

# Brücke zur Physik

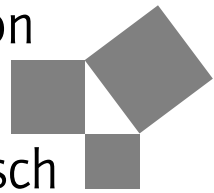
Zum Gedenken an Herrn Prof. Dr. Horst Harreis (1940–2002)



Edition

Harri

Deutsch



# Brücke zur Physik

von

Norbert Treitz

**3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselderger 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

<b>1</b>	<b>Klassische Mechanik: Bewegungen im Raum</b>	<b>1</b>
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 Schwerfeldes	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	Ruhesystem 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
<b>2</b>	<b>Gravitation und Astronomie . . . . .</b>	<b>138</b>
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
<b>3</b>	<b>Elektrodynamik . . . . .</b>	<b>209</b>
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	Vielfachdrehpulgerät . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Schwingungen und Wellen . . . . .</b>	<b>260</b>
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
<b>5</b>	<b>Strahlenoptik</b>	<b>319</b>
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
<b>6</b>	<b>Thermodynamik und kinetische Gastheorie</b>	<b>338</b>
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 Definition 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 Erfinder Denis Papin . . . . .	364
6.4.1.5 *	Carnot und Reitinger . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie (SRT)</b> . . . . .	<b>370</b>
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
<b>8</b>	<b>Struktur der Materie</b> . . . . .	<b>396</b>
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, $\beta$ -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
<b>9</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>457</b>
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