammenspiel von Beleuchtung und Abbildung (*)	1533
11.10.2	Geometrische Abbildung und Fouriertransformation (-/-)	1536
11.10.3	Gesetzmäßigkeiten des Strahlungsstroms (*)	1536

11.10.4	Kontrastmechanismen abbildender optischer Geräte (-)	1537
11.10.5	Die formgebende Bearbeitung optischer Bauelemente (-/-)	1543
11.10.6	Die Signaldynamik optischer Systeme (*)	1543
11.10.7	Zuverlässigkeit von Messgeräten (*)	1544
11.11	Einige geometrisch-optische Baugruppen u. Geräte (-)	1547
11.11.1	Relais-Optik / Diapositiv-Projektor (*)	1547
11.11.2	Die sequentielle Relais-Optik (*)	1547
11.11.3	Das Photometer (*)	1548
11.11.4	Scannende Abbildungsgeräte (-)	1551
11.11.5	Tomographische Verfahren der Bilderzeugung (-)	1563
11.11.6	Bildanalyse (-)	1564
11.11.7	Solar-Konzentratoren (-)	1571
11.12	Wellenoptische Geräte (-/-)	1575
11.12.1	Interferometer (-/-)	1575
11.12.2	Holographische Abbildungssysteme (-/-)	1575
11.12.3	Das optische Kurzzeitkohärenz-Mikroskop (-)	1575
11.13	Optik des täglichen Lebens (-)	1576
11.13.1	Beleuchtungsquellen (-)	1577
11.13.2	Der konventionelle photographische Film (-)	1578
11.13.3	Die Kamera (*)	1582
11.13.4	Das optische System des Auges (*)	1585
11.13.5	Die Retina (-)	1590
11.13.6	Geräte zur Unterstützung des Augensystems (*)	1593
11.13.7	Der Sextant (-)	1601
11.13.8	Die optische Datenspeicherung (-)	1604
11.14	Die Detektion von Farben (*)	1607
11.14.1	Grundkonzept eines farbselektiven Strahlungsmesssystems (*)	1609
11.14.2	Topologische Eigenschaften der Farbortmenge (*)	1613
11.14.3	Aktiv und passiv strahlende Objekte - die Farbe weiß (*)	1615
11.14.4	Dimension und Qualität eines Farbmesssystems (*)	1619
11.14.5	Das menschliche Farbmesssystem - die DIN-Farbkoordinaten (-)	1622
11.14.6	Das UVB-Farbmesssystem der Astronomie (-)	1624
11.14.7	Der Glanz (*)	1625
11.14.8	Der Farbabstand (*)	1627
11.14.9	Die Theorie deckender Anstriche (*)	1630
11.14.10	Wiedergabe von Farbbildern - Farbkorrektur (-)	1639
11.15	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1641
11.15.1	Optimierung der Abbildungsqualität (*)	1641
11.15.2	Falschlichtminimierung (*)	1642
11.15.3	Ausleuchtung größerer Flächen (*)	1644
11.15.4	Stabilisierung von Strahlungsquellen (-/-)	1647
11.15.5	Kalibrierung von Strahlungsdetektoren (*)	1647

11.15.6	Das Spektralprodukt optischer Geräte (*)	1649
11.15.7	Retroreflektoren (-/-)	1651
11.15.8	Messung des Streuvermögens (*)	1652
11.15.9	Messung des Absorptionsvermögens streuender Proben (*)	1653
11.15.10	Qualitätstests an Spektralphotometern (-)	1654
11.15.11	Apparative Trennung von Fluoreszenz und Ramanstreuung (*)	1656
11.15.12	Aktive und passive Anzeigen (*)	1660
11.15.13	Warum sind die Pflanzenblätter grün? (*)	1661
11.15.14	Die Farbe der Meere und des Himmels (-)	1663
11.15.15	Optik des Alters-Kataraktes (-/-)	1670
11.16	Aufgaben (-)	1671
11.17	Zahlenwerte (-)	1672
11.18	Literatur (-)	1675
<b>12</b>	<b>Materialwissenschaft - Basis technischen Wirkens (-)</b>	<b>1679</b>
12.1	Drei Grundfragen der Materialwissenschaft (*)	1681
12.1.1	Warum sind Festkörper verformbar? (*)	1681
12.1.2	Warum sind Festkörper schadenstolerant? (*)	1683
12.1.3	Warum sind Konstruktionskonzepte größenabhängig? (-)	1684
12.2	Die Energieform Verzerrungsenergie (-)	1689
12.2.1	Verformung, Verzerrung (-)	1690
12.2.2	Der linear-elastische Festkörper (-)	1695
12.2.3	Einfache Spannungszustände (-/-)	1699
12.2.4	Elastische Schwingungen (-/-)	1699
12.3	Linear-visko-elastische Materialien (-)	1699
12.3.1	Das periodische Belastungsexperiment (DMA) (*)	1700
12.3.2	Relaxationsprozesse in visko-elastischen Materialien (*)	1702
12.3.3	DMA-Spektren einiger typischer Polymere (-)	1705
12.3.4	Das dielektrische Relaxationsverhalten visko-elastischer Materialien (-/-)	1708
12.4	Nichtlineares Materialverhalten (-)	1709
12.4.1	Nichtlineare Materialkennlinie, inhomogene Verformung (*)	1709
12.4.2	Irreversible Verformung / Duktilität (*)	1713
12.4.3	Nichtlinearität und Geometrieabhängigkeit (-)	1715
12.4.4	Zerstörende Belastung / Zähigkeitsdefinitionen (-)	1717
12.4.5	Nichtelastische Wechselbelastungen / Ermüdung (-/-)	1720
12.4.6	Die Härte von Materialien (*)	1720
12.5	Die Aggregatzustände fest/flüssig/gasförmig (*)	1721
12.5.1	Thermodynamische Definition der Aggregatzustände	1721
12.5.2	Eigentliche Festkörper (-)	1723
12.5.3	Viskose Festkörper (-)	1723

12.5.4	Eigentliche Flüssigkeiten (-/-)	1724
12.5.5	Elastische Flüssigkeiten (-)	1724
12.6	Anwendungsorientierte Klasseneinteilung der Werkstoffe (-)	1725
12.6.1	Steife Materialien (-)	1725
12.6.2	Elastomere Materialien (-)	1727
12.6.3	Plastische Materialien (-)	1732
12.6.4	Anisotrope Materialien (-)	1733
12.7	Das Werkstoffkonzept der Mehrphasigkeit (-)	1734
12.7.1	Nichtlineare Verformung durch inhomogene Struktur	1735
12.7.2	Zähigkeit durch verformbare Füllstoffe (-)	1735
12.7.3	Verstärkung durch steife Füllstoffe (-)	1737
12.7.4	Das Füllstoff/Matrix-Interface (-)	1739
12.7.5	Nichtlineare Versteifung verformbarer Werkstoffe (-/-)	1744
12.8	Technische Konstruktions-Werkstoffe vom Typ 1 (-)	1744
12.8.1	Mikro-kristalline Metalle (-)	1744
12.8.2	Mehrphasen-Metall-Legierungen (-)	1746
12.8.3	Amorphe Polymere (-)	1747
12.8.4	Teilkristalline Polymere (-)	1748
12.8.5	Polymer-Blends (-)	1750
12.8.6	Technischer Gummi (-)	1752
12.9	Technische Konstruktions-Werkstoffe vom Typ 2 (Composites) (-)	1754
12.9.1	Materialien für Füllstoffe und Fasern (-)	1755
12.9.2	Makroskopisch isotrope Composites (-)	1757
12.9.3	Anisotrope Composites (-)	1762
12.9.4	Das 3D-Fachwerk: der Werkstoff der Zukunft? (-/-)	1773
12.10	Vergleichende Gegenüberstellung dieser Werkstoffklassen (-/-)	1774
12.11	Formgebung und Materialbearbeitung (-)	1774
12.11.1	Formgebung durch Verwendung eines Modells (-)	1775
12.11.2	Spanabhebende Formgebungs-Verfahren (-)	1776
12.11.3	Spanlose Formgebungs-Verfahren (-/-)	1778
12.11.4	Verbindungstechniken (-/-)	1778
12.11.5	Wärme-Nachbehandlung (-/-)	1778
12.11.6	Oberflächenbearbeitung (-/-)	1778
12.11.7	Verarbeitungsmöglichkeiten einiger Materialklassen (-)	1779
12.12	Haftung / Reibung / Abrieb (*)	1780
12.12.1	phänomenologische Beschreibung von Reibung und Abrieb (*)	1781
12.12.2	Abrasiver Abrieb (*)	1785
12.12.3	Adhäsion / adhäsive Reibung (-)	1786
12.13	Verfahren der materialwissenschaftlichen Charakterisierung (-)	1786
12.13.1	Experimentelle Bestimmung elastischer Konstanten (-/-)	1787
12.13.2	Differential Scanning Calorimetry (DSC) (*)	1787
12.13.3	Thermisch-mechanische Analyse (TMA) (*)	1790

12.13.4	Thermogravimetrie (TGA) (-)	1791
12.13.5	Messung der Vernetzungsdichte von Elastomeren (-/-)	1792
12.14	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1792
12.14.1	Die natürliche Spinnenseide (-/-)	1792
12.14.2	Der Mechanical Bowler (-)	1792
12.14.3	Jahreszeitspezifische Fahrzeugreifen (-/-)	1795
12.15	Aufgaben (-/-)	1795
12.16	Zahlenwerte (-/-)	1796
12.17	Literatur (-)	1797
<b>13</b>	<b>Strukturanalyse - Grundlage der chemischen Forschung (-)</b>	<b>1799</b>
13.1	Verfahren zur Trennung chemisch unterschiedlicher Substanzen (-)	1801
13.1.1	Chromatographische Trenn-Verfahren (-)	1801
13.2	Verfahren zur Aufklärung der chemischen Struktur (-)	1804
13.2.1	Spektroskopische Verfahren (-)	1805
13.2.2	Beugungs- und Streuverfahren (-)	1816
13.3	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	1821
13.4	Aufgaben (-/-)	1821
13.5	Zahlenwerte (-/-)	1821
13.6	Literatur (-)	1822
<b>14</b>	<b>Elektronik - tägliches Werkzeug des Experimentalphysikers (-)</b>	<b>1823</b>
14.1	Elektronische Systeme, Response-Funktionen (*)	1824
14.1.1	Die Topologie elektronischer Systeme (-)	1824
14.1.2	Elektronische Zweipole (*)	1826
14.1.3	Elektronische Vierpole (*)	1833
14.2	Technische Bauteile (-)	1844
14.2.1	Widerstände (*)	1844
14.2.2	Induktivitäten (*)	1848
14.2.3	Kondensatoren (*)	1851
14.2.4	Schwing-Quarze (-/-)	1855
14.2.5	Dioden (*)	1855
14.2.6	Transistoren (*)	1858
14.2.7	Integrierte Schaltkreise (ICs) (-)	1861
14.2.8	Optokoppler (-)	1862
14.2.9	Analoge Optokoppler (-/-)	1864
14.2.10	Relais (*)	1865
14.2.11	Elektronenröhren (*)	1867
14.3	Analoge Signalverarbeitung (-)	1873
14.3.1	Einfache passive Schaltungen (-/-)	1875
14.3.2	Resonante passive Schaltungen (-)	1875
14.3.3	Filterschaltungen (-)	1879

14.3.4	Der Wellenleiter (-/-)	1889
14.3.5	Der Verstärker (-)	1889
14.3.6	Die Spannungsversorgung (-)	1894
14.3.7	Elektronisches Rauschen (-)	1897
14.3.8	Analoge elektronische Ein- und Ausgabegeräte (-)	1898
14.4	Analoge Signalübertragung (-)	1900
14.4.1	Uncodierte analoge Signalübertragung (-)	1900
14.4.2	Das Konzept der Trägerfrequenz (-)	1901
14.4.3	Codierungstechniken (-)	1901
14.5	Rückgekoppelte elektronische Systeme (*)	1908
14.5.1	Der Oszillator (*)	1908
14.5.2	Der Operationsverstärker (*)	1912
14.5.3	Allgemeine Regelungstechnik (*)	1920
14.6	Digitale Signalverarbeitung (-)	1930
14.6.1	Aussagen-Logik (*)	1933
14.6.2	Gatterschaltungen (*)	1935
14.6.3	Inverter (*)	1936
14.6.4	Multivibratoren (*)	1938
14.6.5	Zeichnungssymbole für digitale Schaltungen (-)	1941
14.6.6	Typische Struktur eines elektronischen Steuergerätes (*)	1941
14.6.7	Basisstruktur eines Digitalrechners (*)	1944
14.6.8	Speicherprogrammierbare Steuerungen SPS (-/-)	1947
14.6.9	Das Bus-Konzept der Signalübertragung (-)	1948
14.6.10	Informationsverlust bei der digitalen Signalverarbeitung (-)	1949
14.6.11	Digitale elektronische Ein- und Ausgabegeräte (-/-)	1951
14.6.12	Umwandlung analoger und digitaler Signale (-/-)	1951
14.7	Störsignale (-)	1951
14.7.1	Mechanismen der Störsignaleinstreuung (-)	1952
14.7.2	Maßnahmen zur Störsignalreduzierung (*)	1953
14.8	Elektronik des täglichen Lebens (-)	1956
14.8.1	Der Telegraph / Fernschreiber (-/-)	1956
14.8.2	Der Rundfunk-Empfänger (-)	1956
14.8.3	Der Fernseh-Empfänger (-)	1961
14.8.4	Der Mobilfunk (-/-)	1967
14.8.5	Das Internet (-/-)	1967
14.9	Messverfahren der Elektronik (-)	1967
14.9.1	Das Drehspulinstrument (-)	1967
14.9.2	Das Digital-Multimeter (-)	1968
14.9.3	Frequenz- und Zeitmessung (-/-)	1969
14.9.4	Das Oszilloskop (*)	1969
14.9.5	Der Transienten-Recorder (*)	1972
14.9.6	Das Sampling-Oszilloskop (-)	1974

14.9.7	Der Lock-In-Verstärker (-)	1975
14.10	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1977
14.10.1	Ratschläge zum Schaltungsentwurf (*)	1977
14.10.2	Detail-Empfehlungen zur Störsignalreduzierung (*)	1979
14.10.3	Frequenzvergleich mit dem Oszilloskop (-)	1981
14.10.4	Optimierung eines Regelkreises (-)	1982
14.10.5	Messzeit-Optimierung bei der Frequenzanalyse (-)	1982
14.10.6	Der ALOA-Multilayer-Folienkondensator (-/-)	1983
14.10.7	Die Kybernetik und der gesunde Menschenverstand (-/-)	1983
14.10.8	Das System Volkswirtschaft (-/-)	1983
14.11	Aufgaben (-/-)	1983
14.12	Zahlenwerte (-/-)	1983
14.13	Literatur (-)	1984
<b>15</b>	<b>Anhang (-)</b>	<b>1985</b>
15.1	(Eigentlicher Anhang) (-/-)	1985
15.2	Lösungen der Aufgaben (-)	1985
15.2.1	zu Heft 2: Die besondere Denkweise des Physikers (-)	1985
15.2.2	zu Heft 3: Mechanik (-)	1988
15.2.3	zu Heft 4: Elektrostatik (-)	2004
15.2.4	zu Heft 5: Magnetostatik (-/-)	2008
15.2.5	zu Heft 6: Elektrodynamik (-/-)	2008
15.2.6	zu Heft 7: Quantenmechanik (-)	2009
15.2.7	zu Heft 8: Thermodynamik (-)	2020
15.2.8	zu Heft 9: Kristallphysik (-/-)	2032
15.2.9	zu Heft 10: Elementarteilchen, Kosmologie (-)	2032
15.2.10	zu Heft 11: Optik (-)	2033
15.2.11	zu Heft 12: Materialwissenschaft (-/-)	2036
15.2.12	zu Heft 13: Strukturanalyse (-/-)	2037
15.2.13	zu Heft 14: Elektronik (-/-)	2037
15.3	Literatur zur Physik insgesamt (-)	2037





## Heft 1

### EINLEITUNG (\*)

In den nun folgenden in dieses Lehrbuch einführenden Kapiteln werde ich erläutern, wie es zu diesem Buch gekommen ist und wie es zu benutzen ist. Diese Einleitung ist etwas umfangreicher als sonst üblich geworden, wofür ich den Leser um Nachsicht bitte. Mir schien es angebracht zu erläutern, wieso ein nicht aus dem Universitätsbetrieb stammender pensionierter Physiker auf die Idee gekommen ist, ein Physik-Lehrbuch zu schreiben, und welche Besonderheiten dieses Buch aus diesem Grund fast zwangsläufig aufweist.

Ich wünsche mir, dass der Leser beim Studium dieses Buches zumindest gelegentlich wenigstens einen Bruchteil des Vergnügens wiederfindet, das ich beim Schreiben des Textes ganz überwiegend empfunden habe.

#### 1.1 Warum habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (\*)

Den entscheidenden Anstoß zu meinem Entschluss, dieses Lehrbuch zu schreiben, gab meine Tochter Kerstin, ihr Vertrauen in meine Fähigkeit, komplexe Zusammenhänge verständlich darzustellen, und ihre Überzeugung, dass ich im Anschluss an meine berufliche Tätigkeit meine Zeit nicht nur mit Gartenarbeit (Abb. 1), Segeln und



Abb. 1 Unser Garten in Biscarrosse (Les Landes, Frankreich)

Tennis verbringen dürfe. Bei der letztgenannten Auffassung brauchte sie mich nicht erst zu überzeugen, zu ihrem Vorschlag selbst fehlte mir jedoch zunächst der Mut. Kerstin musste erst mehrmals nachfragen, bis ich endlich anfang, ein Inhaltskonzept des zu schreibenden Buches zu entwerfen. Zunächst wollte ich mich auf diejenigen

Teilgebiete der Physik beschränken, mit denen ich mich in meinem Berufsleben intensiver befasst habe, etwa die Optik und die Materialwissenschaft. Dann aber entdeckte ich die vorher nur in der Zeit meines Studiums empfundene Freude und Zufriedenheit wieder, die die intensive Auseinandersetzung mit physikalischen Zusammenhängen bewirken kann, gerade auch mit Themen, die ich mir erst wieder erarbeiten musste. Und so entstand schließlich doch ein Konzept für ein relativ umfassendes Lehrbuch der Physik. Die Situation des Pensionärs liefert mir für diese Arbeit einen Umfang an Zeit, den wohl kaum ein Lehrbuchautor zur Verfügung hat. Da ich nicht vorhabe, mit dem Ergebnis dieser Arbeit Geld zu verdienen, stehe ich auch unter keinerlei zeitlichem Zwang. Diese Einstellung führt andererseits zwangsweise dazu, dass dieses Buch b.a.w. nicht so richtig fertig und abgeschlossen sein wird.

## 1.2 Was möchte ich mit diesem Lehrbuch erreichen? (\*)

Ziel meiner Arbeit ist ein möglichst einfach verständliches Lehrbuch. Allerdings bin ich - etwa um einer vermeidlichen Verbesserung der Verständlichkeit willen - keine Zugeständnisse in Bezug auf die logische Strenge eingegangen. Ein weiteres allgemeines Anliegen von mir ist, die Zusammenhänge und Vergleichbarkeiten aufzuzeigen zwischen unterschiedlichen Teilbereichen der Physik bzw. zwischen gewissen konkreten Einzelfragen aus ganz unterschiedlichen Bereichen der Physik. Bei diesen einheitlichen Strukturen in der Physik meine ich nicht nur Vereinheitlichungen im *ganz Großen*, also z.B. die Versuche zur Vereinheitlichung der verschiedenen elementaren Wechselwirkungen. Ich denke dabei auch an konkrete Einzelprobleme, z.B. an die Analogie zwischen den Phasenübergängen eines makroskopischen thermodynamischen Systems und dem Problem der Instabilität von technischen Regelkreisen, oder an das für die unterschiedlichsten Objekte anwendbare Konzept des System-Responses. In diesen Fällen versuche ich, die diesen Problemen gemeinsame logische Struktur aufzuzeigen. Und wenn diese Gemeinsamkeit aus einem mathematischen Zusammenhang heraus resultiert, stelle ich diesen auch ausschließlich im Bereich der Mathematik dar und verzichte auf ergänzende pseudophysikalische Argumente. Schließlich versuche ich immer auch, zumindest einige Aspekte über den Nutzen und die Grenzen der Physik oder allgemein der Naturwissenschaften aufzuzeigen. Als deren Nutzen sehe ich auch an, dass ein gutes Ausmaß an wissenschaftlichen Grundkenntnissen beim Verständnis vieler Abläufe helfen kann, die uns täglich begegnen, und beim Verständnis der dabei relevanten Zusammenhänge, und zwar ohne dass man bereits ein richtiger Experte auf dem jeweiligen Gebiet sein muss. Naturwissenschaftliche Kenntnisse sind hilfreich für die Bewältigung der Alltagsprobleme und nicht nur Angelegenheit eines bestimmten elitären Zirkels. Die Grenzen jeder Wissenschaft äußern sich insbesondere darin, dass jede wissenschaftliche Analyse und Schlussfolgerung auf Näherungen basiert und auf dem begrenzten aktuellen Wissen auch der besten Experten. Daher ist jede konkrete eine Einzelfrage betreffende Schlussfolgerung - auch des bekanntesten Experten - immer eine persönliche Äußerung des sie Formulierenden und kein Faktum! Nur der

Papst verkündet Dogmen; ein Wissenschaftler, der das gleiche versucht, ist kein Wissenschaftler.

Insbesondere aber möchte ich mit diesem Buch die Freude an der Beschäftigung mit der Physik wecken. Mein Konzept habe ich versucht, auch in dem Titel zum Ausdruck zu bringen:

*Fundamente:* Ich stelle die Grundlagen der Physik dar, aber diskutiere nicht mehr Detailfragen als nötig.

*Fakten:* Ich deute dennoch die Vielfalt der auf der Physik basierenden Fakten zumindest an und setze dabei einen Schwerpunkt bei den Fakten, die einen ausgeprägten Einfluss auf das tägliche Leben und das Funktionieren unserer Gesellschaft haben.

*Offene Fragen:* Mir ist der immer wieder zu betonende Hinweis wichtig, dass keinesfalls schon alles geklärt ist in dem Sinne, dass es für die experimentellen Fakten eine von der wissenschaftlichen Gemeinschaft allgemein akzeptierte und in sich logisch konsistente Deutung gibt. Und genau so wichtig ist mir der Hinweis, dass es für jeden einzelnen sehr schwer ist, wirklich alles in diesem Sinne Geklärte auch selbst verstanden zu haben. Wir alle können viele Fragen nicht beantworten bzw. wir geben Aussagen und Deutungen von uns, die sich später bei genauerer Analyse als falsch erweisen. Dies gilt auch für Experten und deren Aussagen zu ihrem Spezialgebiet, wie jeder im Laufe seiner beruflichen Praxis schon festgestellt hat bzw. feststellen wird. Und diese Aussage gilt auch für Lehrbücher, auch für das vorliegende! Trotz all dieser Einschränkungen und Relativierungen ist es mir wichtig zu zeigen, dass man andererseits bereits mit einem fundierten physikalischen Basiswissen sehr vieles verstehen kann, auch und gerade wenn man nicht der absolute Spezialist auf dem speziell betrachteten Teilgebiet ist.

*Streifzug:* Da ich versprochen habe, keine Darstellung zu bringen, die ich nicht selbst intensiv durchdacht habe und daher glaube, verstanden zu haben, kann das daraus resultierende Buch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Dies sehe ich aber nicht als einen Nachteil an, denn mir ist es primär wichtig, die begrifflichen Probleme zu behandeln, die der Anfänger (und häufig nicht nur er) meiner Erfahrung nach typischerweise hat. Dies führt aber zwangsläufig dazu, dass ich gelegentlich Schwierigkeiten im Verständnis diskutiere, die mancher Leser in dem Moment, wo er meine Erläuterung liest, vielleicht noch gar nicht hat. Denn für das Erkennen derartiger Hürden im Verständnis ist oft bereits eine gewisse Tiefe des aktuellen Verständnisses erforderlich.

Schließlich möchte ich ganz allgemein für die gesellschaftliche Anerkennung der Naturwissenschaften werben, nicht nur in Bezug auf staatliche Förderungsmaßnahmen sondern insbesondere im ganz persönlichen Bereich. Wir erleben es täglich: Ansehen genießen in unserer Gesellschaft, insbesondere in ihrer sog. *Elite*, die Geisteswissenschaften, während die Naturwissenschaften in den Augen dieser Elite eher einem gehobenen Handwerk entsprechen, für das die Gesellschaft zu ihrem Funktionieren eine ausreichende Anzahl von Spezialisten benötigt, mit dem man sich aber nicht selbst beschäftigt. Viele sind sogar geradezu stolz darauf, von Naturwissenschaft

nichts zu verstehen. Dies war in den früheren Feudal-Gesellschaften Europas erstaunlicherweise offensichtlich nicht in dem Maße gegeben. Ein klares Anzeichen hierfür ist die Tatsache, dass anerkannte Wissenschaftler des 18. und 19. Jahrhunderts sehr oft geädelt wurden. Aus meiner Sicht bewirkt diese gesellschaftliche Unterbewertung der Naturwissenschaften nicht nur volkswirtschaftliche Nachteile, sie erzeugt auch zunehmend eine gefährliche mentale Verunsicherung unserer Gesellschaft. Wenn immer mehr Menschen einen immer größeren Teil der sie umgebenden und sie beeinflussenden (technischen) Welt nicht einmal mehr im Ansatz verstehen, fühlen sie sich diesen Zwängen und Mächten hilflos ausgeliefert. Ihre psychische Situation nähert sich paradoxerweise wieder der des vormittelalterlichen Menschen. Auch er fühlte sich ständig den ihn umgebenden und von ihm nicht verstandenen Mächten hilflos ausgeliefert, nur waren es in diesem Fall die Mächte der Natur und nicht die von den Menschen selbst geschaffene Welt. Mit dieser Kritik an der Schiefkastigkeit in der gesellschaftlichen Gewichtung von Geistes- und Naturwissenschaft stehe ich übrigens alles andere als alleine, s. z.B. [1].

### 1.3 Für wen habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (\*)

Primäre Adressaten dieses Buches sind Studenten der Physik im Hauptstudium. Wenn darüber hinaus sowohl Physiker mit einem abgeschlossenen Studium als auch Leser mit nur geringen physikalischen Vorkenntnissen aus dem einen oder anderen Teil dieses Buches einen Nutzen gewinnen können, wird mich das in besonderem Maße freuen und in meiner Arbeit bestätigen. Ich versuche, für die Darstellung eines physikalischen Zusammenhangs gerade so viel an mathematischen Hilfsmitteln zu verwenden, wie zu seiner logisch korrekten und ausreichend fundierten Beschreibung meiner Einschätzung nach angebracht oder gar erforderlich ist, nicht mehr, aber auch nicht weniger. Das aus diesem Konzept als erforderlich resultierende mathematische Rüstzeug wird als bekannt vorausgesetzt. Damit der Leser prüfen kann, welcher Umfang damit jeweils gemeint ist, und um ihm eine eventuell nötige Auffrischung bzw. Vertiefung zu erleichtern, habe ich an den entsprechenden Stellen des Buches einen Textblock eingeschoben, der die in den nachfolgenden physikalischen Kapiteln erforderlichen mathematischen Kenntnisse in stark komprimierter Form darstellt.

### 1.4 Nach welchen Kriterien habe ich die Inhalte ausgewählt? (\*)

Bei der Auswahl des behandelten Stoffs habe ich mich weniger um eine wie auch immer definierte vollständige Darstellung der experimentellen Phänomene und ihrer theoretischen Deutung bemüht. Wichtiger ist mir:

1. Die Darstellung der allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten, des *roten Fadens* der Physik.

2. Die ausreichend detaillierte Behandlung derjenigen Bereiche der Physik, bei denen der Anfänger nach meiner Einschätzung und Erfahrung besonders oft besondere Verständnisprobleme hat.
3. Die Einbettung der physikalischen Fakten und Methoden in die aktuelle Situation unserer Gesellschaft. D.h. ich möchte zeigen, dass die Physik keine abseits der Realität angesiedelte Wissenschaft darstellt, sondern in unserer Gesellschaft allgegenwärtig ist, dass sie unverzichtbar ist zum Verständnis dieser Gesellschaft, dass sie also ein wichtiger Teil unserer aktuellen sog. Allgemeinbildung ist bzw. sein müsste\*.

Eine direkte Folge des angestrebten Bezugs zur gesellschaftlichen Realität ist auch die Aufnahme einiger bereits sehr technisch orientierter Kapitel in dieses Buch, also z.B. das Kapitel Farbmessung und das Heft 10.1.1 (Elektronik).

Außerdem hat mein persönlicher beruflicher Weg bei der Stoffauswahl ebenfalls seine Spuren hinterlassen. Das Heft 13 (Strukturanalyse) spielt ebenfalls eine besondere Rolle. Sein Inhalt passt eigentlich eher in ein Lehrbuch der Chemie oder der Physikalischen Chemie. Ich habe es mit aufgenommen, einfach weil dieses Arbeitsgebiet für sehr viele Physiker das Feld ihrer beruflichen Existenz bildet.

Ergebnis dieses Auswahlkonzeptes ist ein Lehrbuch, das weniger als Nachschlagewerk geeignet ist, sondern dem Leser seinen Nutzen insbesondere im gemeinsamen Studium mit anderen, umfangreicheren Werken erbringen kann. Es enthält in jedem Fall nur Darstellungen, die ich in einer Struktur formuliert habe, die aus meinen persönlichen didaktischen Vorstellungen heraus resultiert. Und dieser Darstellung ging immer ein intensives Studium voraus, in dem ich mir selbst diese Zusammenhänge wieder (oder auch erstmals) erarbeitet habe. M.a.W. ich habe keine einzige Zeile irgendwo abgeschrieben. Daher ist es nicht überraschend, dass dieses Buch noch nicht fertiggestellt ist, obwohl ich bereits seit mehreren Jahren daran arbeite. Überdies sehe ich das Buch immer als eine Einheit, innerhalb der gerade die logischen Zusammenhänge und Analogien zwischen Einzelheiten aus sehr unterschiedlichen Teilbereichen der Physik hervorgehoben werden sollen. Daher schreibe ich es auch nicht in chronologischer Folge Kapitel für Kapitel, sondern arbeite immer nahezu gleichzeitig an mehreren Kapiteln, die daher auch alle noch unvollständig sind, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Oft führen auch die bei der Erarbeitung eines Kapitels von mir gewonnenen Erkenntnisse dazu, dass ich ein ganz anderes Kapitel wieder überarbeite. Das gesamte Buch ist daher noch im Stadium einer intensiven Entwicklung und Verbesserung. Bei dieser Vorgehensweise orientiere ich mich an dem Wahlspruch der Bergwanderer, der angeblich auf den chinesischen Philosophen Konfuzius (551 - 479 v.Chr.) zurückgeht:

*Der Weg ist das Ziel!*

---

\*Beispiel gebend für die oft deutlich anders gewichtete Sichtweise in anderen Ländern war für mich ein Wandspruch, den ich an der Mauer zu einer allgemeinbildenden Schule in einem kleinen Dorf auf der Karibikinsel St. Lucia las: *Mathematics is all around us.*

Aus naheliegenden Gründen habe ich mich entschlossen, den aktuellen Stand dieses Buches dennoch bereits jetzt öffentlich zugänglich zu machen. Es versteht sich von selbst, dass ich parallel dazu die Arbeit an seiner Vervollständigung fortsetze.

### 1.5 Hinweise zum Umgang mit diesem Lehrbuch (\*)

Formal-hierarchisch ist das Lehrbuch in 4 Ebenen gegliedert, die ich als *Heft*, *Kapitel*, *Abschnitt* und *Absatz* bezeichne und bei Verweisen auch so nenne, also z.B. das Kapitel 3.2 (*Geometrische Mechanik*) oder den Abschnitt 7.4.8 (*Verknüpfung von Operatoren*). Die 4. Ebene der *Absätze* ist im Inhaltsverzeichnis nicht mehr aufgeführt. In Verweisen gebe ich in diesem Fall unmittelbar die Seitenzahl des Absatzbeginns an.

Ein wissenschaftliches Lehrbuch liest man i.a. nicht wie einen Kriminalroman, also am Anfang beginnend Seite für Seite bis zum Ende. Vielmehr wird man häufig ein bestimmtes Detail nachlesen wollen. Daher habe ich mich bemüht, die einzelnen Hefte dieses Buches so zu gestalten, dass sie weitgehend unabhängig voneinander studiert werden können. Dem sind natürlich Grenzen gesetzt, sofern Wiederholungen weitgehend vermieden werden sollen. Ich habe mich bemüht, durch eine große Anzahl von Verweisen dem Leser zu helfen, bei Bedarf die Stelle zu finden, an der er die Erklärung für die gerade benutzte Aussage oder für den verwendeten Begriff findet.

Ich beginne mit einer Darstellung der besonderen *Denkweise* des Physikers (Heft 2), seiner Art der logischen Strukturierung von Problemen, der für die Physik zentrale Bedeutung des Experimentes, seines Umgangs mit der Mathematik. Die daran anschließende Strukturierung entspricht im wesentlichen derjenigen, die bei den meisten Physikbüchern anzufinden ist: Den Einstieg bildet die (klassische) *Mechanik* (Heft 3), gefolgt von der *Elektrodynamik*, aufgeteilt in den stationären Teil (Heft 4 *Elektrostatik* und Heft 5 *Magnetostatik*) und den von den zeitlichen Veränderungen der elektrischen und magnetischen Feldgrößen dominierten Teil der Theorie, der eigentlichen *Elektrodynamik* (Heft 6). Die dann folgende *Quantenmechanik* (Heft 7) beschränkt sich in besonderem Maße auf die zum Verständnis ihrer Grundstruktur erforderlichen Fakten, während ich von den damit möglichen Berechnungen konkreter Systeme nur einige wenige, von mir als typisch angesehene Beispiele anführe. Vergleichsweise umfangreich habe ich das dann folgende Heft 8 der *Thermodynamik* gestaltet. Ich hoffe, den Leser so über die in diesem Bereich besonders häufig auftretenden Barrieren des Verständnisses führen zu können. Das Heft 9 *Kristallphysik* behandelt die Inhalte, die man i.a. in den mit *Festkörperphysik* betitelten Lehrbüchern findet, also das Verhalten von Systemen mit einer 3-dimensional regelmäßigen Anordnung identischer Bausteine (Atome, Moleküle oder Ionen). Daran schließt sich ein besonders kompakt gestaltetes Heft über die Physik der Elementarteilchen und die Kosmologie an. Obwohl in diesen beiden Teilbereichen von Objekten die Rede sein wird, deren geometrische Abmessungen sich in extrem weit aus einander liegenden Größenordnungen bewegen, wachsen diese beiden Bereiche durch die aktuellen Forschungsergebnisse immer enger zusammen. Im Heft 11 *Optik* bilden

geometrisch-optische Themen und Probleme der Strahlungsmesstechnik und des optischen Gerätebaus und der wichtigsten technischen Anwendungen einschließlich der Farbmeterik einen eindeutigen Schwerpunkt. Die Eigenschaften eines makroskopischen Festkörpers, die sich erst ergeben, wenn man zusätzlich zu dem Verhalten des im Heft 9 (*Kristallphysik*) behandelten idealisierten Systems den von dieser idealisierten Struktur abweichenden realen Aufbau berücksichtigt, stelle ich im Heft 12 *Materialwissenschaft* dar. Diesem schließt sich das Heft 13 *Strukturanalyse* an, dessen Inhalt genau so gut in ein Lehrbuch der Chemie passen würde. Den Abschluss bildet das in besonderem Maße an den Experimentalphysiker adressierte Heft 10.1.1 *Elektronik*. In dem sich daran anschließenden Heft 15 *Anhang* findet der Leser insbesondere die Lösungen zu den in den voraus gegangenen Heften gestellten Aufgaben sowie einige Literatur-Empfehlungen zur Physik insgesamt. Am Ende des Lehrbuchs findet der Leser ein umfassendes Stichwortverzeichnis mit aktuell (Stand Mitte 2008) nahezu 1000 Einträgen.

Zwangsläufige Folge dieser Strukturierung ist, dass ich insbesondere in den Heften 4 (*Elektrostatik*) und 5 (*Magnetostatik*) Begriffe und Fakten verwenden muss, die erst im Heft 8 (*Thermodynamik*) behandelt werden. Diese Inkonsequenz im Aufbau habe ich hingenommen, um in der Quantenmechanik die Elektrodynamik verwenden zu können, und um andererseits die Thermodynamik auf der Quantenmechanik aufbauen zu können. Die Alternative wäre gewesen, die Elektrostatik und Magnetostatik aufzuteilen. Ich habe es für übertrieben gehalten, dies ausschließlich um der logischen Strenge im Aufbau willen zu tun. Aus einer verwandten Überlegung heraus habe ich die Behandlung der makroskopischen, aber dennoch von quantenmechanischen Effekten dominierten Systeme (z.B. Supraleiter, Superfluide) mit in das Heft 7 Quantenmechanik aufgenommen, obwohl auch in diesem Falle Begriffe und Fakten der Thermodynamik vorweg genommen werden müssen.

Jedes Heft beginnt mit der Darlegung der jeweiligen theoretischen Grundlagen und verzichtet zunächst weitgehend auf eine Vertiefung dieser Zusammenhänge durch die Behandlung von Anwendungsbeispielen. Im Anschluss daran folgt jeweils ein Kapitel, das Beispiele aus (oder zumindest nahe) dem täglichen Leben behandelt, die überwiegend durch diesen Teil der Physik bestimmt sind. Durch diese Gliederung will ich die für uns alle geltende Relevanz physikalischer Gesetzmäßigkeiten unterstreichen. Den Abschluss eines jede Heftes bilden folgende Kapitel:

- Eine Zusammenstellung von *Zahlenwerten*, die zum Verständnis der vorher behandelten Fakten und insbesondere für den konkreten Umgang mit ihnen hilfreich sind. Der Leser findet hier daher nicht nur die zu diesem Heft gehörenden Naturkonstanten und Umrechnungsfaktoren, sondern auch typische Zahlenwerte, die man kennen sollte oder die zumindestens hilfreich sind, um sich in diesem Gebiet und/oder der realen Welt zurecht zu finden.
- Ein Kapitel *Tipps, Tricks und Spezialitäten*. Hier behandle ich zum einen persönliche Erfahrungen, die bereits so spezifisch sind, dass sie im allgemeinen

Text eines Lehrbuchs eher unangemessen wären, die aber dem Lernenden bei der Vertiefung seiner Kenntnisse und dem Experimentator bei seiner konkreten Arbeit (hoffentlich) helfen können. Zum anderen schildere ich Detailfakten des jeweiligen Gebietes, die ich persönlich als für das allgemeine Verständnis durchaus hilfreich ansehe, die aber für das weitere Studium (zunächst) nicht unbedingt nötig sind. Teilweise sind dies auch Details mit einem besonderen Unterhaltungswert.

- Ein Satz von *Aufgaben*. Die zu ihrer Bearbeitung erforderlichen Zahlenwerte und Materialparameter sind jeweils im Aufgabentext angegeben, es sei denn, sie wurden bereits in eines der *Zahlenwerte*-Kapitel aufgenommen. Primärer Zweck dieser Aufgaben ist natürlich die Übung des Lesers im Umgang mit der vermittelten Materie. Gleichzeitig ergibt sich eine Vertiefung der im Haupttext gebrachten Inhalte und damit eine Beschränkung des Umfangs des Hauptteils. Oft führe ich mit Absicht Beispiele an, die den Inhalt des Hauptteils mit der gesellschaftlichen Realität, vorzugsweise mit Erfahrungen des täglichen Lebens verknüpfen. Nicht wenige Aufgaben haben zum Ziel, dem Leser zu zeigen, wie weit er bereits durch eigene Arbeit und eigenes Nachdenken in aktuelle Fragestellungen der Physik eindringen kann und zwar bereits mit dem Wissen, das er sich im Rahmen dieses Lehrbuches hat erarbeiten können. Die Lösungen dieser Aufgaben habe ich an das Ende des Buches in ein separates Kapitel gestellt, damit der Leser nicht zu schnell in die Versuchung kommt, im Anschluss an den Aufgabentext auch die Lösung gleich mit zu lesen.
- Einige *Literaturangaben*. Dieses sind zum einen die Originalpublikationen von für die Weiterentwicklung der Physik wichtig gewesenen Experimenten oder Theorieansätzen. Denn ich halte es für wichtig, dass der Student sich möglichst früh an das Studium von Originalliteratur gewöhnt. Außerdem bietet einem das Studium älterer Originalliteratur sehr oft erstaunliche wissenschaftshistorische Einblicke. Zum anderen zitiere ich jeweils einige Lehrbücher, die ich persönlich kenne und deren Studium ich in Bezug auf das jeweilige Heft als empfehlenswert ansehe. Einige von mir als empfehlenswert angesehene allgemeine Lehrbücher der Physik habe ich in einem separaten Kapitel am Ende des Buches zusammengestellt. Ich werde mich vermehrt darum bemühen, zu jeder Literaturangabe auch den doi-Code (digital object identifier) zu nennen. Oft hat der Leser hierdurch die Möglichkeit, die zitierte Arbeit an seinem Computer unmittelbar über seinen Internet-Browser aufzurufen.

Die in den physikalischen Text eingestreuten mathematischen Blöcke umfassen als ganzes genommen weitgehend den Stoff einer anspruchsvollen Vorlesung *Mathematik für Physiker*. Dieser Text kann dennoch nicht dem Anspruch genügen, der an ein entsprechendes Lehrbuch zu stellen ist. Dafür ist die Darstellung zu stark komprimiert. Wie bereits erläutert, ist dieser Text als Hilfe zur Auffrischung bereits vorhandener Kenntnisse gedacht. Durch die Aufteilung in einzelne Blöcke hoffe



ich, den Leser zu motivieren, diese jeweils auch wirklich zu lesen. Die Thermodynamik benötigt in der von mir gewählten Darstellung für ihre logisch strenge Entwicklung unbedingt die Grundtatsachen der Quantenmechanik. Sie kann dennoch ohne weiteres **vor** der Quantenmechanik studiert werden, wenn nur der Leser eben diese (wenigen) Grundtatsachen der Quantenmechanik als gegeben hinnimmt. Andererseits macht es wenig Sinn, die Kristallphysik vor der Quantenmechanik zu lesen. Die übrigen Hefte sollten in der Tat weitgehend unabhängig voneinander lesbar sein. Das Heft 2 spielt eine Sonderrolle. Der ungeduldige Leser kann es überspringen, ohne befürchten zu müssen, dadurch beim Studium anderer Hefte in konkrete Verständnisprobleme zu geraten. Es ist meiner Einschätzung nach dennoch nicht etwa überflüssig, sondern vielmehr gut geeignet, dem Anfänger den Einstieg in die Physik zu erleichtern. Ich empfehle dem Leser daher, es auch wirklich als erstes zu lesen.

Zur Darstellung der mathematischen Relationen benutze ich die allgemein üblichen Symbole, ohne diese im Text nochmals zu erklären. Sie sind im Kapitel 1.7 (*Kennzeichnungen*) vollzählig aufgeführt und in Stichworten erläutert, zusammen mit den zur Kennzeichnung der physikalischen Größen verwendeten Buchstaben. Im Kapitel 1.8 (*Abkürzungen*) sind sämtliche im Text benutzten Abkürzungen wie o.B.d.A. aufgeführt und ebenso die für die verschiedenen physikalischen Einheiten benutzten Kürzel. Die Aufzählung innerhalb dieser beiden Kapitel erfolgt in der Reihenfolge der jeweils erstmaligen Verwendung beginnend ab Heft 3 (*Mechanik*). Der Konvention der meisten Lehrbücher folgend benutze ich bei der Textgestaltung überwiegend das Pronom *wir*. Dies bringt meiner Auffassung nach zum Ausdruck, dass der Autor **gemeinsam** mit dem Leser auf dem Wege der Erkenntnis fortschreiten möchte, und dass oft der Weg für den Autor (beim Schreiben des Textes) ähnlich steinig gewesen ist wie nun für den Leser (beim Lesen). Gleichzeitig vermittelt diese Form aber auch den Anspruch, dass hier eine unbestreitbare Tatsache vermittelt wird, oder besser - weil es in der Naturwissenschaft keine unbestreitbaren Tatsachen gibt - dass der Text mit der *aktuellen Lehrmeinung* übereinstimmt, also mit dem aktuellen Stand der experimentellen Ergebnisse und ihrer theoretischen Deutung. Der Leser wird feststellen, dass ich gelegentlich von dem *wir* zum *ich* übergehe. Ich bringe damit zum Ausdruck, dass die nun präsentierte Interpretation in besonderem Maße meiner persönlichen Sicht und Einschätzung entspricht, und dass u.U. in anderen Lehrbüchern signifikant andere Interpretationen gefunden werden können.

Ich unterscheide strikt zwischen *Definitionen*, *Axiomen* und *Sätzen*, zähle diese aber gemeinsam und durchgehend durch das gesamte Buch weiter. Die Zählweise der Abbildungen dagegen beginnt in jedem Heft von neuem, ebenso die der Aufgaben und der auf das jeweilige Heft bezogenen Literatur-Zitate. Daher gebe ich bei Verweisen auf Abbildungen oder Literatur-Zitate aus anderen Heften die Nr. dieses Heftes mit an. Die Zählung der Gleichungen beginnt ebenfalls in jedem Heft von neuem, allerdings wird bei jeder Kennzeichnung und ebenso bei jedem Verweis die Nr. des Heftes der lfd. Nr. der Gleichung vorangestellt. Gl. 3.25 ist demnach die 25. Gl. im Heft 3. Bei Wissenschaftlern, die ich namentlich zitiere, gebe ich bei deren erster

Nennung auch deren bibliographische Daten (Geburtstag und -ort, aktueller Wohnort bzw. Sterbetag und -ort) an. Diese Daten sollen dem Leser einen gewissen Eindruck vermitteln, zu welcher Zeit die jeweiligen entscheidenden Beiträge zum Fortschritt in der Physik geleistet wurden und aus welchem Land die Wissenschaftler stammten bzw. in welchem Land sie (vermutlich) arbeiteten, als sie diese Leistung erbrachten.

Die Beschreibung kommerziell erhältlicher technischer Elemente z.B. aus dem Bereich der Optik oder Elektronik habe ich nach folgendem Schema gestaltet:

1. gewollte Funktion/Aufgabe;
2. jeweils ausgenutztes physikalisches Funktionsprinzip;
3. die wichtigsten Eigenschaften;
4. Auswahlkriterien, häufig aufgetrennt in die für technische Anwendung erforderlichen Spezifikationen und in die für technische Anwendungen hilfreichen, aber evtl. nicht unbedingt erforderlichen Qualitätsmerkmale;
5. typische Anwendungen;
6. Status quo und Perspektiven der technischen Entwicklung.

Allerdings werden nicht unbedingt in jedem Einzelfall alle diese Aspekte auch wirklich diskutiert.

Wie in Kapitel 1.4 erläutert ist das Buch noch unvollständig und wird es noch eine Weile bleiben, obwohl ich ständig an seiner Komplettierung arbeite. Ich habe aus diesem Grund sämtliche Hefte, Kapitel und Abschnitte im Inhaltsverzeichnis mit einer Markierung versehen, die den Grad der Vollständigkeit jeder dieser Einheiten andeutet. Dabei bezieht sich diese Markierung jeweils pauschal auf den durchschnittlichen Zustand des gesamten Textes dieser Einheit einschließlich der hierarchisch darunter folgenden Einheiten. Deren Grad der Vollständigkeit ist zusätzlich auch noch jeweils separat angegeben. Es bedeutet:

(\*) : Die Texteinheit hat einen lesenswerten Umfang erreicht. Die wichtigsten Fakten sind weitgehend vollständig dargestellt.

(-) : Die Texteinheit enthält bereits einige zusammenhängende, daher auch lesenswerte Textpassagen, aber auch noch große Lücken.

(-/-) : Die Texteinheit besteht z.Zt. überwiegend aus Stichworten, ist also als Hilfe beim Studium noch nicht geeignet.

Einheiten ohne Markierung betrachte ich als weitgehend vollständig; sie können dennoch einige Lücken enthalten, die dann mit einer in den Text integrierten Markierung (XXX) versehen sind.

In jedem Fall habe ich eine Stelle im laufenden Text, die ich als noch nicht vollständig oder als in ihrer Richtigkeit noch nicht ausreichend abgesichert ansehe, mit dieser Markierung (XXX) versehen.

Dieses Lehrbuch enthält mit Sicherheit noch eine Vielzahl von Schreibfehlern, missverständlichen Formulierungen und sachlichen Fehlern. Ich fordere meine Leser auf, mir derartige Fehler und Unzulänglichkeiten mitzuteilen. Derartige Rückmeldungen sind für mich eine Bestätigung meiner bisherigen Arbeit und eine starke Motivierung, diese fortzusetzen.

## 1.6 Danksagungen (\*)

Danken möchte ich zunächst meinen Lehrern, die mir in den verschiedenen Phasen meines Lebens die Physik näher gebracht und mir geholfen haben, die Freude an der Auseinandersetzung mit physikalischen Problemen zu entdecken und zu bewahren. Aus meiner Studienzeit an der *Physikalisch Technischen Lehranstalt* in Lübeck-Schlutup nenne ich insbesondere den Gründer und jahrzehntelangen Leiter dieser Ingenieurschule (später Fachhochschule) von herausragendem Niveau, Prof. Dr. Helmut Harms, von dessen mit Energie und Scharm präsentierten Mathematik-Vorlesungen ich heute noch profitiere, und Dr. Fritz Klutke, der mich als erster lehrte, experimentell-wissenschaftlich zu arbeiten. Während meiner Zeit als Student und Assistent an der Universität Karlsruhe (TH) prägten mich in besonderem Maße Prof. Dr. Gottfried Falk, dessen Einfluss auf dieses Buch insbesondere im Heft Thermodynamik offensichtlich, aber keinesfalls hierauf beschränkt geblieben ist, Prof. Dr. Wolfgang Ruppel, der mich während meiner gesamten Karlsruher Zeit in besonderem Maße gefördert hat, und Prof. Dr. Werner Buckel, dessen Fähigkeit, den Kern einer wissenschaftlichen Fragestellung oder Aussage auf einen Satz zu komprimieren, für mich bis heute ein von mir leider niemals erreichtes Vorbild geblieben ist.

Während der verschiedenen Phasen meiner beruflichen Tätigkeit in der chemischen Industrie lernte ich insbesondere von Dr. Gerhard Gässler, der mich durch learning-by-doing zu einem qualifizierten Elektronik-Ingenieur weitergebildet hat, und von Dr. Konrad Bunge, von dem ich unendlich viel über geometrische Optik und optische Strahlungsmessung gelernt habe, aber auch und insbesondere eine nüchterne und nicht voreilig euphorische Diskussion realer wissenschaftlich-technischer Aufgabenstellungen und Projekte. Nicht zuletzt nenne ich meine Kollegen Dr. Leo Morbitzer und Dr. Ulrich Eisele, durch deren unermüdlige Diskussionsbereitschaft ich die Chance hatte, ohne große Umwege einen fundierten Einblick in die Materialwissenschaft der Polymere zu erhalten.

Des öfteren habe ich Unternehmen um Informationen und Unterlagen über ihre Produkte gebeten, weil ich diese für dieses Lehrbuch verwenden wollte. Dabei bin ich ganz überwiegend auf Verständnis und großzügige Hilfsbereitschaft gestoßen. Hierfür möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken. Stellvertretend für viele weitere Unternehmen nenne ich die Firmen Perkin Elmer LAS GmbH in Rodgau-Jügesheim und Stemmer Imaging GmbH in Puchheim. Der nun vorliegende Text ist nicht zuletzt maßgeblich durch die intensiven inhaltlichen Diskussionen entstanden,

die ich mit meinen als Lektoren fungierenden fachkundigen Verwandten, Freunden und Arbeitskollegen geführt habe: mit Burkhard Franke, Kerstin und Volker Jacobsen, Günter Harms, Eberhard Poske, Hans Schürfeld, Hans Schlichting, Siegfried Schönwolff, Wolfgang Weiner und vielen weiteren.

Auf die besondere Bedeutung meiner Tochter Kerstin für das Zustandekommen dieses Buches bin ich bereits eingegangen. Ein ganz besonderer Dank gilt aber auch meiner Frau Edith, die meine ständige Arbeit an diesem Buch nicht nur ohne Klagen hingenommen hat, sondern mich hierin jederzeit bestärkt hat, einfach weil sie gesehen hat, welche Freude mir diese Arbeit bereitet hat und immer noch bereitet.



, im August 2005

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Weiner', with a long horizontal stroke extending to the right.

**1.7 Kennzeichnungen v. Größen u. Verknüpfungen (-)****zu Heft 2 Die besondere Denkweise des Physikers**

$[X]$  : physikalische Dimension der Größe  $X$

$\log x$  : Logarithmus von  $x$  zur Basis  $e = 2,718281828\dots$

als Unterscheidung hierzu z.B.:

$\log_{10} x$  : Logarithmus von  $x$  zur Basis 10

$\delta(x)$  : Diracsche  $\delta$ -Funktion

$z$  : Höhen-Koordinate senkrecht zur Erdoberfläche

**zu Heft 3 Mechanik**

$\vec{P}$  : beliebiger Vektor, definiert über den 3D-Anschauungsraum

$\vec{P}_1 * \vec{P}_2$  : Skalarprodukt 2-er Vektoren, definiert über dem 3D-Anschauungsraum

$\mathbf{M}, \mathbf{T}, \mathbf{P}$  : Kennzeichnung von Matrizen durch fette Großbuchstaben

$\mathbf{M}_{N,M}$  : Matrix mit  $N$  Zeilen u.  $M$  Spalten

$\det(\mathbf{M}) = |\mathbf{M}|$  : Determinante der quadratischen Matrix  $\mathbf{M}$

$\mathbf{M}_1 \bullet \mathbf{M}_2$  : Multiplikation der Matrizen  $\mathbf{M}_1$  und  $\mathbf{M}_2$

$\zeta_i^{(x)}$  : Richtungskosinus der Richtung  $i$  bzgl. der  $x$ -Achse

$\mathbf{A}, \mathbf{B}$  : Kennzeichnung von Mengen durch fette Großbuchstaben

$\mathbf{M}$  : Grundmenge

$\mathbf{U}$  : Untermenge

$\mathbf{0}$  : Nullmenge

$\{\mathbf{A}\}$  : Menge der A-Mengen

$\{X_1, X_2, \dots\}$  : Die aus den Elementen  $X_1, X_2, \dots$  bestehende Menge

$Z_{\mathfrak{M}}$  : Anzahl der Elemente der im Subscript beschriebenen Menge  $\mathfrak{M}$

$X \in \mathbf{A}$  :  $X$  ist Element von  $\mathbf{A}$

$\mathbf{A} \subset \mathbf{U}$  :  $\mathbf{A}$  ist enthalten in  $\mathbf{U}$

$\exists X$  : Es existiert mindestens 1 Element  $X$

$\exists_1 X$  : Es existiert genau 1 Element  $X$

$\forall$  : (Aussage) gilt für alle (Elementspezifikation)

$\cup$  : Vereinigungsoperation

$\cap$  : Durchschnittsoperation

$\overline{\mathbf{A}}$  : Komplementmenge zu  $\mathbf{A}$

$\check{\mathbf{N}}$  : Menge der natürlichen Zahlen

$\hat{\mathbf{G}}$  : Menge der ganzen Zahlen

$\mathcal{A}$  : logische Aussage

$a \doteq b$  :  $b$  ist per Definition gleich  $a$

$\check{\mathbf{R}}$  : Menge der rationalen Zahlen

$\mathbb{R}^1$  : Körper der reellen Zahlen

$\hat{\mathbf{C}}$  : Körper der komplexen Zahlen

$\infty$  : Unendlich

$n!$  :  $n$  Fakultät

$e$  : Basis der natürlichen Logarithmen

$(x_n)$  : Folge aus den Zahlen  $x_n$

$\lim(x_n)$  : Grenzwert einer Zahlenfolge

$\sup(A)$  : Supremum der Zahlenmenge  $A$

$\inf(A)$  : Infimum der Zahlenmenge  $A$

$i$  : Basisvektor der imaginären Zahlen

$[a, b]$  : abgeschlossenes Intervall von  $a$  nach  $b$

$(a, b)$  : offenes Intervall von  $a$  nach  $b$

$[a, b)$  : halboffenes Intervall von  $a$  nach  $b$

$\max\{x_i\}$  : Maximum einer Menge von Zahlen

$\min\{x_i\}$  : Minimum einer Menge von Zahlen

$\delta X$  : infinitesimale Änderung der Größe  $X$

$\Delta X$  : endliche Änderung der Größe  $X$

$\mathbb{R}^2$  : Menge der geordneten Paare von reellen Zahlen  $(x, y)$

$\mathbb{R}^3$  : Menge der geordneten Tripel von reellen Zahlen  $(x, y, z)$

$\vec{P}$  : vektorielle Größe  $\vec{P} = (P_x; P_y; P_z)$

$\vec{r}, \vec{v}$  : Kennzeichnung von Vektoren auch durch Kleinbuchstaben mit Vektorpfeil

$\vec{r}$  : Ortsvektor

$r = \|\vec{r}\|$  : Betrag des Vektors  $\vec{r}$

$(r, \varphi, \vartheta)$  : Koordinaten des räumlichen Polarkoordinatensystems

$R$  : (mittlerer) Radius eines (annähernd) kugelförmigen Objektes

$D$  : (mittlerer) Durchmesser eines (annähernd) kugelförmigen Objektes

$\vec{a} \times \vec{b}$  : Vektorprodukt der Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$

$\vec{a} * \vec{b} \equiv \langle \vec{a} | \vec{b} \rangle$  : Skalarprodukt der Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$

$J^{(X)}$  : skalarer Strom der extensiven Größe  $X$

$J^{(E)}$  : Energiestrom (=Leistung)

$\vec{j}^{(X)}$  : Stromdichte der extensiven Größe  $X$

$\kappa^{(X)}(\vec{r})$  : Quellendichte der kontinuierlich verteilten Größe  $X$

$\nabla$  : Nabla-Operator

$\Delta$  : Laplace-Operator

$\vec{v}$  : Lineargeschwindigkeit

$\vec{b}$  : Linearbeschleunigung

$t$  : Zeitkoordinate

$\alpha, \beta, \gamma$  : Kennzeichnung von ebenen Winkeln durch griechische Kleinbuchstaben

$\vec{\omega}$  : Winkelgeschwindigkeit

$\vec{\varepsilon}$  : Winkelbeschleunigung

$T$  : Schwingungszeit

$f$  : Frequenz

$\omega$  : Kreisfrequenz

$d$  : Entfernung eines Objektes von einem Referenzpunkt

$D$  : Durchmesser eines (nahezu kreisförmigen) Objektes  
 $p$  : große Halbachse einer Ellipse  
 $q$  : kleine Halbachse einer Ellipse  
 $T_b$  : Umlaufzeit einer Bahnbewegung  
 $T_r$  : Umlaufzeit einer Rotation  
 $Q$  : verallgemeinerte Ladung  
 $Y$  : verallgemeinerte Spannung einer verallgemeinerten Ladung  
 $M$  : träge Masse  
 $M^*$  : schwere Masse  
 $\gamma$  : Gravitationskonstante  
 $m$  : volumenbezogene Dichte der trägen Masse  
 $m^*$  : volumenbezogene Dichte der schweren Masse  
 $c_0$  : Vakuum-Lichtgeschwindigkeit  
 $\{\vec{r}\}$  : zur Kennzeichnung der Ortsvektoren  $\vec{r}$  benutztes Koordinatensystem  
 $X$  : allgemeine Kennzeichnung einer extensiven Variablen  
 $\xi$  : allgemeine Kennzeichnung einer intensiven Variablen  
 $E$  : Energie  
 $\vec{P}$  : Impuls  
 $M$  : träge Masse  
 $\vec{L}$  : Drehimpuls  
 $\vec{F}$  : Kraft  
 $V$  : Volumen  
 $R_{Sch}$  : Schwarzschildradius einer lokalisierten Masse  
 $\Xi$  : verallgemeinerte Ladung  
 $\lambda$  : Schnellaufzahl (e. WKA)

#### zu Heft 4 Elektrostatik

$i$ : Grundeinheit der imaginären Zahlen  
 $z$ : komplexe Zahl  
 $z^*$ : die zu  $z$  konjugiert komplexe Zahl  
 $\text{Re}(z)$ : Realteil der komplexen Zahl  $z$   
 $\text{Im}(z)$ : Imaginärteil der komplexen Zahl  $z$   
 $Q_0$ : Elementarladung  
 $\chi$ : verallgemeinerte Suszeptibilität eines Systems mit linearem Response  
 $\chi(\omega)$ : komplexwertige Response-Funktion eines Systems mit frequenzabhängigem linearen Response  
 $\chi'(\omega)$ : Realteil von  $\chi(\omega)$   
 $\chi''(\omega)$ : Imaginärteil von  $\chi(\omega)$   
 $Q$  : elektrische Ladung  
 $U$  : elektrisches Potenzial, elektrische Spannung  
 $J^{(Q)}, J$ : elektrische Stromstärke

$C$ : elektrische Kapazität  
 $\varepsilon_0$ : Dielektrizitätskonstante des Vakuums  
 $\varepsilon_r$ : relative Dielektrizitätskonstante eines Materials  
 $\vec{\mathcal{E}}^Q, \vec{\mathcal{E}}$ : elektrische Feldstärke  
 $\vec{P}$ : Polarisierung  
 $\vec{D}$ : dielektrische Verschiebung  
 $\varepsilon_r(\omega)$ : dielektrische Funktion eines Materials  
 $\sigma$ : spezifische elektrische Leitfähigkeit  
 $l_D$ : Dicke der Raumladungsschicht  
 $\mathcal{R}$ : Regelfaktor einer Schaltung z. Spannungsstabilisierung

### zu Heft 5 Magnetostatik

$\vec{B}$ : magnetische Induktion  
 $\vec{H}$ : magnetische Feldstärke  
 $\vec{M}$ : magnetisches Moment  
 $\mu_0$ : magnetische Permeabilität des Vakuums  
 $\mu_r$ : relative magnetische Permeabilität eines Materials  
 $\Phi$ : magnetischer Fluss

(XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene weitere Auflistung ist noch nicht verfügbar)

### zu Heft 6 Elektrodynamik

$L$ : Induktivität  
 $\vec{A}(\vec{r}, t)$ : Vektorpotenzial des elektromagnetischen Feldes  
 $\varphi(\vec{r}, t)$ : Skalarpotenzial des elektromagnetischen Feldes  
 $\mathcal{A}$ : 1-fach zusammenhängende Fläche im  $\mathbb{R}^3$

(XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene weitere Auflistung ist noch nicht verfügbar)

### zu Heft 7 Quantenmechanik

$g$ : Anzahl der Zustände  
 $\psi(\vec{r})$ : Ortsdarstellung eines quantenmechanischen Zustands  
 $|k\rangle$ : allgemeine unspezifische Darstellung eines quantenmechanischen Zustands als *ket*  
 $\mathbf{P}$ : Operator über einem Vektorraum  
 $P$ : Wert des Operators  $\mathbf{P}$  in einem Zustand  $\mathbf{1}$ : Einheitsoperator  
 $\mathbf{H}$ : Hamilton-Operator, identisch mit dem Energie-Operator  
 $\oplus$ : Symbol der Addition zweier Elemente aus einem Vektorraum



- $|0\rangle$  : Nullvektor in einem Vektorraum  
 $\ominus$  : Umkehrung der Addition  $\oplus$   
 $\odot$  : Symbol der Multiplikation eines Vektors mit einem Element aus einem Körper  
 $\mathbf{P}$  : die (bei gegebener Basis) dem Operator  $\mathbf{P}$  zugeordnete Matrix  
 $\mathbf{A} \circ \mathbf{B}$  : Multiplikation der Operatoren  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$   
 $\tilde{\mathbf{A}} \circ \tilde{\mathbf{B}}$  : Multiplikation der Matrizen  $\tilde{\mathbf{A}}$  und  $\tilde{\mathbf{B}}$   
 $\mathbf{U}$  : Untervektorraum  
 $\uplus$  : Symbol für die Bildung der direkten Summe zweier disjunkter Untervektorräume  
 $d(|k\rangle, |l\rangle)$  : Abstand der Vektoren  $|k\rangle$  und  $|l\rangle$   
 $\| |k\rangle \|$  : Norm des Vektors  $|k\rangle$   
 $\langle k | l \rangle$  : Skalarprodukt der Vektoren  $|k\rangle$  und  $|l\rangle$   
 $\perp$  : Symbol der Orthogonalität zweier Vektoren  
 $\delta_{i,j}$  : Kronecker-Symbol  
 $\mathfrak{F}_L$  : Menge der über das Intervall  $[-1; 1]$  quadrat-integrierbaren Funktionen  
 $\mathbf{B} \dagger \mathbf{A}$  : der Operator  $\mathbf{B}$  ist adjungiert zum Operator  $\mathbf{A}$   
 $\boxplus$  : Symbol der Addition zweier linearer Operatoren  
 $\circ$  : Symbol der Multiplikation zweier Operatoren  
 $[\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2]$  : Kommutator der Operatoren  $\mathbf{P}_1$  und  $\mathbf{P}_2$   
 $\mathcal{K}$  :  $\sigma$ -Ring über der Menge  $\mathbf{M}$   
 $p(K \in \mathcal{K})$  : Wahrscheinlichkeitsmaß  
 $F_a(x)$  : Verteilungsfunktion der Zufallsgröße  $a$   
 $f_a(x)$  : Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsgröße  $a$   
 $\langle a \rangle$  : Erwartungswert der Zufallsgröße  $a$   
 $\mu_k(a)$  :  $k$ -tes zentriertes Moment der Zufallsgröße  $a$   
 $var(a)$  : Varianz der Zufallsgröße  $a$   
 $cov(a, b)$  : Kovarianz der beiden Zufallsgrößen  $a$  und  $b$   
 $\rho(a, b)$  : Korrelationskoeffizient der beiden Zufallsgrößen  $a$  und  $b$   
 $k_1(n, r), k_2(n, r)$  : Variationen von  $n$  Elementen zur  $r$ -ten Klasse  
 $k_3(n, r), k_4(n, r)$  : Kombinationen von  $n$  Elementen zur  $r$ -ten Klasse  
 $\mathbf{L}$  : Drehimpuls-Operator  
 $\mathbf{a}_i$  : Erzeugungs-Operator zum  $i$ -ten 1-Teilchen-Zustand  
 $\mathbf{a}_i^\dagger$  : Vernichtungs-Operator zum  $i$ -ten 1-Teilchen-Zustand  
 $X^{(r)}$  : auf einen Referenzwert  $X_0$  bezogene Größe  $X$   
 $z$  : Ordnungszahl eines Elementes; Anzahl der Protonen in einem Atomkern  
 $\mathcal{A}$  : Massenzahl = Anzahl der Nukleonen in einem Atomkern  
 $A$  : Aktivität einer radioaktiven Probe  
 $D$  : Energiedosis eines radioaktiv bestrahlten Objektes  
 $AD$  : Aequivalentdosis eines radioaktiv bestrahlten Objektes  
 $w_R$  : Strahlungswichtungsfaktor einer radioaktiven Strahlung bzgl. eines bestimmten Objektes  
 $\sigma$  : Wirkungsquerschnitt eines Prozesses

### zu Heft 8 Thermodynamik

- $S$  : Entropie  
 $T$  : Temperatur  
 $t$  : in  $^{\circ}C$  angegebene Temperatur  
 $N$  : Teilchenzahl  
 $\mu$  : chemisches Potenzial  
 $F$  : freie Energie  
 $H$  : Enthalpie  
 $G$  : freie Enthalpie  
 $K$  : Gibbs-Potenzial  
 $x$  : volumenbezogene Dichte der Variablen  $X$   
 $\hat{x}$  : teilchenanzahlbezogene Dichte der Variablen  $X$   
 $\tilde{x}$  : massebezogene Dichte der Variablen  $X$   
 $\tilde{m}$  : Molmasse  
 $e$  : volumenbezogene Energiedichte  
 $\chi_i$  : intensive Variable der  $i$ -ten Entropieform  
 $C_v$  : Wärmekapazität eines Systems bei konstanten Werten von Volumen und Teilchenzahl  
 $C_p$  : Wärmekapazität eines Systems bei konstanten Werten von Druck und Teilchenzahl  
 $\hat{c}_v$  : teilchenanzahlbezogene spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  
 $\hat{c}_p$  : teilchenanzahlbezogene spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  
 $c_v$  : auf die Masse bezogene spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  
 $\beta_v$  : thermischer Volumenausdehnungskoeffizient  
 $\kappa_T$  : spezifische isotherme Kompressibilität  
 $\bar{K}$  : isothermer Kompressionsmodul  
 $JTK$  : Joule-Thomson-Koeffizient  
 $a, b$  : materialspezifische Parameter in der van-der-Waals-Zustandsgleichung eines realen Gases  
 $X^{(r)}$  : Größe  $X$ , bezogen auf einen dimensionsgleichen Referenzwert  $X_{ref}$   
 $\Delta e_m$  : volumenbezogene Schmelzwärme (der Index  $m$  steht für *melting*)  
 $\Delta e_{ev}$  : volumenbezogene Verdampfungswärme (der Index  $ev$  steht für *evaporation*)  
 $\zeta$  : Umsatzvariable (Reaktionslaufzahl) e. chemischen Reaktion  
 $\hat{n}_i$  : Teilchenzahlverhältnis zwischen der Komponente  $i$  und der Referenzkomponente z.B. in einer Lösung  
 $\sigma$  : spezifische Grenzflächenenergie  
 $a$  : volumenbezogene spezifische Oberfläche  
 $\tilde{a}$  : massenbezogene spezifische Oberfläche  
 $L_{ij}$  : Onsager-Koeffizienten  
 $z$  : Ladungszahl eines Ions  
 $\mu^*$  : elektrochemisches Potenzial

$\alpha_i$  : Dissoziationsgrad der Teilchensorte  $i$  in einer Flüssigkeit  
 $\lambda_D$  : Debyelänge  
 $J^{(Q)}$  : Wärmestrom  
 $\lambda$  : Wärmeleitfähigkeit  
 $g$  : Anzahl der zu einem Makrozustand gehörenden quantenmechanischen Zustände eines Systems  
 $\Gamma_E$  : Zustands-Verteilungsfunktion für die Energie  
 $\sigma$  : statistisch definierte Entropie  
 $\tau$  : statistisch definierte Temperatur  
 $Z^{(N)}$  : Zustandssumme eines Systems  
 $Z^{(\mu)}$  : großkanonische Zustandssumme eines Systems  
 $\kappa$  : Boltzmann-Konstante  
 $\Xi$  : Exergie  
 $V$  : Kreisverstärkung eines rückgekoppelten Systems

### zu Heft 10 Elementarteilchen / Kosmologie

$\mu$  :  $\mu$ -Meson oder Myon  
 $\tau$  :  $\tau$ -Meson oder Tauon  
 $\nu_e$  : Elektron-Neutrino (analog  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ )  
 $\pi$  :  $\pi$ -Meson oder Pion  
 $\kappa$  :  $\kappa$ -Meson oder Kaon  
 $\Psi$  : Psi-Teilchen  
 $\Sigma$  : Sigma-Teilchen  
 $\Xi$  :  $\Xi$ -Teilchen (gesprochen Ksi)  
 $\Lambda$  : Lambda-Teilchen  
 $\Delta$  : Delta-Teilchen  
 $\Upsilon$  : Ypsilon-Teilchen  
 $\eta$  : Eta-Teilchen  
 $L$  : Leptonenzahl  
 $B$  : Barionenzahl  
 $u$  : Quark der Bezeichnung *up*  
 $d$  : Quark der Bezeichnung *down*  
 $s$  : Quark der Bezeichnung *strange*  
 $c$  : Quark der Bezeichnung *charm*  
 $t$  : Quark der Bezeichnung *top*  
 $b$  : Quark der Bezeichnung *bottom*  
 $Y$  : Farbladung eines Quarks  
 $r$  : *red*; einer der 3 Eigenwerte der Farbladung  
 $g$  : *green*; einer der 3 Eigenwerte der Farbladung  
 $b$  : *blue*; einer der 3 Eigenwerte der Farbladung  
 $H^0$  : Higgs-Boson

$M_{\odot}$  : Masse unserer Sonne  
 $H_{\text{sch}}$  : scheinbare Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes  
 $H_{\text{sch-vis}}$  : scheinbare Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes,  
 .           spektral visuell gewichtet  
 $H_{\text{sch-bol}}$  : scheinbare Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes,  
 .           spektral bolometrisch gewichtet  
 $H_{\text{sch}}^{\text{mag}}$  : scheinbare Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes,  
 .           logarithmisch skaliert  
 $H_{\text{abs}}$  : absolute Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes  
 $H_{\text{abs}}^{\text{Mag}}$  : absolute Helligkeit eines leuchtenden Himmelsobjektes,  
 .           logarithmisch skaliert  
 $AE$  : astronomische (Längen-)Einheit  
 $\Theta$  : absolute kosmologische Zeit  
 $\mathbb{A}_{\text{Objekt}}$  : Alter eines (z.B. astronomischen) Objektes  
 $\Upsilon$  : (geometrische) Tiefenkoordinate

### zu Heft 11 Optik

$n$  : Brechungsindex  
 $\kappa$  : Absorptionskoeffizient  
 $T$  : Transmission einer Probe  
 $D$  : optische Dichte einer Probe  
 $\sigma_m$  : auf die Masse bezogener Absorptionsquerschnitt  
 $\sigma_n$  : auf die Teilchenzahl bezogener Absorptionsquerschnitt  
 $\vec{S}$  : Stokes-Vektor e. Lichtstrahls  
 $K$  : Kerr-Konstante eines Materials  
 $V$  : Verdet-Konstante eines Materials  
 $a$  : spezifische Drehung eines optisch aktiven Materials  
 $R$  : Krümmungsradius einer Linsenoberfläche  
 $f$  : Brennweite einer Linse  
 $a$  : Gegenstandsweite bei einer optischen Abbildung  
 $b$  : Bildweite bei einer optischen Abbildung  
 $\mathcal{D}$  : Brechkraft (Dioptrie) einer Linse  
 $\gamma$  : Winkelvergrößerung eines optischen Systems  
 $\Gamma$  : Abbildungsverhältnis  
 $\gamma$  : brechender Winkel eines dreiseitigen Prismas  
 $\delta$  : Ablenkungswinkel eines Lichtstrahls z.B. beim Durchgang durch ein Prisma  
 $z$  : Beugungsordnung z.B. bei der Beugung an einem Gitter  
 $g$  : Gitterkonstante z.B. eines Beugungsgitters  
 $N$  : Anzahl der Striche eines Beugungsgitters  
 $M(\vec{r})$  : spezifische Ausstrahlung einer Strahlungsquelle  
 $L$  : auf den Raumwinkel bezogene spezifische Ausstrahlungsdichte einer Strahlungs-

quelle

$L$  : Strahlungsdichte einer Strahlungsquelle

$E$  : Bestrahlungsstärke

$H$  : Bestrahlung

$E_v$  : Beleuchtungsstärke

$H_v$  : Belichtung

$S$  : Empfindlichkeit eines Detektors

$S(\lambda)$  : spektrale Empfindlichkeit eines Strahlungsdetektors

$\eta^{(N)}$  : Quantenausbeute eines Detektors

$SD$  : Signaldynamik eines optischen Systems

$\tilde{S}(\lambda)$  : Spektralprodukt eines optischen Gerätes

$MR$  : Messgerät-Reproduzierbarkeit

$MG$  : Messgerät-Genauigkeit

$I^2A$  : (inter-instrument-agreement) Geräte-Übereinstimmung

$H$  : Helligkeitssignal eines Farbmesssystems

$\vec{F}$  : Farbort eines Farbmesssystems

$s$  : Farbsättigungswert eines Farbmesssystems

$\vec{h}$  : Farbton eines Farbortes

$L, a^*, b^*$  : Farbkoordinaten im Farbsystems nach CILAB bzw. DIN 5033

$s$  : effektiver Streukoeffizient in der Kubelka-Munk-Theorie

$k$  : effektiver Absorptionskoeffizient in der Kubelka-Munk-Theorie

$R_\infty$  : Remission einer deckenden Farbschicht

### zu Heft 12 Materialwissenschaft

$\bar{E}$  : Elastizitätsmodul

$\bar{E}, \bar{E}''$  : Real- und Imaginärteil von  $\bar{E}$

$e_{sub}$  : Sublimationsenergie

$I$  : Flächenträgheitsmoment

$T_g$  : Temperatur des Glasübergangs

$\sigma$  : mechanische Spannung

$\sigma_{ik}$  : (mechanischer) Spannungstensor

$\varepsilon$  : Verzerrung

$\varepsilon_{ik}$  : Verzerrungstensor

$\Pi$  : Verformung(sgrad)

$\Sigma$  : Belastung(sgrad)

$\mathbf{E} = E_{ijkl}$  : Elastizitätstensor

$H$  : Härte-Kennzahl

$\mu$  : Reibungskoeffizient

$\varkappa$  : Abriebrate

### zu Heft 10.1.1 Elektronik

$R$  : reeller (ohmscher) Widerstand eines Zweipols  
 $Z$  : i.a. komplexwertige Impedanz eines Zweipols  
 $G$  : reeller (ohmscher) Leitwert eines Zweipols  
 $Y$  : i.a. komplexwertiger Leitwert eines Zweipols  
 $\mathcal{R}$  : Regelfaktor einer Spannungs- oder Stromversorgungseinheit  
 $BER$  : Bit-Error-Rate

## 1.8 Abkürzungen (-)

### zu Heft1 Einleitung

s. : siehe  
 m.a.W. : mit anderen Worten  
 u.U. : unter Umständen  
 sog. : sogenannt  
 o.B.d.A. : ohne Beschränkung der Allgemeinheit  
 doi : digital object identifier

### zu Heft2 Die besondere Denkweise des Physikers

ggfls. : gegebenenfalls  
 vgl. : vergleiche  
 engl. : englisch  
 UK : United Kingdom (Groß-Britannien, Schottland und Wales)  
 o.a; : oben aufgeführt  
 eigtl. : eigentlich  
 einschl. einschließlich  
 gem. : gemäß  
 em. : emeritiert  
 CGPM : XXX  
 MPI : Max-Planck-Institut  
 ü.d.M. : über dem Meeresspiegel

### zu Heft 3 Mechanik

DGL : Differenzialgleichung  
 $s$  : Sekunde (Zeiteinheit)  
 Hi. : Hinweis  
 $m$  : Meter (Längeneinheit)  
 $y$  : Jahr (Zeiteinheit)  
 $c_0$  : Lichtgeschwindigkeit (Naturkonstante)

*h* : Stunde (Zeiteinheit)  
*J* : Joule (Energieeinheit)  
*N* : Newton (Krafteinheit)  
*Lj* ; Lichtjahr (Längeneinheit)  
 lt. : laut  
 const : konstant  
 Jahrh. : Jahrhundert  
 Bd. : Band  
 o.ä. : oder ähnliches  
 a.T. : zum Teil  
 o.B.d.A. : ohne Beschränkung der Allgemeinheit  
*kn* : Knoten (Geschwindigkeits-Einheit)  
*KJ* : Kalenderjahr (Zeiteinheit)  
*W* : Watt (Energiestrom-Einheit)  
*Bf* : Beaufort (Einheit der Windgeschwindigkeit)  
 astron. : astronomisch  
 ISS : International Space Station  
 lat. : lateinisch  
 ART : allgemeine Relativitätstheorie  
 GUS : Gemeinschaft unabhängiger Staaten  
 WKA : Windkraftanlage  
 $\tau$  : Stundenwinkel (eine der Koordinaten des XXX-Koordinatensystems)

#### zu Heft 4 Elektrostatik

*A* : Ampère (Einheit des elektrischen Stroms)  
*Cb* : Coulomb (Einheit der elektrischen Ladung)  
*V* : Volt (Einheit der elektrischen Spannung)  
*F* : Farad (Einheit der Kapazität)  
*S* : Siemens (Einheit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit)  
 (XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene weitere Auflistung ist noch nicht verfügbar)

#### zu Heft 5 Magnetostatik

*T* : Tesla  
*Wb* : Weber  
 (XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene weitere Auflistung ist noch nicht verfügbar)

#### zu Heft 6 Elektrodynamik

*H* : Henry  
 UV : ultraviolettes Licht  
 IR : Infrarot(-Strahlung)

EUV : Extrem-Ultraviolett(-Strahlung)

HGÜ : Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

GIL : gasisolierte Rohrleiter

(XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene weitere Auflistung ist noch nicht verfügbar)

### zu Heft 7 Quantenmechanik

UVR : Unter-Vektorraum

$fm$  : Femtometer

$Bq$  : Becquerel

$b$  : Barn

$Gy$  : Gray

$Sv$  : Sievert

NB : Normalbedingungen:  $p = 1,01325 \cdot 10^5 \cdot Pa$  ;  $T = 0^\circ C$

### zu Heft 8 Thermodynamik

ü.d.M. : über dem Meeresspiegel

usf. : und so fort

WKA : Windkraftanlage

ROE : return of energy

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

### zu Heft 9 Kristallphysik

(XXX: Die an dieser Stelle vorgesehene Auflistung ist noch nicht verfügbar)

### zu Heft 10 Elementarteilchen, Kosmologie

zzgl. : zuzüglich

GUT : grand unified theory

$mag$  : (Magnitude) Einheit der scheinbaren Helligkeit von Sternen

$pc$  : parsec (astronomische Längeneinheit)

HRD : Hertzsprung-Russel-Diagramm

HST : Hubble Space Telescope

NIR : nahes Infrarot

LMC : Large Magellanian Cloud (große Magellansche Wolke)

BH : black hole (schwarzes Loch)

NGC : New General Catalogue

CME : coronal mass ejection (der Sonne)

CMB : cosmic microwave background (kosmische Hintergrundstrahlung)

### zu Heft 11 Optik



.  
CIE : Commission Internation de l'Eclairage  
PTZ : **Blei-Titanat-Zirkon-Keramik** (PTZ)  
*px* : Pixel  
SEM : Scanning Electron Microscope  
REM : Remissions-Elektronenmikroskop  
CLSM : Confocal Laser Scanning Microscope  
STED : Stimulated Emission Depletion  
TEM : Transmissions-Elektronenmikroskop

**zu Heft 12 Materialwissenschaft.**

.  
med. : medizinische Bezeichnung

**zu Heft 10.1.1 Elektronik.**

.  
VDR : Varistor (voltage dependant resistor)  
HMI : human-machine-interface  
MW : Mittelwelle  
KW : Kurzwelle  
UKW : Ultrakurzwelle  
NTSC : National Television Systems Committee  
VHF : very high frequency  
UHF : ultra high frequency  
BAS : Bild/Austastung/Synchronisation(-signal)

**zu Heft 15 Anhang**

.  
q.e.d. : quod erat demonstrandum (lat. was zu beweisen war) In der Mathematik übliche Angabe am Ende eines Beweises.  
.

