

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zum Gesamtwerk</b> .....	XI
<b>Einführung</b> .....	1
<b>I Klassische Mechanik</b> .....	5
<b>1 Historische und wissenschaftstheoretische Aspekte der Mechanik (R. Hedrich)</b> .....	5
1.1 Einleitung: Naturphilosophie, Wissenschaftstheorie und Physik .....	5
1.2 Die historische Entwicklung der Mechanik .....	6
1.2.1 Qualitativ-phänomenologische Erfassung der Natur – Die griechische Antike .....	6
1.2.2 Mittelalterliche Stagnation, arabische Vermittlung und Neubeginn im Abendland .....	9
1.2.3 Die Kopernikanische Wende .....	10
1.2.4 Die Etablierung der experimentellen Methode .....	12
1.2.5 <i>Isaac Newton</i> und die Begründung der klassischen Mechanik .....	12
1.2.6 Analytische Mechanik, Mechanizismus und Determinismus .....	15
1.3 Modelltheoretische Aspekte der Mechanik .....	17
1.3.1 Die Rolle der Mathematik .....	17
1.3.2 Kontinuumsmodelle vs. diskrete Modelle .....	18
1.4 Der methodologische und erkenntnistheoretische Ausgangspunkt der empirischen Wissenschaften .....	19
1.5 Mechanismen des Wissenschaftswandels .....	22
1.5.1 Wissenschaftliche Revolutionen .....	22
1.5.2 Wissenschaftsentwicklung durch Theorienfalsifikation .....	24
1.5.3 Die Dynamik von Forschungsprogrammen .....	24
1.5.4 Evolutionäre Wissenschaftsdynamik .....	25
Literatur und Anmerkungen .....	25
<b>2 Die Mechanik des freien Massenpunktes (K.-H. Lotze, Experimente: O. Schwarz)</b> .....	29
2.1 Die Kinematik des freien Massenpunktes .....	29
2.1.1 Kartesische Koordinaten .....	29
2.1.2 Natürliche Koordinaten .....	31
2.1.3 Polarkoordinaten .....	31
2.1.4 Kugelkoordinaten .....	33
2.2 Die Newtonschen Axiome .....	34
2.3 Beispiele für eindimensionale Bewegungen .....	36
2.3.1 Die kräftefreie Bewegung .....	36
2.3.2 Der freie Fall im homogenen Schwerfeld .....	36
2.3.3 Das lineare Reibungsgesetz .....	37
2.3.4 Der freie Fall mit linearem Reibungsgesetz .....	38
2.3.5 Der harmonische Oszillator .....	38
2.3.6 Die freie gedämpfte Schwingung .....	40
2.3.7 Der gedämpfte Oszillator im homogenen Schwerfeld .....	42
2.3.8 Erzwungene Schwingungen .....	43
2.4 Bilanzgleichungen und Erhaltungsgrößen .....	46
2.4.1 Der Impulssatz .....	46
2.4.2 Der Drehimpulssatz .....	46

2.4.3	Der Energiesatz	48
2.4.4	Bewegung im Potential	50
2.4.5	Beispiele	53
2.4.6	Die Güte eines Oszillators	57
2.5	Beschleunigt bewegte Bezugssysteme	59
2.5.1	Beliebig beschleunigte Bezugssysteme	59
2.5.2	Erstes Beispiel: Das Karussell	61
2.5.3	Zweites Beispiel: Bewegung auf der rotierenden Erde	63
2.6	Experimente	66
2.6.1	Methoden zur Strecken- und Zeitmessung	66
2.6.2	Fahrbahnversuche – ein Überblick	67
2.6.3	Die Newtonschen Axiome	67
2.6.4	Beispiele für eindimensionale Bewegungen	70
2.6.5	Beschleunigt bewegte Bezugssysteme	80
2.6.6	Das Superpositions- und das klassische Relativitätsprinzip in Fahrbahnversuchen	82
2.6.7	Die Staubfigurenmethode nach Groeneveld	85
	Literatur zu Kap. 2.6 (Experimente)	87
<b>3</b>	<b>Die Mechanik von Systemen freier Massenpunkte</b>	
	( <i>K.-H. Lotze</i> , Experimente: <i>O. Schwarz</i> )	88
3.1	Die Newtonschen Bewegungsgleichungen für Massenpunktsysteme	88
3.2	Bilanzgleichungen und Erhaltungsgrößen	88
3.2.1	Der Impulssatz	88
3.2.2	Der Drehimpulssatz	89
3.2.3	Der Energiesatz	90
3.3	Beispiele	91
3.3.1	Der elastische Stoß zweier Massenpunkte	91
3.3.2	Der total unelastische Stoß zweier Massenpunkte	94
3.3.3	Gekoppelte Schwingungen	95
3.3.4	Die Raketengleichung	97
3.4	Experimente zu Stoßprozessen	98
	Literatur zu Kap. 3.4 (Experimente)	104
<b>4</b>	<b>Gravitation</b> ( <i>K.-H. Lotze</i> , Experimente: <i>O. Schwarz</i> )	105
4.1	Herleitung des Gravitationsgesetzes aus den Keplerschen Gesetzen	105
4.1.1	Das erste Keplersche Gesetz und die Polargleichung der Ellipse	105
4.1.2	Das zweite Keplersche Gesetz und der Flächensatz	107
4.1.3	Das dritte Keplersche Gesetz	107
4.2	Gravitation und Elektrostatik – ein Vergleich	109
4.3	Die Messung der Gravitationskonstanten	110
4.4	Herleitung der Keplerschen Gesetze aus dem Gravitationsgesetz	111
4.4.1	Der Flächensatz und das zweite Keplersche Gesetz	112
4.4.2	Energieerhaltung als erstes Integral und das erste Keplersche Gesetz	112
4.5	Die Anziehung einer kugelsymmetrischen Massenverteilung auf einen äußeren Massenpunkt	114
4.6	Newtonsches und Galileisches Fallgesetz	117
4.6.1	Das Newtonsche Fallgesetz und der freie Fall aus großer Höhe	117
4.6.2	Das Galileische Fallgesetz und der schiefe Wurf im homogenen Schwerfeld	118
4.7	Schwereelosigkeit und Gezeiten	120
4.8	Bewegung im effektiven Potential	123

4.8.1	Bewegung im effektiven Newtonschen Potential .....	123
4.8.2	Bewegung im effektiven <i>Schwarzschild</i> -Potential .....	125
4.9	Experimente .....	127
4.9.1	Die Ermittlung der Gravitationskonstanten .....	127
4.9.2	Einfache Gravimetrie mit Schulmitteln .....	130
4.9.3	Flächensatz und Zentralkräfte im Experiment .....	134
	Literatur zu Kap. 4.9 (Experimente) .....	137
<b>5</b>	<b>Massenpunkte und Massenpunktsysteme mit eingeschränkter Bewegungsfreiheit</b> ( <i>K.-H. Lotze</i> , Experimente: <i>O. Schwarz</i> ) .....	138
5.1	Klassifikation der Nebenbedingungen .....	138
5.2	Das d'Alembertsche Prinzip und die <i>Lagrange</i> -Gleichungen 1. Art für Massenpunkte .....	139
5.3	Beispiele für Massenpunkte mit eingeschränkter Bewegungsfreiheit .....	140
5.3.1	Statik .....	140
5.3.2	Die schiefe Ebene .....	141
5.3.3	Das mathematische Pendel .....	143
5.4	Die Erhaltungssätze für Drehimpuls und Energie .....	147
5.5	Massenpunktsysteme mit Nebenbedingungen: Das Doppel-Wellrad .....	148
5.6	Der um eine freie Achse frei drehbare starre Körper .....	150
5.6.1	Kinetische Energie und Drehimpuls. Das Trägheitsmoment .....	150
5.6.2	Berechnung einfacher Trägheitsmomente nach dem Cavalierischen Prinzip .....	151
5.6.3	Der Steinersche Satz .....	153
5.6.4	Beispiele .....	154
5.7	Die <i>Lagrange</i> -Gleichungen 2. Art .....	157
5.8	Beispiele .....	160
5.8.1	Das mathematische Pendel .....	160
5.8.2	Das mathematische Pendel mit horizontal bewegtem Aufhängepunkt .....	160
5.8.3	Das Schwungrad auf horizontaler Ebene .....	162
5.9	Das <i>Hamilton</i> -Prinzip .....	164
5.10	Experimente .....	165
	Literatur zu Kap. 5.10 (Experimente) .....	176
<b>6</b>	<b>Starre Körper und Kreisel</b> .....	177
6.1	Ebene Probleme mit starren Körpern ( <i>N. Treitz</i> ) .....	177
6.1.1	Das Modell des starren Körpers .....	177
6.1.2	Beispiele für ebene Probleme mit starren Körpern .....	177
6.2	Grundzüge der Kreiseltheorie ( <i>O. Schwarz</i> ) .....	189
6.2.1	Vorbemerkungen .....	189
6.2.2	Trägheitsmoment und Drehimpuls .....	190
6.2.3	Die Eulerschen Gleichungen .....	192
6.2.4	Spezielle Kreiselbewegungen .....	194
6.2.5	Experimente .....	197
	Literatur zu Kap. 6.2 .....	202
	Literatur: Lehrbücher zu den Kapiteln 2 bis 6 .....	202
<b>7</b>	<b>Analytische Mechanik</b> ( <i>A. Krüger</i> ) .....	203
7.1	Der Phasenraum .....	203
7.1.1	Beispiel: Eindimensionale Bewegung eines Massenpunktes .....	204

7.1.2	Beispiel: Der harmonische Oszillator	204
7.2	Der Existenz- und Eindeigkeitssatz	206
7.3	Die Hamiltonschen Gleichungen	207
7.3.1	Beispiel: Das mathematische Pendel in der Hamiltonschen Theorie	208
7.3.2	Beispiel: Der Phasenraum des mathematischen Pendels	210
7.4	Der Liouvillesche Satz	210
7.4.1	Beispiel: Die Phasenraumdicke für Teilchen im Gravitationsfeld	211
7.5	Kanonische Transformationen	212
7.5.1	Beispiel: Die Zentralbewegung	212
7.5.2	Beispiel: Der harmonische Oszillator	216
7.6	Die <i>Hamilton-Jacobi</i> -Theorie	217
7.6.1	Beispiel zur <i>Hamilton-Jacobi</i> -Differentialgleichung	219
7.6.2	Beispiel zur Bedeutung der Winkelvariable	222
7.6.3	Beispiel: Gravitationskraft zwischen zwei Himmelskörpern (Die Planetenbewegung)	224
	Literatur	227
<b>II</b>	<b>Dynamische Systeme und Chaos</b>	<b>228</b>
<b>8</b>	<b>Von Poincaré zum K.A.M.-Theorem – Die Anfänge der „Chaostheorie“ (R. Hedrich)</b>	<b>228</b>
8.1	Der Auslöser: Die Frage nach der Stabilität des Sonnensystems	228
8.2	<i>Poincaré</i> : Dynamische Instabilitäten und qualitative Systemanalyse	228
8.3	<i>Birkhoff's</i> „Theorie dynamischer Systeme“	230
8.4	Das K.A.M.-Theorem	231
8.5	Stochastische Schichten und <i>Arnol'd</i> -Diffusion	232
8.6	Die „Chaos-Forschung“	233
	Literatur und Anmerkungen	234
<b>9</b>	<b>Dynamische Systeme (A. Krüger, Experimente: V. Reuter)</b>	<b>237</b>
9.1	Methoden, Begriffe, Konzepte	237
9.2	Der Phasenraumfluss in dissipativen Systemen	238
9.2.1	Beispiel: Das <i>Lorenz</i> -Modell	240
9.2.2	Experiment: Herzdynamik	241
9.3	Die <i>Poincaré</i> -Abbildung	244
9.3.1	Beispiel: Flüsse in der Ebene	246
9.3.2	Beispiel: Flüsse auf einem Torus	247
9.4	Bifurkationen	248
9.5	Chaos	252
9.5.1	Die Korrelationsfunktion	253
9.5.2	Der seltsame Attraktor	254
9.5.3	Beispiel: Die <i>Baker</i> -Transformation	257
9.5.4	Beispiel: Die <i>Hénon</i> -Abbildung	258
9.5.5	Der <i>Liapunov</i> -Exponent	260
9.6	Diskrete Modellsysteme	263
9.6.1	Die Logistische Abbildung	263
9.6.2	Beispiel: Populationsdynamik	267
9.6.3	Experiment: Rückkopplungsexperiment zur logistischen Abbildung	271
9.7	Kontinuierliche Modellsysteme	275
9.7.1	Das Pendel	275

9.7.2	Beispiel: Die <i>Poincaré</i> -Abbildung des Pendelattraktors	278
9.7.3	Experiment: Das getriebene Pendel	279
9.7.4	Experiment: Gekoppelte Pendel	284
9.7.5	Experiment: Das Pohlsche Drehpendel	286
9.8	Starke und schwache Kausalität	295
9.8.1	Experiment: Das Magnetpendel	295
	Literatur	298
<b>10</b>	<b>Fraktale Strukturen (A. Krüger, V. Reuter)</b>	299
10.1	Definition der fraktalen Dimension	299
10.1.1	Die <i>Hausdorff</i> -Dimension	301
10.1.2	Beispiel: Die <i>Cantor</i> -Menge	301
10.1.3	Bestimmung der fraktalen Dimension mit dem Box-Counting-Verfahren	302
10.2	Theoretische Beispiele für fraktale Strukturen	303
10.2.1	Linienfraktale	303
10.2.2	Flächenfraktale	305
10.2.3	Massenfraktale	306
10.3	Experimentelle Beispiele für fraktale Strukturen	308
10.3.1	DLA-Strukturen	308
10.3.2	Weitere Beispiele: <i>Hele-Shaw</i> -Zelle Elektrolytische Anlagerung	309 310
10.4	Wozu fraktale Analysen?	311
	Literatur	313
<b>III</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	314
<b>11</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie – Grundlagen (K.-H. Lotze, Experimente: O. Schwarz)</b>	314
11.1	Die historischen Wurzeln der Speziellen Relativitätstheorie	314
11.1.1	Die klassische Mechanik und ihr Galileisches Relativitätsprinzip – Inertialsysteme	314
11.1.2	Schallausbreitung und Lichtausbreitung	316
11.1.3	Der <i>Michelson</i> -Versuch und seine Interpretation durch <i>Fitzgerald</i> und <i>Lorentz</i>	319
11.2	Die Grundprinzipien der Speziellen Relativitätstheorie und ihre kinematischen Konsequenzen	321
11.2.1	Die beiden Grundprinzipien der Speziellen Relativitätstheorie	321
11.2.2	Die Relativität der Gleichzeitigkeit	322
11.2.3	Raum-Zeit-Diagramme: Ereignisse und Weltlinien	323
11.2.4	<i>Bondis</i> $k$ -Faktor	324
11.2.5	Das Additionstheorem der Geschwindigkeiten	326
11.2.6	Lichtuhren und Zeitdilatation	328
11.2.7	Längenkontraktion: Weltkarte und Weltbild	329
11.2.8	Die <i>Lorentz</i> -Transformation	331
11.2.9	Der Zerfall der $\mu$ -Mesonen	335
11.3	<i>Minkowskis</i> vierdimensionale Raumzeit	336
11.3.1	Die graphische Darstellung der <i>Lorentz</i> -Transformation	336
11.3.2	Das Eigenzeit-Intervall	337
11.3.3	Der Lichtkegel	340
11.3.4	Das Zwillingsparadoxon	341
11.4	Aus der relativistischen Mechanik	343
11.4.1	Die Trägheit der Energie	343

11.4.2	Erhaltungssätze für Energie und Impuls. Beispiele .....	346
11.4.3	Das Newtonsche Grundgesetz im Rahmen der relativistischen Mechanik .....	348
	Literatur zu Kap. 11 .....	349
11.5	Experimente zur Speziellen Relativitätstheorie .....	349
11.5.1	Vorbemerkungen .....	349
11.5.2	Experimente .....	350
	Literatur zu Kap. 11.5 (Experimente) .....	354
<b>12</b>	<b>Beispiele zur speziell-relativistischen Dynamik</b> ( <i>H. Harreis †, N. Treitz</i> ) .....	355
12.1	Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Impuls, Ruheenergie und Energie .....	355
12.2	Kartesische Energie-Impuls-Auftragung .....	357
12.3	Energie im Schwerpunktsystem an einem Beispiel im HERA .....	360
12.4	Collider oder Target? .....	361
12.5	Paarerzeugung und -Annihilation .....	364
12.6	Doppler-Effekt .....	365
12.7	Absorption und Emission .....	367
12.8	<i>Compton</i> - Effekt: eindimensionaler Fall .....	370
12.9	<i>Compton</i> -Effekt in zwei Dimensionen .....	371
12.10	Masse und Energie: miteinander identisch oder ineinander umwandelbar? .....	374
	Literatur .....	375
Register	.....	376