

Brücke zur Physik

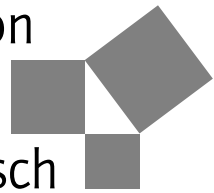
Zum Gedenken an Herrn Prof. Dr. Horst Harreis (1940–2002)



Edition

Harri

Deutsch



Brücke zur Physik

von

Norbert Treitz

3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 54463

Der Autor:

Dr. Norbert Treitz ist Professor für Didaktik der Physik – mit den Schwerpunkten Physikleh-
rerausbildung und Neuentwicklungen für den Physikunterricht – an der Universität Duisburg-
Essen.

3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2007

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5446-3

ISBN 978-3-8085-5848-5 (E-Book)

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der
gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2007 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: Medienhaus Plump GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Welch freudige Überraschung, wenn man plötzlich etwas versteht,
was man nur auswendig gelernt hatte.

Juan Zorrilla de San Martin

Alles sollte so einfach wie möglich gemacht werden, aber nicht einfacher.

Albert Einstein

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Physik ist nichts Fertiges in vollendeter Form, sondern eine jahrtausendelange leidenschaftliche Anstrengung, und jedes Buch darüber ein Zwischenbericht.

Wenn man einen Pariser Taxifahrer nicht versteht, so wiederholt der seine Rede bis zu fünfmal in gleichem Tempo und wortwörtlich, aber zunehmend lauter. Wo ich in diesem Buch von üblichen Erklärungsmustern oder Formulierungen abweiche, heißt das nicht unbedingt, dass ich sie schlechter finde wohl aber, dass ich es immer gut finde wenn man eine (vielleicht etwas schwierige) Sache auf mehrere Arten erklärt bekommt. Nicht so sehr die Wiederholung, sondern eher die Abwandlung ist die Quelle des Verstehens.

Der Stoff ist so ausgewählt, dass man mit wenig Mathematik in wesentliche Bereiche der Physik eindringen kann. Einfache Formeln und Methoden der Differential- und Integralrechnung werden erklärt und benutzt, ich gehe aber davon aus, dass Sie sich mit denen auch sonst schon befassen.

Wenn das Buch Ihnen selbst gehört, empfehle ich Anstreichen nach eigener Wahl, unabhängig davon aber Notizblock und Bleistift, nicht nur für Zwischenrechnungen, sondern auch für ganz einfache Skizzen.

So genannte Randgebiete (Astronomie, Physikgeschichte) sind bewusst, aber nur punktuell, einbezogen, oft in Form von Exkursen. Aufgaben, auch einfache Computerprogramme (deren Kerne meist ausgedruckt sind), sollen Sie zum Selbermachen anregen. (Versuchen Sie doch auch, die Abbildungen mit dem Computer zu erzeugen, und zwar ohne Scanner.)

Dass die Lösungen immer gleich hinter den Aufgaben stehen, erfordert etwas Selbstdisziplin von Ihnen: Buch zuklappen, und mit dem Notizblock weitermachen! Vielleicht ist es für Sie ungewohnt, dass dabei nicht so sehr das Ausführen der Rechnungen das Problem ist, sondern mehr das Herausfinden was man überhaupt rechnen kann und soll. Aber es sollen ja auch Physik- und keine Rechenaufgaben sein!

In dieser Auflage wurde die Astronomie erweitert, das Kapitel zur Relativitätstheorie umgestellt und der Feldbegriff stärker betont.

Physik muss man nicht (nur) lesen und rechnen, sondern (auch) tun!

Viel Spaß dabei wünscht Ihnen Ihr

N. Treitz

Inhaltsverzeichnis

* Zusatzabschnitt, auf den nicht wesentlich zurückgegriffen wird

1	Klassische Mechanik: Bewegungen im Raum	1
1.1	Eine elementare, aber energiebetonte Eröffnung	2
1.1.1	Ist die Gießkanne ein hydrostatisches Paradoxon?	3
1.1.2	Herons Springbrunnen	4
1.1.3	Die seltsame Waage von Roberval	5
1.1.4	Die Höhe des Schwerpunktes	7
1.1.5	Ist die Schwerpunktregel ein Naturgesetz?	7
1.1.6	Die Logik der schwarzen Raben und die „induktive Methode“	9
1.1.7	Vorläufige über die Energie	11
1.1.8	Die Masse als Menge der Materie und ihre Dichte	13
1.1.9	Der Formalismus mit Einheiten und Dimensionen	15
1.1.10	Die Energie des homogenen Schwerefeldes	16
1.1.11	Die einfache Maschine schlechthin	17
1.1.12	Wo bleibt die Energie, woher kommt sie?	18
1.2	Kinematik: Geschwindigkeit und Beschleunigung	20
1.2.1	Funktion und Ableitung – etwas Mathematik	20
1.2.1.1	Reelle Zahlen und Funktionen	20
1.2.1.2	Steigungsdreieck, Tangente, Ableitung	22
1.2.1.3	Rechenregeln für das Differenzieren	24
1.2.1.4	Zur Kurvendiskussion	25
1.2.1.5 *	Historische Bemerkungen	25
1.2.2	Vektoren, Winkel, sin und cos	26
1.2.2.1	Vektoren	26
1.2.2.2	Betrag, Polarkoordinaten, Winkel, Winkelfunktionen	27
1.2.3	Geschwindigkeit	29
1.2.3.1 *	Mehr und weniger Ernsthaftes über Folgen und Reihen	30
1.2.3.2 *	Überholt Achilles die Schildkröte?	31
1.2.3.3 *	Unendlich viele Schritte vor dem ersten?	33
1.2.3.4 *	Ruht der fliegende Pfeil?	33
1.2.3.5 *	Wo steht der superfliegende Greifarm?	34
1.2.3.6	Überholen ohne Beschleunigen	34
1.2.4	Beschleunigung	35
1.2.5	Relativitätsprinzip	39
1.2.6	Wurfparabel	41
1.2.6.1	Weiteste Wurfparabel	42
1.2.6.2 *	Wurf mit Reibung, Simulation WURF	43
1.2.6.3	Erweiterter grafischer Fahrplan	45
1.2.7 *	Geschicklichkeitsspiele zur Beschleunigung	46
1.2.7.1 *	Labyrinth mit verstellbarer Neigung	46
1.2.7.2 *	Beschleunigung auf kariertem Papier	46
1.2.7.3 *	Computer-Spiel BESCHLEUNIGUNG	47

	1.2.7.4 *	Differenzenfolgen und arithmetische Folgen	48
	1.2.7.5 *	Ungenauigkeiten aufgrund der iterativen Berechnung	49
	1.2.7.6 *	Iterationsungenauigkeit bei Computer-Berechnungen	50
	1.2.7.7 *	Physik als Datenreduktion	50
1.3		Das Nullsummenspiel der Impulse	52
	1.3.1	Inertialsysteme	54
	1.3.2	Impuls, Masse und Impulssatz	55
	1.3.2.1	Gleiche Teilchen behalten ihren „Mittelpunkt“	55
	1.3.2.2	Die Materiemenge als Bewertungsfaktor: „Masse“	55
	1.3.2.3	Der Impuls als Bewegungsgröße	57
	1.3.2.4	Die Erhaltung des Impulses	57
	1.3.2.5	Ruhsystem und Schwerpunktsystem	58
	1.3.3	Kräfte als einseitige Sichten auf Wechselwirkungen	60
	1.3.3.1	Die Definition der resultierenden Kraft	60
	1.3.3.2	Eine Kraft zwischen zwei Punktmassen	61
	1.3.3.3	Punktmechanik mit mehr als zwei Punktmassen	63
	1.3.3.4	Parallel- und Hintereinanderschaltung in einer Dimension	63
	1.3.3.5	Kräfte als Enden von Impulsströmen	64
	1.3.3.6	Kraftmessung	65
	1.3.3.7 *	Die Ankunft des Impulses heißt auch „Trägheitskraft“	66
	1.3.3.8	Das Gesetz von Hooke	67
	1.3.3.9	Die Schwerkraft im homogenen Grenzfall	68
	1.3.3.10	Kraftschluss und Haftung	69
	1.3.3.11 *	Ein Heimexperiment zur „Trägheit“?	70
	1.3.3.12	Die Muskelkraft als eine besonders untypische Kraft	71
	1.3.3.13	Ist die Kraft mehr als nur die Impulsänderungsrate?	71
	1.3.4	Beispiele zur Dynamik	72
	1.3.4.1	Richtungsänderung	72
	1.3.4.2	Inelastischer Stoß	73
	1.3.4.3	Die Erde fällt auf den Apfel (?)	74
	1.3.4.4	Der Versuch von Atwood – Die Fallmaschine	75
	1.3.4.5	Ein Standard-Versuch mit der Luftkissenbahn	75
	1.3.4.6	Das Verlassen der Fähre	76
	1.3.5	Statik oder Dynamik: Das ist hier die Frage!	76
	1.3.5.1	Erbsen fallen auf eine Waage	76
	1.3.5.2	Hüpfen	77
	1.3.5.3	Hubschrauber	77
	1.3.5.4	Tennis auf dem Wasser	78
	1.3.6	Beispiele zur Statik	79
	1.3.6.1	Haben acht Pferde so viel Kraft wie sechzehn?	79
	1.3.6.2	Statische Netze (Fachwerk)	80
	1.3.6.3	Das goldene Fass	81
	1.3.6.4	Balkenwaage und Briefwaage	82
	1.3.6.5	Die Eleganz der Schrägseilbrücke	83
	1.3.6.6 *	Ein Computerprogramm finde Gleichgewichte	84

1.3.7	Punktmassen auf Kreisbahnen	85
1.3.7.1	Ein Doppelstern kommt selten allein	87
1.3.7.2	Bremsen in der Kurve	88
1.3.7.3	Kurvenüberhöhung und Glatteis	88
1.3.8	Kann man Trägheitskräfte spüren?	89
1.3.8.1	Echte und so genannte Schwerelosigkeit: Volumenkraft	90
1.3.8.2	Der Marsch der Impulse durch die Strukturen: Oberflächenkraft	91
1.3.8.3	Vom Gefühl der Ruhe im Schwerfeld	93
1.3.8.4	Wo ist beim Kettenkarussell unten?	94
1.3.8.5 *	Das scheinbare Schwerfeld	95
1.3.8.6	Warum fällt der Fahrgast nicht aus der Achterbahn?	96
1.3.9 *	Historische Bemerkungen	96
1.3.9.1 *	Aristoteles	96
1.3.9.2 *	Buridan und die Impetustheorie	98
1.3.9.3 *	Galileo Galilei	98
1.3.9.4 *	Sir Isaac Newton	99
1.4	Energie in der Mechanik	101
1.4.1	Kinetische Energie	101
1.4.1.1	Wirkungsgrad von Windkonvertern nach Betz	102
1.4.2	Das Integral – ganz anschaulich streifenweise	103
1.4.3	Das skalare Produkt zweier Vektoren	105
1.4.4	Kann man Energie aufbewahren?	106
1.4.4.1	Stabhochsprung	110
1.4.4.2	Die Leistung	110
1.4.4.3	Von menschlicher Leistung	111
1.4.4.4	Was Autos so leisten	111
1.4.5	Energieentwertung durch Reibung	111
1.4.5.1	Ein Erbsenmodell für das Mischen von Impulsen	113
1.4.5.2	Bremsdiagramme	114
1.4.6	Gleichgewichte	116
1.4.7 *	Hydrostatik	117
1.4.7.1 *	Kapillarität	118
1.4.8	Energiebetrachtungen zu Stößen	119
1.4.8.1	Was ist ein elastischer Stoß?	119
1.4.8.2	Elastischer Stoß zweier Punktmassen im SPS	120
1.4.8.3	Der schlechte Billardspieler	121
1.4.8.4 *	Der gute Billardspieler	122
1.4.8.5	Tischtennisball contra Schläger	123
1.4.8.6	Ein Ball will hoch hinaus	123
1.4.8.7	Swing-by	124
1.4.8.8	Molekül und Stempel	126
1.4.8.9	Die Unfallforschung der Biertisch-Experten	126
1.4.8.10	Ein elastisches Modell für den inelastischen Stoß	127
1.5	Drehimpuls und Starrer Körper	129
1.5.1	Das Kreuzprodukt zweier Vektoren	130

1.5.2	Der Drehimpuls und seine Erhaltung	131
1.5.2.1	Zentralkraft und Flächensatz	132
1.5.3	Drehmoment	132
1.5.3.1	Unterarm	132
1.5.4	Starrer Körper und Trägheitsmoment	133
1.5.4.1	Eine Latte als Falltür	134
1.5.4.2	Von der Tätigkeit der Eistanzerin	135
1.5.4.3	Speichen auf Biegen und Brechen	136
1.5.5	Analogien zwischen Translation und Rotation	137
2	Gravitation und Astronomie	138
2.1	Newtons Gravitationsgesetz	140
2.1.1	Flüsse und Flusssichten	141
2.1.2	Das Gravitationsgesetz mit Flusssichten formuliert	142
2.1.3	Spezialisierung auf Kugelsymmetrie	143
2.1.4	Im Inneren einer Hohlkugel	144
2.1.5	Energie des Gravitationsfeldes	145
2.1.6	Energie in einem Feld aus Punktmasse und kugelsymmetrischem Objekt	146
2.1.7	Gravitations-Potenziale	147
2.1.8	Gegenüberstellung einiger Größen	148
2.1.9	Bestimmung der Feldkonstanten G nach Cavendish	148
2.1.10	Berechnung der Erdmasse	149
2.1.11	Fallbeschleunigung bei gleicher Dichte	149
2.1.12	Bilder von Feldlinien und Potenzialfläche	150
2.1.13	Die Jakobsleiter	151
2.1.14	Radiale Abhängigkeiten von Beschleunigung und Potenzialen	152
2.2	Kreisbewegungen im Schwerfeld	153
2.2.1	Gibt es Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt?	153
2.2.2	Zu Keplers drittem Gesetz	155
2.2.2.1	Diagramm zu Keplers drittem Gesetz	155
2.2.3	Potenzialtopf des Sonnensystems	157
2.2.4	Titius-Folge	158
2.2.5	Planetenjäger seit 200 Jahren	159
2.2.6 *	Ringe und Monde – die Roche-Grenze	162
2.2.7 *	Trojaner	163
2.2.8 *	Kant und die Gezeitenreibung	165
2.3	Kombinationen von Kreisbewegungen	168
2.3.1	Winkelgeschwindigkeiten und Synoden	168
2.3.2	Datumsgrenze	170
2.3.3	Mondphasen	171
2.3.4	Tycho Brahes geostatisches Bild – Modell und Simulation	174
2.3.5	Heliostatische Mondbahn	178
2.3.6	Finsternisse – Schattenspiele auf Erde und Mond	180
2.3.7	Gezeiten	182
2.4	Kegelschnitt-Bahnen im Schwerfeld	182
2.4.1	Keplers zweites Gesetz und der Drehimpuls	182

2.4.2	Allgemeines über die Bahn	183
2.4.3	Simulation der Bewegung zweier Objekte bei Gravitation	184
2.4.4	Die Kepler-Ellipse und Bahnexzentrizitäten	187
2.4.4.1	Perigäumsdrehungen	187
2.4.4.2	Punctum aequans	188
2.4.4.3	Jährlicher Anteil der Zeitgleichung	189
2.4.4.4	Längen-Libration des Mondes	189
2.4.5	Newton-Exponent aus erstem und zweitem Kepler-Gesetz	189
2.4.6	Hohmann-Ellipsen	190
2.4.7	Kreise im Geschwindigkeitsraum	191
2.4.8	Punktmassen auf Kegelschnittbahnen	194
2.5	Die Weite des Raumes	197
2.5.1	Entfernungen	197
2.5.2 *	Größen und Energieflüss	199
2.5.3	Warum ist es nachts dunkel?	202
2.5.4 *	Hertzsprung-Russell-Diagramm	204
2.5.5	Hubble	206
2.5.6	Der Zeitpfeil in der Astronomie – Evolution	206
2.5.7 *	Wie kann man – falls überhaupt – die Hohlwelttheorie widerlegen?	207
3	Elektrodynamik	209
3.1	Elektrostatik	210
3.1.1	Coulomb-Gesetz	210
3.1.1.1	Elektrische Flussdichte	211
3.1.1.2	Kugelsymmetrische Ladungsverteilungen	212
3.1.1.3	Dipole	213
3.1.1.4	Mechanisches Modell zum Dipol	214
3.1.2	Vergleich von Elektrostatik und Gravitation	215
3.1.3 *	Ein Balanceakt und der Satz von Earnshaw	215
3.1.4	Elektrische Spannung, Potenzial	216
3.1.5 *	Bilder von Feldern und Feldlinien	217
3.1.6	Kondensator und Energiedichte	221
3.1.6.1	Wo steckt der Fehler?	224
3.1.6.2	Elektrostatistisches Haften	224
3.1.7 *	Polarisierbarkeit	225
3.2	Elektrischer Gleichstrom	226
3.2.1	Elektrische Stromstärke	227
3.2.2	Knotenregel	227
3.2.3	Energietransport	228
3.2.4	Maschenregel	231
3.2.5	Ohm-Widerstand	232
3.2.5.1	Falsche Glühbirnen	233
3.2.5.2	Spannungsteiler mit Last	233
3.2.5.3	Vielfachdrehpulvergerät	235
3.2.6 *	Leitungsmechanismen	235
3.2.7	Exponentialfunktionen und Logarithmen	236
3.2.7.1	Aufladen und Entladen eines Kondensators	239

3.3	Magnetfeld und Lorentz-Kraft	242
3.3.1	Ampère-Kraft	242
3.3.2	Lorentz-Kraft und Definitio von \mathbf{B}	243
	3.3.2.1 Induktion und Hall-Effekt	243
3.3.3	Durchflutungsgeset	245
	3.3.3.1 Der Magnetismus der Erde	246
	3.3.3.2 Magnetfeld eines Drahtes	246
	3.3.3.3 Lange Spule	247
3.3.4 *	Biot-Savart-Gesetz und Helmholtz-Spulen	248
	3.3.4.1 Messung der Spezifische Ladung	250
3.4	Induktionsvorgang und Wechselstrom	251
3.4.1	Induktionsgesetz	251
3.4.2	Wechselstromgenerator	252
	3.4.2.1 Erdinduktor	252
3.4.3	Effektivwerte	253
3.4.4	Zeigerdiagramm und Drehstrom	254
	3.4.4.1 Drehstrom	255
3.4.5 *	Komplexe Zahlen	256
3.4.6 *	Induktivität	256
3.4.7 *	Maxwell-Gleichungen in Integral-Form	257
3.4.8 *	Michael Faraday	258
4	Schwingungen und Wellen	260
4.1	Schwingungen	260
4.1.1	Federpendel qualitativ	260
4.1.2	Sinus und Kosinus und ihre Ableitungen	261
4.1.3	Ungedämpftes Federpendel, quantitativ behandelt	262
	4.1.3.1 Das freie Federpendel	264
	4.1.3.2 Federdrehpendel	265
	4.1.3.3 Energien beim Federpendel und beim Federdrehpendel	266
4.1.4	Elektrischer Schwingkreis	267
4.1.5 *	Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Größen	267
4.1.6	Dämpfung	269
	4.1.6.1 Qualitatives zur Dämpfung	269
	4.1.6.2 * Harmonischer Oszillator bei starker Dämpfung – Kriechfall	269
	4.1.6.3 * Aperiodischer Grenzfall	271
	4.1.6.4 * Periodischer Fall bei schwacher Dämpfung	271
4.1.7	Rückkopplung und Resonanz	273
4.1.8 *	Anharmonische Schwingungen	274
4.1.9 *	Anfangswertempfindlich eit	277
4.1.10 *	Schwerependel	278
	4.1.10.1 * Das Konische Pendel als extremes Kettenkarussell	280
4.1.11 *	Schwebungen	281
4.1.12 *	Gekoppelte Schwingungen, qualitativ betrachtet	282
4.1.13 *	Datenfluss Amplitudenmodulation und Bandbreite	283

4.2	Wellen	286
4.2.1 *	Wellengleichung	287
4.2.1.1 *	Die Differenzialgleichung für Wellen auf einer Saite	287
4.2.1.2 *	Verallgemeinerungen der Wellengleichung und ihrer Lösungen	289
4.2.1.3 *	Stehende Wellen	291
4.2.2	Elongation und Energiestromdichte	292
4.2.3	Zwei dünne Spalte	295
4.2.3.1	Lautsprecher übereinander	298
4.2.4	Gitter aus n Spalten	298
4.2.5	Breite Spalte	301
4.2.6	Weitere Anwendungen und Fermat-Prinzip	304
4.2.6.1	Brechung einer Welle	304
4.2.6.2	Strahlenoptik als Grenzfall	305
4.2.6.3	Exakte Abbildungen	305
4.2.6.4 *	Wie eine Linse funktioniert	307
4.2.6.5 *	Fermat-Prinzip	308
4.2.6.6 *	Überzählige Pfade?	308
4.2.7 *	In Luft hören	310
4.2.8 *	Farben sehen	314
4.2.9 *	Hologramme als Speicher optischer Information	316
5	Strahlenoptik	319
5.1	Lichtstrahl als Modell	319
5.1.1	Gültigkeitsgrenzen aufgrund des Wellencharakters	319
5.1.2	Gültigkeitsgrenzen aufgrund des Teilchencharakters	319
5.1.3 *	Historische Anmerkungen	320
5.1.4	Grundregeln der Strahlenoptik	321
5.2	Paraxiale Optik	322
5.2.1	Brechung an einer Kugelfläch	323
5.2.2	Dünne Linse als zwei koaxiale Kugelschalen „ohne Abstand“	324
5.2.3	Anwendungen der Knickformel	325
5.2.3.1 *	Computerzeichnung von Strahlengängen	325
5.2.3.2	Zeichnerisches Verfahren	327
5.2.3.3	Ausgezeichnete Strahlen	328
5.2.4	Optische Abbildung	329
5.2.4.1	Objektiv als dünne Linse	331
5.2.4.2	Zwischenring	331
5.2.4.3	Mikroskop	332
5.2.4.4	Fernrohre	333
5.2.4.5	Brillenoptik	335
5.2.4.6 *	Objektpunkt \rightarrow Linse \rightarrow Bildpunkt	336
5.2.5 *	Bemerkungen zum Auge	336
6	Thermodynamik und kinetische Gastheorie	338
6.1	Ideales Gas	339
6.1.1	Ideales Gas als Modell	339
6.1.2	Vom Impuls zum Druck	339

6.1.3	Thermische Zustandsgleichung	340
6.1.3.1 *	Historische Bemerkungen	340
6.1.3.2 *	Teilchenzahl als so genannte Stoffmenge	341
6.1.3.3	Luftmoleküle im Zimmer	341
6.1.3.4	Heißluftballon	342
6.1.4 *	Spezifisch Wärmekapazität	342
6.2	Der Stirling-Kreisprozess	344
6.2.1	Isotherme Volumenänderungen	344
6.2.2	Der Stirling-Prozess als Kreisprozess	346
6.2.3	Wärmepumpe und Wärmekraftmaschine	347
6.2.4	Bleibt die „Arbeitsfähigkeit“ erhalten?	349
6.2.4.1	Wärmepumpe	353
6.3	Die Entropie – ein unbekanntes Wesen?	353
6.3.1	Makroskopische Definitio der Entropie	353
6.3.2	Entropie beim Stirling-Prozess	355
6.3.3	Die schwierige Klärung des Begriffes Wärme	356
6.3.4	Zunahme der Entropie bei der Wärmeleitung	358
6.3.5	Ausströmversuch von Gay-Lussac	358
6.3.6	Zweiter Hauptsatz – die nicht abnehmende Entropie	359
6.3.7	Wahrscheinlichkeit und Entropie	360
6.4 *	Aus Geschichte und Gegenwart der Energietechnik	361
6.4.1 *	Viele Sorten Kreisprozesse	362
6.4.1.1 *	Rückblick auf die Stirling-Maschine	362
6.4.1.2 *	Isobaren, Isentropen,	362
6.4.1.3 *	Zehn Kombinationen von „Iso-Kurven“ als Kreisprozesse	363
6.4.1.4 *	Die Dampfmaschine und ihr glückloser Erfinde Denys Papin	364
6.4.1.5 *	Carnot und Reitlinger	366
6.4.1.6 *	Ericsson und der Jet-Set	367
6.4.1.7 *	Verbrennungsmotoren nach Otto und Diesel	368
6.4.2 *	Zur Energiewirtschaft – die unsichtbaren Sklaven	368
7	Spezielle Relativitätstheorie (SRT)	370
7.1	Relativistische Dynamik	370
7.1.1	Hängt die Masse von der Geschwindigkeit ab?	370
7.1.2	Das Pythagoras-Dreieck der SRT	371
7.1.3	Grenzfälle: klassisch langsam oder relativistisch fast und ganz wie das Licht	373
7.1.4	Wechsel des Bezugssystems	374
7.1.5	Systeme aus mehreren Teilchen, Erhaltung und Invarianz	375
7.1.5.1 *	Ruheenergie mehrerer Photonen	377
7.1.5.2	Warum Collider so wirtschaftlich sind	378
7.1.5.3 *	HERA	379
7.1.5.4 *	Kann ein freies Elektron ein Photon verschlucken?	380
7.1.5.5	Compton-Effekt: eindimensionaler Fall	381
7.1.5.6	Der optische Doppler-Effekt	382

7.1.6	Masse und Energie: identisch oder ineinander umwandelbar? . . .	383
7.1.7	Bindungsenergien: Das Ganze ist weniger als seine Teile!	385
7.2 *	Relativistische Kinematik	385
7.2.1 *	Zum Vergleich: die so genannte Galilei-Transformation	385
7.2.2 *	Lorentz-Transformation	386
7.2.2.1 *	Myonen lassen sich Zeit mit dem Zerfall	389
7.2.2.2 *	Lorentz-Fitzgerald-Kontraktion: Werden Maßstäbe kürzer?	390
7.2.2.3	Das Additionstheorem der Geschwindigkeiten	391
7.2.2.4	Unser Gehirn ist zum Sehen der Relativitätstheorie zu langsam!	392
7.3 *	Albert Einstein	393
8	Struktur der Materie	396
8.0 *	Historische Anmerkungen	396
8.1	Quantenmechanik	398
8.1.1	Wellenmechanik und Unbestimmtheit	398
8.1.1.1	Klassische Unbestimmtheiten bei Schwingungen	398
8.1.1.2	Akustische Unbestimmtheit	400
8.1.1.3	Fotoeffekt	400
8.1.1.4	Materiewellen	402
8.1.1.5	Quantenmechanische Unbestimmtheit	403
8.1.1.6	Wie groß muss die Atomhülle sein?	404
8.1.2	Bosonen, Fermionen und Pauli-Prinzip	405
8.2	Fundamentale Fermionen: Leptonen und Quarks	406
8.2.1	Nichts ist einfacher als das Elektron	408
8.2.2	Das Positron und andere „Antimaterie“	409
8.2.3	Neutrinos als Poltergeister und Welträtsel	411
8.2.4	Myon und Tauon, des Elektrons schwere Geschwister	412
8.2.5	Zweimal sechs Sorten Quarks	412
8.3	Bosonen und Wechselwirkungen	413
8.3.1	Wer leicht ist, kommt weiter!	414
8.3.2	Gluonen – „farbiger Klebstoff“ hält die Welt zusammen	414
8.3.3	Elektromagnetische Kraft und Photon, QED	415
8.3.3.1	Skalenbeispiele zu Photonen	415
8.3.3.2	Photoelektronenspektroskopie (PES)	417
8.3.4	Schwache Kraft und Weakonen, β -Zerfall	417
8.3.5 *	Gravitation und Graviton	418
8.3.6 *	Vereinheitlichungen	418
8.4	Teilchenverbindungen	420
8.4.1	Hadronen als Verbindungen aus Quarks	420
8.4.2 *	Was sind elementare Teilchen?	421
8.4.2.1 *	Ist das Tohu-wa-Bohu einfacher?	423
8.4.2.2 *	Teilchen als Wandergruppen	424
8.5	Atomkerne	425
8.5.1	Elemente und Nuklide	425
8.5.2	Abmessungen und Form der Kerne	426

8.5.3	Bethe-Weizsäcker-Formel	426
8.5.3.1	Volumenterm	427
8.5.3.2	Oberflächenterm	428
8.5.3.3	Asymmetrie-Term	428
8.5.3.4	Coulomb-Term	429
8.5.3.5	Paarungsterm	429
8.5.4	Isobarenschnitte und Beta-Zerfälle	429
8.5.4.1	Massenbilanz bei Betazerfällen	431
8.5.5	Alpha-Zerfälle: mit Heisenberg-Kredit aus dem Gefängnis	432
8.5.6	Stabilitätstal	433
8.5.7	Spaltung	434
8.5.7.1 *	Historische Anmerkungen	435
8.5.8	Kernfusion	438
8.5.8.1	Sonnenenergie	439
8.5.8.2	Massebezogene Leistungen	439
8.5.9	Zerfallskonstante	440
8.5.9.1	Halbwertszeiten	440
8.5.9.2	Das verschwundene Nuklid	441
8.6	Atome, Moleküle und Festkörper	441
8.6.1	Atome und ihre Hüllen	441
8.6.1.1	Rosinenkuchen oder Planetensystem oder was sonst?	441
8.6.1.2	Die Unbestimmtheit bestimmt die Mindestgröße	442
8.6.1.3	Wellenfunktionen	443
8.6.1.4	Die radiale Abhängigkeit	444
8.6.1.5	Energiestufen im H-Atom und in Ionen, die ihm ähnlich sind	445
8.6.1.6	Haben Atome Zwiebelschalen?	446
8.6.1.7 *	Noch mehr Quantenzahlen	450
8.6.2 *	Moleküle	452
8.6.3	Festkörper	453
8.6.3.1	Bragg-Reflexion	454
9	Anhang	457
9.1	Jahreszahlen vor allem zur Physik	457
9.2	Englische Vokabeln zur Physik	463
9.3	Zur Wortkunde physikalischer Fachwörter	465
9.3.1	Griechisches Alphabet	465
9.3.2	Präfixe (Vorsilben)	465
9.3.3	Wörter	466
9.4	Nicht nur Geheimtipps	468
9.4.1	Fachliche und populäre Literatur	468
9.4.2	Aufgaben und Heimversuche	470
9.4.3	Physikgeschichte und klassische Originalliteratur	470
9.4.4	Physikalische und technische Ausstellungen	470
9.4.5	Fernsehsendungen	471
9.4.6	Vorträge und Tagungen nicht nur für Spezialisten	471

9.4.7	Unterhaltung mit Nähe zu Physik oder Mathematik	471
9.4.7.1	Rätsel und Scherze	471
9.4.7.2	Kunst und Physik	471
9.4.7.3	Romane, Erzählungen und Theaterstücke mit Bezug zur Physik	472
9.5	Register	473
9.6	Zahlen und Einheiten	482
9.6.1	Naturkonstanten und atomare Einheiten	482
9.6.2	Metrische Basiseinheiten	482
9.6.3	Symbole für Zehnerpotenzen in Einheiten	482
9.6.4	Abgeleitete metrische Einheiten mit Namen	483
9.6.5	Astronomische Faustdaten	483
9.6.6	Größengleichungen	483

1 Klassische Mechanik: Bewegungen im Raum

Die Mechanik handelt von Bewegungen im Raum (Kinematik und Dynamik) und auch von deren Ausbleiben (Statik). Wir beschreiben das hauptsächlich mit dem Impuls und seinen Übertragungen (Dynamik) sowie dem Drehimpuls und außerdem – wie in der gesamten Physik – mit der Energie. Wir gliedern die Mechanik hier in fünf Teile und behandeln die wichtigsten Grundbegriffe und etwas mathematisches Werkzeug. Als Eröffnung nehmen wir einen Teil, der mit ganz einfachen Vorstellungen über die Energie auskommt:

- 1.1 Nicht nur Vorläufige über die Energie als das *Geld der Natur* und über Naturgesetze
- 1.2 Kinematik als Beschreibung von Bewegungen nur mit Begriffen von Raum und Zeit, Relativitätsprinzip
- 1.3 Dynamik von Objekten mit unwichtiger Größe, den *Punktmassen*, der Impulssatz ist die zentrale Aussage, die Statik wird zum Spezialfall
- 1.4 Energie als Bilanzgröße macht wegen ihrer Erhaltung vieles einfacher und greift über die Mechanik weit hinaus
- 1.5 Dynamik von ausgedehnten festen Objekten mit unwichtiger Verformung, den *starren Körpern*, Drehimpulssatz bezüglich einer einzigen Achsenrichtung, also Drehungen in einer Ebene.

Elastische feste Körper und Flüssigkeiten fassen wir hier nicht im Sinne der Kontinuumsmechanik mit deren aufwendigen mathematischen Hilfsmitteln auf. Wir begnügen uns mit einigen einfachen Beispielen, die wir mit Impulsaustausch (nach HOOKE) und mit Energiebetrachtungen oder Schwerpunktshöhen beschreiben können.

Aus historischen Gründen zählt man zur Mechanik auch die Behandlung der Gravitation – bei uns in Kapitel 2, *nach* der Mechanik – und Effekte wie Reibung, Elastizität, Viskosität oder Kapillarität. Diese haben ihre Ursachen jedoch in elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen Atomen oder Molekülen, bei denen die Ladungen aber nicht nach außen isoliert auftreten.

Die Mechanik von Schwingungen und Wellen in Gasen und in elastischen Festkörpern – dazu gehört auch die Akustik – behandeln wir wegen der starken mathematischen Gemeinsamkeiten zusammen mit elektromagnetischen Schwingungen und Wellen in Kapitel 4.

Die Thermodynamik ist in dem von uns in Kapitel 6 behandelten Umfang eine Anwendung der Dynamik auf sehr viele Moleküle.

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) beruht auf dem gleichen Relativitätsprinzip wie die Klassische Mechanik (KM), wendet dieses aber auch noch korrekt auf große Geschwindigkeiten und elektrische Vorgänge und Licht an, worüber die KM falsche Aussagen macht. Wir behandeln sie in Kapitel 7.

Die SRT wird zwar meist nicht zur Klassischen Mechanik, wohl aber noch zur Klassischen Physik gerechnet, im Gegensatz zu den Quantentheorien. Zu diesen gehört die *Quantenmechanik*, die bei ihrer Entstehung auch *Wellenmechanik* (analog zur Wellenoptik) genannt wurde. Ihre wichtigsten Effekte gehen aus der Verknüpfung des Impulses und der Energie mit Welleneigenschaften hervor, wie wir in Kapitel 8 sehen werden.

In ihren Erscheinungen ist die Mechanik sehr anschaulich, wie sonst vielleicht nur noch die Optik, ihre Begriffe sind aber durchaus verwickelt und abstrakt. Wir versuchen, sie so anschaulich wie möglich kennen zu lernen. Daher werden wir sie aus geometrischen Verhältnissen heraus aufbauen.

Die übliche Entwicklung der mechanischen Begriffe aus Erfahrungen mit unseren Muskeln und die scheinbar so nahe liegende Fixierung auf die Kraft ziehen viele Missverständnisse nach sich. Das sind nach meiner Meinung eher Hindernisse als Hilfen. Ein Grund der Missverständnisse liegt in unseren Skelettmuskeln: Diese sind auf Bewegungen und nicht auf statische Belastungen optimiert. Ihre Benutzung zum Halten ist untypisch und führt zu Verwechslungen zwischen Kraft und Leistung.

1.1 Eine elementare, aber energiebetonte Eröffnung

Bevor wir uns das Handwerkszeug der physikalischen Begriffe und mathematischen Methoden aneignen, versuchen wir herauszufinden wie weit man mit Anschauung und Plausibilität kommen kann. Dabei werden wir einige Aspekte der wichtigsten Größe kennen lernen, die in der Physik vorkommt, nämlich der Energie. Das Wort Eröffnung soll hier andeuten, dass zwar alles einfach, aber trotzdem sehr wichtig ist.

Wenn ein Ball los gelassen wird, fällt er nach unten und nicht nach oben. Ist der Boden uneben, so kullert er abwärts und bleibt irgendwann an einer Stelle liegen, die tiefer ist als ihre Umgebung. Das ist – weil gewohnt – so selbstverständlich, dass nur sehr spitzfindig Menschen fragen, warum das denn so sei.

Die Antworten darauf und auf ähnliche Fragen sind im Laufe der letzten 23 Jahrhunderte immer allgemein gültiger und damit *richtiger* geworden, aber auch immer abstrakter und unverständlicher.

ARISTOTELES – ich halte ihn für den größten Wissenschaftler, den wir kennen – hatte noch eine sehr einleuchtende Antwort: Alles was schwer ist, hat seinen *natürlichen Ort* unten. Das heißt, es gehört dorthin und bewegt sich *von allein* dorthin. Mit Anstrengung und einigen Tricks, mit Mechanik, können wir eine solche Bewegung aber auch umkehren.

Es gibt also in diesem Sinne *erzwungene* und *freiwillige* Bewegungen. Das hört sich sehr vermenschlicht und wenig wissenschaftlich an. Fragen wir aber, warum der Ball nicht einfach aus seiner Kuhle herauskullert und nach oben springt, so hat die neuzeitliche Physik von NEWTON bis V. HELMHOLTZ keine plausible Antwort darauf gefunden. BOLTZMANN hatte mit seiner Antwort, die im Wesentlichen von einem atomistischen Modell und Wahrscheinlichkeiten darin handelt, unter den Kollegen einen schweren Stand, milde ausgedrückt.

Nehmen wir testweise das tatsächliche Verhalten des Balles als selbstverständlich hin, und überlegen, ob wir damit auch kompliziertere Versuche erklären können. Wir wollen die Bewegung des Balls nicht mit komplizierten Theorien erklären, sondern die komplizierteren Vorgänge als Varianten des gewohnten Balles verstehen.

- Wir hängen einen Bindfaden über eine drehbares Rad. Seltsamerweise nennt man in der Physik Räder, die sich drehen *ohne* dabei zu rollen, *Rollen*. An die Fadenenden hängen wir nun verschiedenen große *Gewichte*.

Sie wissen längst, was passiert: Das leichtere bewegt sich nach oben, das schwerere nach unten. Ist das nun eine Neuigkeit gegenüber dem fallenden Ball, oder nur eine Variante des gleichen