

1 Einführung: Die Krise der Physik	1
1.1 Das schöne Universum	2
1.2 Theorien der Bewegung	5
1.2.1 Die Newtonsche Mechanik	6
1.2.2 Die Newtonsche Gravitationstheorie	6
1.2.3 Die Thermodynamik als Paradigma emergenter Theorien	7
1.2.4 Die Lagrangesche Mechanik	8
1.3 Die Übertragung von Kräften durch Felder	9
1.3.1 Die Maxwellsche Elektrodynamik	9
1.3.2 Die Theorie der Elektrogravitation	10
1.3.3 Die Teilchenvorstellung	12
1.4 Raum und Zeit	12
1.4.1 Spezielle Relativitätstheorie und Gravitation	13
1.5 Die Krümmung der Raumzeit durch Gravitation	14
1.6 Was kommt also?	16
2 Bewegungen von Teilchen	17
2.1 Der Aufbau der Materie aus Teilchen	18
2.2 Der Raum	19
2.2.1 Der Abstand	20
2.2.2 Sphärische Koordinaten	21
2.3 Bahnlinien oder Trajektorien	22
2.3.1 Geschwindigkeiten	22
2.3.2 Die Kinematik eines Teilchens	24
2.3.3 Beschleunigungen	26
2.3.4 Der freie Fall	27
2.3.5 Die Wurfparabel	29
2.3.6 Die Kinematik eines Teilchens II	30

2.4	Raum und Zeit	32
2.4.1	Die Voraussetzung für Kausalität	33
2.4.2	Der Minkowski-Raum	34
2.4.3	Die vierdimensionale Geschwindigkeit	35
2.4.4	Differentialrechnung in der Raumzeit	35
2.4.5	Koordinatentransformationen	36
2.4.6	Die Eigenzeit	37
2.5	Der relativistische Impuls	39
2.5.1	Teilchen mit Ruhemasse	40
2.5.2	Photonen	41
2.5.3	Anwendung: Der Compton-Effekt	43
2.5.4	Die Äquivalenz von Masse und Energie	45
2.6	Drehungen und Rotation	47
2.6.1	Die Kinematik der Kreisbewegung	47
2.6.2	Der Vektor der Winkelgeschwindigkeit	49
2.6.3	Exkurs: Zentrifugal- und Zentripetalbeschleunigung	50
2.6.4	Bewegungen in Polarkoordinaten	51
2.6.5	Rotationsmatrizen	52
2.6.6	Schiefssymmetrische Drehmatrizen	52
2.6.7	Impuls und Energie: Die Bewegungsgleichungen	54
2.7	Zusammenfassung und Ausblick	55
3	Gravitation	57
3.1	Die Quellen der Gravitation	57
3.1.1	Die Poissongleichung des Gravitationspotentials	59
3.1.2	Das Gravitationspotential einer kugelförmigen Masse	60
3.1.3	Das Gravitationspotential von Punktmassen	63
3.1.4	Der Gradient des reziproken Abstands	64
3.1.5	Das Gravitationsfeld der Erde	65
3.2	Bewegung unter Gravitationseinfluss	65
3.2.1	Die Bewegungsgleichungen	66
3.2.2	Die Nichterhaltung der Energie in der Punktmechanik	67
3.2.3	Die Drehimpulserhaltung im Zentralfeld	68
3.2.4	Das Newtonsche Gravitationsgesetz	69
3.3	Die Bewegungen der Planeten auf Ellipsen	71
3.3.1	Die Keplerschen Gesetze	72
3.3.2	Die Geometrie der Ellipse	72
3.3.3	Die Integration der Bewegungsgleichungen im Zentralfeld	74
3.3.4	Die Bahngeschwindigkeit der Planeten	77
3.3.5	Die Abhängigkeit der Gravitation vom Abstand	77
3.3.6	Das dritte Keplersche Gesetz	78

3.4	Unser Sonnensystem modellieren	80
3.5	Die Periheldrehung des Merkur	82
3.5.1	Der relativistische Term	85
3.5.2	Die Simulation der Perihelrotation des Merkurs	86
3.6	Das Zweikörper-Problem	87
3.6.1	Die Umlaufzeit	88
3.6.2	Die innere kinetische Energie des Systems	88
3.6.3	Die Bewegungen des Erde-Mond-Systems	89
3.6.4	Die Bewegung des Erde-Mond-Systems um die Sonne	90
3.7	Galaktische Gravitationspotentiale	93
3.8	Zusammenfassung	95
4	Elektrische Ladungen	97
4.1	Von der Reibungselektrizität zu den Quarks	97
4.2	Die Quellen des elektrischen Feldes	101
4.2.1	Das Gaußsche Gesetz des elektrischen Feldes	102
4.2.2	Lösung der Poissongleichung in MATLAB	105
4.2.3	Der Plattenkondensator	108
4.2.4	Das elektrische Dipolmoment	111
4.3	Bewegung im elektrischen Feld	113
4.3.1	Die elektrische Spannung	113
4.3.2	Die Impulsgleichungen	114
4.3.3	Das Coulombsche Gesetz	115
4.4	Der elektrische Strom	117
4.5	Elektromagnetismus und Gravitation: Ein Vergleich	119
5	Magnetische Wechselwirkungen	121
5.1	Elektromagnetische Wechselwirkungen	123
5.1.1	Analytische Lösung für einen geradlinigen Leiter	124
5.1.2	Das magnetische Feld	125
5.1.3	Das Durchflutungsgesetz der Magnetostatik	126
5.1.4	Das Biot-Savartsche Gesetz	129
5.1.5	2D-Magnetostatische Berechnungen mit MATLAB	130
5.2	Bewegungen im elektromagnetischen Feld	132
5.2.1	Magnetisches und neudefiniertes elektrisches Feld	133
5.2.2	Das Amperesche Gesetz	134
5.2.3	Bewegung einer Ladung im homogenen elektromagnetischen Feld	135
5.2.4	Die Trinität der elektrodynamischen Wechselwirkungen	139
5.3	Feldstärketensor und Maxwellgleichungen	140
5.3.1	Die Maxwellschen Gleichungen	142
5.3.2	Lorenzkonvention und inhomogene Wellengleichungen	143

5.4	Das magnetische Moment	145
5.4.1	Die rotierende homogen geladene Kugel	145
5.4.2	Polarlichter	148
5.4.3	Geladenes Teilchen auf einer Kreisbahn	152
5.4.4	Das gyromagnetische Verhältnis (g-Faktor)	154
5.4.5	Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkungen	155
5.5	Elektromagnetismus und Atombau	156
5.5.1	Das Elektron	157
5.5.2	Das Proton	159
5.5.3	Elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Protonen	160
5.5.4	Das von Bohr zu Rutherford geflippte Atommodell	162
5.5.5	Das erweiterte Rutherfordsche Atommodell	164
5.5.6	Emission und Absorption von Photonen	166
5.5.7	Die Spin-Bahn-Kopplung	167
5.6	Zusammenfassung und Ausblick	168
6	Gravitomagnetismus	171
6.1	Die Wellengleichungen des Gravitationsfeldes	171
6.1.1	Der Feldstärketensor der Gravitation	172
6.1.2	Das gravitomagnetostatische Feld rotierender Himmelskörper ...	175
6.2	Bewegung im gravitomagnetischen Feld	176
6.2.1	Gravity Probe B	177
6.2.2	Die invariante Ebene der Planetenbahnen	180
6.3	Die Dynamik des Photons im Gravitationsfeld	181
6.3.1	Die gravitative Rotverschiebung	183
6.3.2	Die Ablenkung des Lichts	187
6.4	Zusammenfassung	189
7	Retardierung	191
7.1	Die inhomogene Wellengleichung als grundlegende Feldgleichung	193
7.1.1	Greensche Funktionen als Lösungen	195
7.1.2	Das retardierte Potential eines Punktteilchens	197
7.1.3	Rechenregeln für retardierte Ableitungen	199
7.1.4	Retardierte elektrisches und magnetisches Feld	201
7.1.5	Das retardierte Magnetfeld einer rotierenden Kugel	202
7.2	Der Hertzsche Dipol	204
7.3	Retardierte Gravitation und Gravitationswellen	205
7.4	Das Gravitationspotential des Photons	209
7.4.1	Die Gravitationsfelder des Photons	210
7.4.2	Die Streuung von Photonen an Elektronen	211
7.5	Liénard-Wiechert-Potentiale	212

7.6	MATLAB-Programme zu retardierten Potentialen	216
7.6.1	Numerische Lösung der Wellengleichungen	216
7.6.2	Darstellung der retardierten Potentiale von Punktteilchen	219
8	Die Raumzeit als Kontinuum	223
8.1	Bilanzgleichungen von Erhaltungsgrößen	223
8.1.1	Die Kontinuitätsgleichung	225
8.1.2	Erhaltungsgrößen	226
8.2	Die Lagrangesche oder Bahnableitung	227
8.2.1	Die Eulersche und die Lagrangesche Betrachtungsweise	228
8.2.2	Die Lagrangesche Form der Impulsgleichungen	229
8.2.3	Die Energiebilanz in der Kontinuumsphysik	231
8.2.4	Die Eulergleichungen der Magnetohydrodynamik	232
8.3	Der Energie-Impuls-Tensor	233
8.3.1	Kinetische Energie	234
8.3.2	Thermische Energie und Temperatur	234
8.3.3	Der Druck	236
8.3.4	Das ideale Gas	237
8.3.5	Der hydrostatische Druck	238
8.4	Kräfte als Spannungen	238
8.4.1	Der Spannungstensor	239
8.4.2	Die Kraftwirkung von Spannungen	241
8.4.3	Der Spannungstensor in der Raumzeit	242
8.5	Der Maxwellsche Spannungstensor	242
8.5.1	Die Feldenergiedichten	244
8.5.2	Die Rückkopplung der Gravitation mit sich selbst	245
8.5.3	Flüsse von Feldenergie: Der Poynting-Flussvektor	247
8.5.4	Die Impulsbilanz in der Kontinuumsmechanik	248
8.6	Botenteilchen oder Felder?	250
9	Ausblick	253
	Literatur	257
	Stichwortverzeichnis	261