

# Mechanik und Wärmelehre

Stefan Roth  
Achim Stahl

# Mechanik und Wärmelehre

Experimentalphysik – anschaulich erklärt

Stefan Roth  
Achim Stahl  
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-662-45303-2    ISBN 978-3-662-45304-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-45304-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Planung:* Vera Spillner, Lisa Edelhäuser

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.de](http://www.springer.de))

# Vorwort

---

Dieses Buch wendet sich an alle, die gerne die Grundlagen der Experimentalphysik erlernen wollen. Es ist aus der Vorlesung „Experimentalphysik 1“ entstanden, die wir für unsere Studienanfänger im Fach Physik an der RWTH Aachen gehalten haben. Wir haben versucht, den Spaß, den uns diese Veranstaltung mit ihren vielen Experimenten macht, einzufangen und weiterzugeben. Wir hoffen, dies ist einigermaßen gelungen. Manche dieser Experimente können Sie selbst nachmachen. Versuchen Sie es! Das macht erst richtig Spaß. Doch mit Experimenten alleine ist es nicht getan. Sie müssen sich mit den Modellvorstellungen und Erklärungsweisen der Physik auseinandersetzen. Das Buch will Sie auch dabei unterstützen.

Dieses Buch stellt den ersten Band einer Reihe über die Experimentalphysik dar. Das Thema dieses Bandes ist die klassische Mechanik. Was die Bezeichnung „klassisch“ in diesem Zusammenhang bedeutet, werden Sie in ► [Kap.4](#) sehen. Das Buch ist in sechs Teile unterteilt. Diese sind

1. Einleitung: Hier wollen wir einige grundlegende Dinge über Physik besprechen.
2. Mechanik der Massepunkte, wo wir Bewegungen kennen- und erklären lernen, zunächst noch für den einfachen Fall von Körpern, die wir als Punkte approximieren.
3. Mechanik starrer Körper: Hier wollen wir die Näherung der Massepunkte aufgeben und uns mit ausgedehnten Körpern beschäftigen.
4. Elastische Körper, wo wir schließlich Deformationen der vormals starren Körper zulassen. In diesem Teil können wir neben den Festkörpern auch Flüssigkeiten und Gase behandeln.
5. Schwingungen und Wellen: Dies ist ein wichtiges Thema, das sich in allen Bereichen der Physik wiederfindet. Daher haben wir ihm einen eigenen Teil gewidmet.
6. Wärmelehre: Auch wenn dieses Thema nicht unmittelbar zur Mechanik gehört, haben wir es hier integriert, da die Modelle, mit denen wir die thermischen Eigenschaften erklären wollen, mechanischer Natur sind.

Für das Verständnis des Buchs ist ein besonderes Vorwissen über Physik nicht erforderlich. Selbst das Schulwissen Physik wird größtenteils wiederholt. Allerdings setzen wir Schulkenntnisse in Mathematik voraus. Sollten Sie hier Schwierigkeiten haben, so bieten wir Ihnen im Anhang („Mathematische Grundlagen“) eine kleine Hilfestellung an. Sollte auch das nicht genügen, müssen wir Sie auf die in den Literaturhinweisen angegebenen Bücher über Mathematik verweisen.

Der Umgang mit Physik erfordert umfangreiche mathematische Kenntnisse. Sie müssen diese gründlich erlernen. Falls Sie sie heute noch nicht besitzen, müssen Sie sich diese parallel zum Studium der Experimentalphysik aneignen. Wir werden in diesem Buch einige dieser Kenntnisse benutzen, eventuell noch bevor der gründliche und systematische Lernprozess bei Ihnen abgeschlossen ist. Dies ist leider unvermeidlich. Nehmen Sie es als Motivation, um sich noch intensiver mit Mathematik auseinanderzusetzen!

Dieses Lehrbuch stellt ihnen den Stoff der klassischen Mechanik vor, doch erarbeiten müssen Sie ihn sich selbst. Dies ist keine Schikane der Autoren, nein, es liegt in der Natur der Sache. Am Ende wollen Sie bereit sein, eigenständig zu forschen. Aber forschen bedeutet wissenschaftliches Neuland zu betreten, d. h. Gebiete zu betreten, zu denen es keine Bücher und auch keine Personen mehr gibt, die Ihnen beibringen könnten, wie das Neue aussieht. Sie werden das Neue selbst erforschen müssen. Um Sie darauf vorzubereiten, müssen Sie

lernen, sich das Neue selbst zu erarbeiten. Noch ist es Stoff, den andere bereits kennen, aber am Ende wird es wirklich völlig Neues sein.

Verstehen Sie das vorliegende Lehrbuch als ein Angebot, das Ihnen das Erarbeiten des Stoffes erleichtern soll. Das eigentliche Erarbeiten muss in Ihrem Kopf geschehen. Dort müssen Sie ein eigenes Gebäude der Physik mit ihren Vorstellungen, Erklärungen und Zusammenhängen errichten. Dies ist eine große Umstellung und am Anfang oft das größte Problem.

Ziel ist es, ein tiefes Verständnis der Physik zu erlangen. Eine Kenntnis der Fakten ist ebenfalls wichtig, aber in der Regel einfacher zu erreichen als ein tiefes Verständnis. Von zentraler Bedeutung ist die Frage nach dem *Warum?* Warum läuft ein bestimmter Prozess so ab und nicht anders? Warum ergibt sich dieses Ergebnis und nicht ein anderes?

Hier einige Tipps. Patentrezepte gibt es leider nicht:

- Gewöhnen Sie sich daran, die *Warum?*-Frage ständig zu stellen, wenn Sie in diesem oder anderen Büchern lesen, wenn Sie über die Experimente nachdenken, wenn Sie mit jemandem über Physik sprechen, . . .
- Hinterfragen Sie die Informationen, die Ihnen angeboten werden. Sie müssen damit rechnen, dass auch in diesem Buch Fehler sind: Schreibfehler, ungenaue oder unkorrekte Formulierungen und vielleicht auch Punkte, die wir selbst noch nicht genügend verstanden haben. Auch jedes andere Lehrbuch mag Fehler enthalten und Online-Artikel enthalten meist noch mehr. Denken Sie kritisch und erkennen Sie diese Fehler!
- Physikalische Aussagen sind an Voraussetzungen geknüpft. Lernen Sie nicht nur die Aussagen, sondern denken Sie darüber nach, unter welchen Voraussetzungen sie gelten.
- Haben Sie einen bestimmten Sachverhalt verstanden? Falls ja, sollten Sie in der Lage sein, den Sachverhalt zu erklären. Versuchen Sie das! Stellen Sie sich vor, ein Freund oder eine Freundin fragt Sie danach, und versuchen Sie (z. B. in Gedanken), ihm den Sachverhalt mit **Ihren** Worten zu erklären.
- Überarbeiten Sie die einzelnen Kapitel. Erstellen Sie Notizen, indem Sie die wesentlichen Inhalte in Ihren Worten niederschreiben.
- Benutzen Sie unterschiedliche Quellen (z. B. mehrere Lehrbücher) zu einem Thema, sodass Sie unterschiedliche Zugänge und Erklärungen zum Thema kennenlernen.
- Diskutieren Sie über Physik. Sprechen Sie Punkte an, die Sie selbst noch nicht ganz verstehen, oder diskutieren Sie weitergehende Fragen und Probleme.

Zum Aufbau des Buches: Die sechs Teile sind in Kapitel untergliedert. Jedes Kapitel enthält einen Text mit Abbildungen und Gleichungen, der den wesentlichen Stoff des Kapitels beschreibt. Daneben gibt es Experimente und Beispiele, die den Text ergänzen, sowie einige Bemerkungen zum methodischen Vorgehen in der Physik.

#### Experiment 0.1: Beispiel

In dieser Darstellung werden im Buch die Experimente präsentiert. Manche sind im Text zitiert und dann für das Verständnis sehr wichtig. Andere dienen mehr der Illustration. Das ein oder andere können Sie vielleicht selbst nachmachen. Versuchen Sie es!

**Beispiel 0.1: Darstellung eines Beispiels**

Ferner sind in den Text Beispiele eingegliedert, die den Inhalt ergänzen. Dieser Text zeigt die Formatierung eines Beispiels. Beispiele sind wichtig. Sie zeigen, wie Sie das gelernte Wissen anwenden können. Arbeiten Sie die Beispiele durch. An ihnen können Sie ihr Verständnis testen.

**Methodische Bemerkung**

Darüber hinaus sind an einigen Stellen Texte eingefügt, die auf das methodische Vorgehen in der Physik hinweisen. Sie sollen Ihnen klar machen, wie die Physik arbeitet. Sie erkennen sie an dieser Formatierung.

Am Ende der meisten Kapitel gibt es zudem Übungsaufgaben. Einen kurzen Abriss der Lösungen finden Sie im Anhang.

Viel Spaß und Erfolg!

Das vorliegende Buch ist nicht nur unser Werk. Hinter dem Buch stehen viele Helfer, bei denen wir uns hier herzlichst bedanken wollen. Unser Dank geht an Beate Roth fürs Korrekturlesen, an unsere Kollegen Prof. Lutz Feld, Dr. Katja Klein und Egon Schneevoigt, denen wir viele der tollen Experimente (und die Fotos davon) zu verdanken haben, ferner bei Jennifer Merz, Franziska Scholz, Richard Brauer, Niklas Mohr, Jan Domenik Sammet, Rüdiger Jussen, Hendrik Jansen, Joschka Lingemann, Lukas Gromann, Julius Schniewind, Sarah Böhm und bei all den Studierenden, die uns auf Fehler hingewiesen haben. Schließlich wollen wir uns beim Springer-Verlag für die exzellente Unterstützung bedanken.

Aachen, August 2015

Achim Stahl und Stefan Roth

# Inhaltsverzeichnis

---

## I Einleitung

<b>1</b>	<b>Was ist Physik?</b> .....	<b>3</b>
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
<b>2</b>	<b>Physikalische Größen</b> .....	<b>9</b>
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
2.1	<b>Definition</b> .....	10
2.2	<b>Die Grundgrößen</b> .....	10
2.3	<b>Die Länge</b> .....	13
2.4	<b>Die Zeit</b> .....	16
2.5	<b>Die Masse</b> .....	18
2.6	<b>Die Winkelmaße</b> .....	21
2.7	<b>Schreibweisen</b> .....	21
<b>3</b>	<b>Messfehler</b> .....	<b>25</b>
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
3.1	<b>Messwert</b> .....	26
3.2	<b>Statistische Interpretation</b> .....	29
3.3	<b>Fehlerfortpflanzung</b> .....	31
3.4	<b>Systematische Fehler</b> .....	32
<b>4</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>35</b>
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
4.1	<b>Physikalische Theorien</b> .....	36
4.2	<b>Erkenntnistheorie</b> .....	37
4.3	<b>Geltungsbereich der klassischen Physik</b> .....	38

## II Mechanik der Massenpunkte

<b>5</b>	<b>Kinematik des Massenpunktes</b> .....	<b>43</b>
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
5.1	<b>Der Massenpunkt</b> .....	44
5.2	<b>Bezugssysteme</b> .....	45
5.3	<b>Gleichförmige Bewegung</b> .....	48
5.4	<b>Ungleichförmige Bewegung</b> .....	51
5.5	<b>Beschleunigung</b> .....	53

5.6	<b>Der freie Fall</b> .....	56
5.7	<b>Wurfbewegung</b> .....	60
5.8	<b>Kreisbewegung</b> .....	65
<b>6</b>	<b>Dynamik eines Massenpunktes</b> .....	71
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
6.1	<b>Der Trägheitssatz</b> .....	72
6.2	<b>Das Grundgesetz der Mechanik</b> .....	77
6.3	<b>Das Reaktionsprinzip</b> .....	84
6.4	<b>Superposition von Kräften</b> .....	88
6.5	<b>Messung von Kräften</b> .....	90
<b>7</b>	<b>Arbeit und Energie</b> .....	93
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
7.1	<b>Arbeit und Leistung</b> .....	94
7.2	<b>Energie</b> .....	102
7.3	<b>Energieerhaltung</b> .....	105
7.4	<b>Symmetrien</b> .....	117
<b>8</b>	<b>Impuls</b> .....	121
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
8.1	<b>Impulserhaltung</b> .....	122
8.2	<b>Massenmittelpunkt</b> .....	124
8.3	<b>Stoßprozesse</b> .....	128
8.4	<b>Systeme mit veränderlicher Masse</b> .....	137
8.5	<b>Der Kraftstoß</b> .....	140
<b>9</b>	<b>Reibung</b> .....	145
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
9.1	<b>Allgemeines</b> .....	146
9.2	<b>Haftreibung</b> .....	148
9.3	<b>Gleitreibung</b> .....	153
9.4	<b>Rollreibung</b> .....	156
<b>10</b>	<b>Scheinkräfte</b> .....	159
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
10.1	<b>Überblick</b> .....	160
10.2	<b>Gleichförmig beschleunigte Bezugssysteme</b> .....	162
10.3	<b>Zentrifugalkraft</b> .....	164
10.4	<b>Coriolis-Kraft</b> .....	169
10.5	<b>Absolute Bewegung?</b> .....	180



<b>11</b>	<b>Himmelsmechanik</b> .....	183
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
11.1	Das erste Kepler'sche Gesetz .....	184
11.2	Das zweite und dritte Kepler'sche Gesetz .....	186
11.3	Das Gravitationsgesetz .....	194
11.4	Schwere und träge Masse .....	207
11.5	Potenzial und potenzielle Energie .....	208
<b>III</b>	<b>Mechanik starrer Körper</b>	
<b>12</b>	<b>Der starre Körper</b> .....	219
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
12.1	Definition .....	220
12.2	Das Drehmoment .....	221
12.3	Der Schwerpunkt eines Körpers .....	225
12.4	Der Hauptsatz der Statik .....	228
12.5	Statik starrer Körper .....	231
<b>13</b>	<b>Drehbewegungen</b> .....	241
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
13.1	Der Drehimpuls .....	242
13.2	Rotation um eine feste Achse .....	246
13.3	Drehimpulserhaltung .....	254
13.4	Rollbewegungen .....	260
13.5	Kreiselbewegung .....	266
13.6	Rotation um freie Achsen .....	279
13.7	Gegenüberstellung .....	286
<b>IV</b>	<b>Elastische Körper</b>	
<b>14</b>	<b>Elastomechanik</b> .....	295
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
14.1	Dehnungselastizität .....	296
14.2	Biegung .....	300
14.3	Kompression .....	305
14.4	Scherung .....	307
14.5	Finite-Elemente-Methode .....	309

<b>15</b>	<b>Hydro- und Aerostatik</b> .....	313
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
15.1	<b>Der Druck</b> .....	314
15.2	<b>Kompressibilität</b> .....	321
15.3	<b>Schweredruck</b> .....	324
15.4	<b>Auftrieb</b> .....	329
15.5	<b>Grenzflächen</b> .....	334
<b>16</b>	<b>Hydro- und Aerodynamik</b> .....	347
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
16.1	<b>Beschreibung von Strömungen</b> .....	348
16.2	<b>Die Kontinuitätsgleichung</b> .....	353
16.3	<b>Strömung idealer Flüssigkeiten</b> .....	357
16.4	<b>Innere Reibung</b> .....	371
16.5	<b>Laminare Strömungen</b> .....	375
16.6	<b>Turbulente Strömungen</b> .....	383
16.7	<b>Strömungswiderstand</b> .....	385
16.8	<b>Dynamischer Auftrieb</b> .....	392
<b>V</b>	<b>Schwingungen und Wellen</b>	
<b>17</b>	<b>Schwingungen</b> .....	407
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
17.1	<b>Harmonische Schwingungen</b> .....	408
17.2	<b>Gedämpfte Schwingungen</b> .....	418
17.3	<b>Gekoppelte Schwingungen</b> .....	435
17.4	<b>Stehende Wellen</b> .....	443
<b>18</b>	<b>Wellen</b> .....	459
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
18.1	<b>Harmonische Wellen</b> .....	460
18.2	<b>Wellengleichung</b> .....	467
18.3	<b>Wellenpakete</b> .....	469
18.4	<b>Energiedichte und Energietransport</b> .....	475
18.5	<b>Reflexion und Interferenz</b> .....	477
<b>19</b>	<b>Akustik</b> .....	483
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
19.1	<b>Schallwellen</b> .....	484
19.2	<b>Schallempfinden</b> .....	494

19.3	<b>Bewegte Schallquellen</b> .....	500
19.4	<b>Musikinstrumente</b> .....	506
<b>VI</b>	<b>Wärmelehre</b>	
<b>20</b>	<b>Temperatur</b> .....	515
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
20.1	<b>Thermisches Gleichgewicht</b> .....	516
20.2	<b>Temperaturskalen</b> .....	521
20.3	<b>Längenausdehnung</b> .....	523
20.4	<b>Volumenausdehnung</b> .....	527
<b>21</b>	<b>Wärme</b> .....	533
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
21.1	<b>Wärme und Energie</b> .....	534
21.2	<b>Wärmekapazität</b> .....	537
21.3	<b>Der erste Hauptsatz der Wärmelehre</b> .....	544
21.4	<b>Wärmetransport</b> .....	549
<b>22</b>	<b>Kinetische Gastheorie</b> .....	561
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
22.1	<b>Ideale Gase</b> .....	562
22.2	<b>Der Druck: kinetische Erklärung</b> .....	563
22.3	<b>Die Temperatur: kinetische Definition</b> .....	566
22.4	<b>Arbeitsprozesse mit idealen Gasen</b> .....	569
22.5	<b>Wärmekapazitäten: kinetische Erklärung</b> .....	571
22.6	<b>Adiabatische Prozesse</b> .....	573
22.7	<b>Boltzmann'sche Energieverteilung</b> .....	575
22.8	<b>Geschwindigkeitsverteilung</b> .....	578
22.9	<b>Mittlere freie Weglänge</b> .....	582
<b>23</b>	<b>Entropie</b> .....	585
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
23.1	<b>Reversible Prozesse</b> .....	586
23.2	<b>Der Carnot'sche Kreisprozess</b> .....	587
23.3	<b>Der zweite Hauptsatz</b> .....	592
23.4	<b>Wärme-Kraft-Maschinen</b> .....	603
23.5	<b>Entropie mikroskopisch</b> .....	615
23.6	<b>Der dritte Hauptsatz</b> .....	621

<b>24</b>	<b>Reale Gase</b> .....	625
	<i>Stefan Roth und Achim Stahl</i>	
24.1	<b>Zustandsgleichung</b> .....	626
24.2	<b>Phasenübergänge</b> .....	635
24.3	<b>Sieden und Kondensieren</b> .....	640
24.4	<b>Schmelzen und Gefrieren</b> .....	651
24.5	<b>Lösungen</b> .....	657
	<b>Serviceteil</b> .....	661
A1	Liste der Symbole .....	662
A2	Lösungen der Aufgaben .....	666
A3	Mathematische Einführung .....	692
	Stichwortverzeichnis .....	731

# Verzeichnis der Experimente

---

Experiment 0.1: Beispiel .....	VI
Experiment 2.1: Maßstäbe .....	14
Experiment 2.2: Uhren .....	17
Experiment 2.3: Waagen .....	20
Experiment 5.1: Geschossgeschwindigkeit .....	48
Experiment 5.2: Stroboskopaufnahme einer fallenden Kugel .....	51
Experiment 5.3: Fallbeschleunigung .....	56
Experiment 5.4: Freier Fall im Luftschatten .....	56
Experiment 5.5: Freier Fall mit der Fallmaschine .....	59
Experiment 5.6: Superposition mit der Eisenbahn .....	61
Experiment 5.7: Wurfparabel mit Wasserstrahl .....	63
Experiment 5.8: Superposition mit der Armbrust .....	63
Experiment 5.9: Superposition mit der Sprungschanze .....	64
Experiment 6.1: Trägheit einer schweren Kugel .....	76
Experiment 6.2: Trägheit am gedeckten Tisch .....	76
Experiment 6.3: Trägheit bei der Rotation .....	77
Experiment 6.4: Beschleunigung auf der Luftkissenbahn .....	82
Experiment 6.5: Reactio auf Skateboards .....	85
Experiment 6.6: Rückstoß vom Medizinball .....	86
Experiment 6.7: Wasserrakete .....	86
Experiment 6.8: Addition von Kräften .....	89
Experiment 7.1: Flaschenzug .....	94
Experiment 7.2: Energieumwandlung mit Dynamo .....	106
Experiment 7.3: Energieerhaltung am Pendel .....	106
Experiment 7.4: Trinkente .....	116
Experiment 8.1: Impulserhaltung auf der Luftkissenbahn .....	123
Experiment 8.2: Pendelwagen .....	126
Experiment 8.3: Stöße auf der Luftkissenbahn .....	132
Experiment 8.4: Kugelstoßpendel .....	134
Experiment 8.5: Flummipyramide .....	135
Experiment 8.6: Ballistisches Pendel .....	136
Experiment 8.7: Raketenwagen .....	139
Experiment 8.8: Kraftstoß mit dem Skateboard .....	141
Experiment 9.1: Haftreibung auf der schiefen Ebene .....	148
Experiment 9.2: Haftreibung auf der schiefen Ebene .....	151

Experiment 9.3: Haft- und Gleitreibung auf Stab .....	154
Experiment 9.4: Messung des Gleitreibungskoeffizienten .....	154
Experiment 9.5: Gleitender Stab .....	154
Experiment 9.6: Wärme durch Reibung .....	155
Experiment 10.1: Trägheitskraft im beschleunigten Bezugssystem .....	163
Experiment 10.2: Zentrifugalkraft .....	166
Experiment 10.3: Abplattung der Erde .....	167
Experiment 10.4: Die Oberfläche rotierender Flüssigkeiten .....	168
Experiment 10.5: Rotierender Eimer .....	169
Experiment 10.6: Eisbärjagd mit Schwierigkeiten .....	173
Experiment 10.7: Modellversuch zum Foucault'schen Pendel .....	178
Experiment 10.8: Foucault'sches Pendel .....	179
Experiment 11.1: Gravitationswaage .....	198
Experiment 12.1: Drehmomentscheibe .....	223
Experiment 12.2: Drehmoment an der Garnrolle .....	224
Experiment 12.3: Bestimmung des Schwerpunktes von Platten .....	226
Experiment 12.4: Steinetreppe .....	235
Experiment 13.1: Messung von Trägheitsmomenten .....	250
Experiment 13.2: Satz von Steiner .....	252
Experiment 13.3: Drehimpulserhaltung mit dem Drehstuhl .....	256
Experiment 13.4: Der kardanische Kreisel .....	258
Experiment 13.5: Der widerspenstige Koffer .....	258
Experiment 13.6: Gyroskop .....	259
Experiment 13.7: Feuertornado .....	259
Experiment 13.8: Zylinder rollt auf schiefer Ebene .....	262
Experiment 13.9: Maxwell-Rad .....	264
Experiment 13.10: Vertikales Gyroskop – Teil 1 .....	267
Experiment 13.11: Brummkreisel .....	270
Experiment 13.12: Vertikales Gyroskop – Teil 2 .....	273
Experiment 13.13: Kugelkreisel .....	276
Experiment 13.14: Levitron .....	276
Experiment 13.15: Kreiselkompass nach Magnus .....	277
Experiment 13.16: Rotation um freie Achsen .....	284
Experiment 13.17: Jonglieren mit Zigarrenkisten .....	285
Experiment 14.1: Dehnung eines Kupferdrahtes .....	296
Experiment 14.2: Querkontraktion an einem Gummiband .....	299
Experiment 14.3: Dehnung über die Elastizitätsgrenze hinaus .....	299
Experiment 14.4: Biegung sichtbar gemacht .....	301
Experiment 15.1: Isotropie des Drucks .....	317

Experiment 15.2: Hydraulische Presse .....	320
Experiment 15.3: Kompressibilität von Wasser .....	322
Experiment 15.4: Schweredruck in Wasser .....	325
Experiment 15.5: Kommunizierende Röhren .....	325
Experiment 15.6: Hydrostatisches Paradoxon .....	326
Experiment 15.7: Dichtewaage .....	326
Experiment 15.8: Auftrieb .....	331
Experiment 15.9: Kartesischer Taucher .....	333
Experiment 15.10: Magdeburger Halbkugeln .....	334
Experiment 15.11: Messung der Oberflächenspannung .....	336
Experiment 15.12: Wasserläufer .....	337
Experiment 15.13: Schwimmende Büroklammer .....	337
Experiment 15.14: Minimalflächen durch Oberflächenspannung .....	338
Experiment 15.15: Druck in einer Seifenblase .....	338
Experiment 15.16: Grenzwinkel im Keilglas .....	342
Experiment 15.17: Kapillarität .....	343
Experiment 16.1: Strömungen im Strömungskanal .....	348
Experiment 16.2: Hydrodynamisches Paradoxon .....	359
Experiment 16.3: Eimer mit Loch .....	361
Experiment 16.4: Prandtl'sches Staurohr .....	364
Experiment 16.5: Wasserstrahlpumpe .....	364
Experiment 16.6: Schwebende Kugel im Luftstrom .....	368
Experiment 16.7: Aerodynamisches Paradoxon .....	369
Experiment 16.8: Hagen-Poiseuille .....	378
Experiment 16.9: Stoke'sches Gesetz .....	382
Experiment 16.10: Strömungswiderstand .....	387
Experiment 16.11: Rauchringe .....	387
Experiment 16.12: Dynamischer Auftrieb an einer Tragfläche .....	393
Experiment 16.13: Magnus-Effekt .....	401
Experiment 17.1: Federpendel .....	408
Experiment 17.2: Physikalisches Pendel .....	412
Experiment 17.3: Stangenpendel .....	412
Experiment 17.4: Torsionspendel .....	413
Experiment 17.5: Mathematisches Pendel .....	413
Experiment 17.6: Pohl'sches Rad .....	418
Experiment 17.7: Erzwungene Schwingungen am Pohl'schen Rad .....	425
Experiment 17.8: Resonanz mit Federpendel .....	431
Experiment 17.9: Zungenfrequenzmesser .....	432
Experiment 17.10: Resonanzkatastrophe am Weinglas .....	434

Experiment 17.11: Gekoppelte Pendel .....	436
Experiment 17.12: Metronome .....	437
Experiment 17.13: Schwebung .....	442
Experiment 17.14: Eigenmoden .....	444
Experiment 17.15: Pendelkette .....	447
Experiment 17.16: Wellenmaschine .....	447
Experiment 17.17: Seilwellen im Gummiseil .....	449
Experiment 17.18: Stehende Wellen mit der Wellenmaschine .....	451
Experiment 17.19: Stehende Wellen auf Gummiseil .....	452
Experiment 17.20: Kundt'sche Staubfiguren .....	453
Experiment 17.21: Chladni'sche Klangfiguren .....	454
Experiment 17.22: Schwingungen einer Gitarrensaite .....	454
Experiment 18.1: Wasserwellen .....	460
Experiment 18.2: Wasserwellen 2 .....	463
Experiment 18.3: Fourieranalyse mit Mikrofon .....	473
Experiment 18.4: Reflexion von Wasserwellen .....	477
Experiment 18.5: Interferenz mit Wasserwellen .....	479
Experiment 19.1: Flackernde Kerzenflamme .....	484
Experiment 19.2: Rubens'sches Flammenrohr .....	485
Experiment 19.3: Schallausbreitung in Luft .....	486
Experiment 19.4: Schall im Vakuum .....	486
Experiment 19.5: Schallausbreitung in Holz .....	487
Experiment 19.6: Lochsirene .....	487
Experiment 19.7: Interferenz mit Schall .....	488
Experiment 19.8: Messung der Schallgeschwindigkeit .....	492
Experiment 19.9: Schallgeschwindigkeit in Helium .....	492
Experiment 19.10: Stimmlage in Helium .....	493
Experiment 19.11: Schallgeschwindigkeit in einem Festkörper .....	493
Experiment 19.12: Doppler-Effekt mit Pfeife .....	502
Experiment 19.13: Monochord .....	509
Experiment 20.1: Flüssigkeitsthermometer .....	517
Experiment 20.2: Gasthermometer .....	518
Experiment 20.3: Widerstandsthermometer .....	518
Experiment 20.4: Tripelpunkt von Wasser .....	522
Experiment 20.5: Längenausdehnung von Metallstäben .....	524
Experiment 20.6: Bimetallschalter .....	526
Experiment 20.7: Bolzensprenger .....	527
Experiment 20.8: Volumenausdehnung einer Kugel .....	528
Experiment 20.9: Wie kommt das Ei in die Flasche? .....	528



Experiment 21.1: Mechanisches Wärmeäquivalent .....	535
Experiment 21.2: Spezifische Wärme .....	542
Experiment 21.3: Trinkente (zweiter Anlauf) .....	547
Experiment 21.4: Adiabatische Zustandsänderung .....	548
Experiment 21.5: Wärmeleitung in Stäben .....	550
Experiment 21.6: Modell einer Zentralheizung .....	553
Experiment 21.7: Infrarotkamera .....	557
Experiment 21.8: Leslie-Würfel .....	558
Experiment 21.9: Lichtmühle .....	559
Experiment 22.1: Modellversuch zum Druck .....	566
Experiment 22.2: Brown'sche Molekularbewegung .....	568
Experiment 22.3: Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung .....	581
Experiment 23.1: Trinkente (dritter Anlauf) .....	601
Experiment 23.2: Stirlingmotor .....	614
Experiment 24.1: Phasenübergang im Koexistenzgebiet .....	632
Experiment 24.2: Kritischer Punkt .....	633
Experiment 24.3: Trockeneis .....	636
Experiment 24.4: Modell eines Geysirs .....	639
Experiment 24.5: Dampfdruck von Äther .....	641
Experiment 24.6: Gefrieren durch Verdampfungswärme .....	646
Experiment 24.7: Gefrieren auf der heißen Herdplatte .....	647
Experiment 24.8: Schmelzen von Eis unter Druck .....	654
Experiment 24.9: Osmose .....	660