

Skript zur Vorlesung:

Theoretische Physik I: Klassische Mechanik und Spezielle Relativitätstheorie

Prof. Peter Uwer

Stand: 8. April 2022

Bitte beachten Sie, dass es sich lediglich um Vorlesungsnotizen handelt, die nicht die Lektüre von Lehrbüchern ersetzen können! Sollten Sie Fehler finden, bitte melden.

Ich danke Jakob Niehues für seine Unterstützung bei der Anfertigung des vorliegenden Skriptes und Stefan Mölbitz für das Korrekturlesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	5
1.1	Zielsetzung der Theoretischen Physik	5
1.2	Geometrie von Raum und Zeit	6
1.2.1	Euklidische Geometrie des Raumes	7
1.3	Massenpunkt und starrer Körper	9
1.4	Inertialsysteme	11
1.5	Galileitransformationen und Galileisches Relativitätsprinzip	11
1.6	Träge und schwere Masse	14
1.7	Elemente der Newtonschen Mechanik und einfache Anwendungen	15
1.7.1	„Schiefer Wurf“ im konstanten Gravitationsfeld	17
2	Oszillatoren und harmonische Schwingungen	20
2.1	Eindimensionaler harmonischer Oszillator ohne Reibung	20
2.1.1	Darstellung der Bewegung im Phasenraum, Phasenportrait	23
2.1.2	Labile bzw. instabile Gleichgewichtslage ($k < 0$)	23
2.2	Gedämpfter harmonischer Oszillator – Bewegung mit Reibung	24
2.2.1	„Freies Teilchen“ mit Reibung	24
2.2.2	Gedämpfte Schwingungen	26
2.2.3	Güte eines Oszillators	33
2.3	Erzwungene Schwingungen	34
2.3.1	Erzwungene Schwingung mit sinusförmiger Kraft	35
2.4	Harmonische Oszillatoren in der Ebene	40
3	Rotationssymmetrische Potentiale	43
3.1	Allgemeine Eigenschaften	44
3.1.1	Drehimpulserhaltung	44
3.1.2	Keplerscher Flächensatz — 2. Keplersches Gesetz	45
3.1.3	Bewegung in ebenen Polarkoordinaten	46
3.1.4	Qualitative Merkmale der Bewegung	48
3.1.5	Integration der Bewegungsgleichung	50
3.1.6	Bahngleichung	51
3.2	Bewegung im Gravitationspotential	52
3.2.1	Bahnkurve — 1. Keplersches Gesetz	52
3.2.2	3. Keplersches Gesetz	55
3.2.3	Zeitabhängigkeit der Bewegung ($E < 0$)	56
3.2.4	Der Runge-Lenz-Vektor	57
4	Zweikörperproblem	58
4.1	Allgemeine Eigenschaften	58
4.1.1	Erhaltung des Gesamtimpulses	58
4.1.2	Energieerhaltung	60
4.1.3	Erhaltung des Gesamtdrehimpulses	60

4.1.4	Separation von Schwerpunkt und Relativbewegung	61
4.2	Anwendungen	64
4.2.1	Bewegung des Systems Sonne – Planet	64
4.2.2	Zweikörperzerfall eines Teilchens	66
4.2.3	Elastische Streuung und Wirkungsquerschnitt	69
5	Newtonsche Mechanik von N Massenpunkten	75
5.1	Verhalten des Gesamtimpulses	76
5.2	Verhalten des Drehimpulses	77
5.3	Schwerpunktkoordinaten	78
5.4	Energieerhaltung	78
6	Ergänzung zur Newtonschen Mechanik: Virialsatz	79
7	Systeme mit Zwangsbedingungen — Zwangskräfte und d’Alembertsches Prinzip, Lagrange-Gleichungen 1. und 2. Art	83
7.1	Schiefe Ebene als einfaches Beispiel	83
7.2	Mathematische Formulierung von Zwangsbedingungen	86
7.3	Virtuelle Verrückung und d’Alembertsches Prinzip	87
7.4	Lagrangesche Gleichungen 1. Art	91
7.5	Lagrangesche Gleichungen 2. Art	95
8	Das Hamiltonsche Prinzip	102
8.1	Elementare Variationsrechnung	102
8.2	Lagrangesche Gleichungen und Wirkungsprinzip	105
9	Symmetrien und Erhaltungssätze — Noethertheorem	107
9.1	Invariante Lagrangefunktion	107
9.2	Invarianz der Wirkung bis auf Randterme	109
9.3	Konstanz der Hamiltonfunktion	111
10	Hamiltonsche Formulierung der Mechanik — kanonische Gleichungen	112
10.1	Herleitung der kanonischen Gleichungen	114
10.2	Phasenraum und Observablen	116
10.3	Poisson-Algebra	117
10.4	Kanonische Transformationen	119
10.4.1	Die erzeugende Funktion $F_1(q_\alpha, Q_\alpha, t)$	121
10.4.2	Die erzeugende Funktion $F_2(q_\alpha, P_\alpha, t)$	122
10.5	Hamilton-Jacobi-Formulierung	124
10.6	Eigenschaften kanonischer Transformationen	124
10.6.1	Invarianz der Poissonklammern	124
10.6.2	Invarianz des Phasenraumvolumens unter kanonischen Transformationen	126
10.7	Infinitesimale kanonische Transformationen	127
10.8	Liouville-Theorem	129

11 Beschleunigte Bezugssysteme	131
11.1 Trägheitskräfte im beschleunigten Bezugssystem	131
11.2 Anwendungen	139
11.2.1 Frei fallendes Bezugssystem	139
11.2.2 Freier Fall auf rotierender Erde	140
11.2.3 Foucaultpendel	142
12 Starrer Körper	145
12.1 Eulersche Winkel	147
12.2 Kinetische Energie und Trägheitstensor	149
12.3 Drehimpuls des starren Körpers	152
12.4 Eulersche Gleichungen	152
12.4.1 Freie Achsen und Stabilität	153
12.5 Freier symmetrischer Kreisel	154
12.6 Schwerer symmetrischer Kreisel	156
13 Spezielle Relativitätstheorie	159
13.1 Postulate der speziellen Relativitätstheorie	159
13.2 Lorentztransformationen	160
13.2.1 Anwendungen der Lorentztransformationen	163
13.3 Lorentztransformationen für allgemeine \vec{u}	167
13.4 Minkowski-Raum und Vierervektoren	168
13.5 Eigenzeit	174
13.6 Eigenschaften von Lorentztransformationen	175
13.7 Hintereinanderausführen von Lorentztransformationen — Rapidity	178
13.8 Relativistische Dynamik	179
13.9 Lagrangefunktion der kräftefreien relativistischen Bewegung	183
13.10 Vierertensoren	185