

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einführung 1
 - 1.1 Entwicklung der Orbitmechanik und Kosmologie2
 - 1.2 Kapitelübersicht7
- 2 Mathematische und physikalische Grundlagen 9
 - 2.1 Vektorrechnung9
 - 2.1.1 Definition und Eigenschaften eines Vektors10
 - 2.1.2 Vektoraddition und -subtraktion12
 - 2.1.3 Skalarmultiplikation und Skalarprodukt eines Vektors13
 - 2.1.4 Kreuzprodukt oder Vektorprodukt13
 - 2.1.5 Spatprodukt15
 - 2.2 Transformationsmatrizen15
 - 2.3 Differentialrechnung17
 - 2.3.1 Rechenregeln17
 - 2.3.2 Notationen18
 - 2.3.3 Extremstellen20
 - 2.3.4 Differentialgleichungen20
 - 2.4 Integralrechnung20
 - 2.4.1 Partielle Integration21
 - 2.4.2 Substitutionsregel22
 - 2.5 Newtonsche Mechanik22
- 3 Koordinatensysteme 25
 - 3.1 Koordinatenarten25
 - 3.1.1 Kartesische Koordinaten25
 - 3.1.2 Polarkoordinaten, Zylinderkoordinaten und Kugelkoordinaten25
 - 3.1.3 Koordinatentransformation27
 - 3.2 Drehung eines Koordinatensystems27
 - 3.2.1 Drehung mittels Rotationsmatrizen28
 - 3.2.2 Drehung mittels Quaternionen32
 - 3.3 Arten von Koordinatensystemen34
 - 3.3.1 Äquatorebene, Ekliptik und Frühlingspunkt34
 - 3.3.2 Erdzentrische Äquatoriale Koordinatensysteme35
 - 3.3.3 Erdzentrisches Ekliptikales Koordinatensystem35
 - 3.3.4 Topozentrisches System36
 - 3.3.5 Perifokale und VNC-Systeme36
 - 3.3.6 Heliozentrisches System37
 - 3.3.7 Himmelsäquator- und geografisches System37
 - 3.4 Das Sonnensystem als Beispiel37

4 Zeitsysteme	41
4.1 Sonnentag und Sterntag	42
4.2 Tropisches Jahr, Gregorianischer Kalender und Schaltjahre	44
4.3 Definierte Zeitsystematiken	45
4.3.1 Universal Time (UT)	45
4.3.2 International Atomic Time (TAI)	45
4.3.3 Coordinated Universal Time (UTC)	45
4.3.4 Julianisches und Modifiziertes Julianisches Datum	45
4.3.5 Sonnenwende	47
5 Gravitationspotential und Gravitationskraft	49
5.1 Das Gravitationsgesetz von Newton	49
5.2 Gravitationspotential	50
5.3 Gravitationspotential einer Kugel	52
5.4 Einordnung zur Realität am Beispiel Erde	54
6 Gleichungen des Zweikörperproblems	57
6.1 Die Kepler-Gesetze	57
6.2 Die Bewegungsgleichung des Zweikörperproblems	58
6.3 Energieerhaltung im Zweikörperproblem	60
6.4 Impulserhaltung im Zweikörperproblem	62
6.5 Bahngeometrie im Zweikörperproblem	63
6.5.1 Ellipse und Kreis	66
6.5.2 Parabel	68
6.5.3 Hyperbel	69
6.6 Gesamtenergie, Geschwindigkeiten und Umlaufperiode	71
6.6.1 Vis-Viva-Gleichung und Bahngeschwindigkeit	72
6.6.2 Kosmische Geschwindigkeiten	73
6.6.3 Umlaufperiode	75
6.7 Die klassischen Orbitalelemente	78
6.7.1 Definition der klassischen Orbitalelemente	78
6.7.2 Umrechnung zwischen Vektoren und Orbitalelementen	80
6.8 Die Keplergleichung	83
6.8.1 Grafische Herleitung über die Bahnform	83
6.8.2 Analytische Herleitung	87
6.8.3 Zusammenhang zwischen Position und Zeit für Hyperbel und Parabel	90
6.8.4 Anwendung der Keplergleichung	91
6.9 Das Zweikörperproblem und die Realität	95
7 Bahnänderung und Missionsplanung im Zweikörperproblem	99
7.1 Energiezustand und Änderung der Bahnenergie	99
7.2 Flucht von einer Kreisbahn	101
7.3 Hohmanntransfer	102
7.4 Sternfeldtransfer (Bielliptischer Transfer)	105
7.5 Anwendung der energieoptimalen Transferarten	108
7.5.1 Δv -Bedarf und günstigster Transfer	109
7.5.2 Rendezvous mittels Hohmanntransfer	111

7.6 Allgemeine Bahntransfers: Lamberts Problem.....	113
7.6.1 Herleitung der Gleichungen von Lamberts Problem.....	114
7.6.2 Anwendung des Lamberts Problems.....	116
7.6.3 Lamberts Problem und das Zweikörperproblem	118
7.7 Zusammengesetzte Kegelschnitte.....	118
7.7.1 Planetare Einflussosphären	119
7.7.2 Umwandlung der Größen zwischen den Systemen	121
7.7.3 Zusammensetzen der Kegelschnitte	122
7.7.4 Grenzen für zusammengesetzte Kegelschnitte.....	125
7.8 Bahnänderungen außerhalb der Ebene	125
7.8.1 Inklinationsänderung.....	126
7.8.2 Änderung der Knoten.....	127
7.9 Spezifischer Impuls und Raketengrundgleichung	128
7.9.1 Der massenspezifische Impuls	128
7.9.2 Die Ziolkowskigleichung	129
7.9.3 Näherung über eine Taylor-Entwicklung	131
7.9.4 Anwendung der Ziolkowskigleichung	132
8 Bahnarten und Bodenspuren	135
8.1 Weltraumumgebung der Erde.....	135
8.2 Typische Orbits und Bahntypen	136
8.2.1 Niedriger Erdorbit.....	136
8.2.2 Mittlerer Erdorbit	138
8.2.3 Geosynchroner und Geostationärer Orbit.....	138
8.2.4 Hoher Erdorbit und Hochelliptischer Orbit.....	140
8.2.5 Park- und Friedhofsorbits.....	140
8.2.6 Frozen Orbit	141
8.2.7 Konstellationen	141
8.3 Bodenspuren und ihre Bedeutung	142
9 Gleichungen des Mehrkörperproblems.....	147
9.1 Die Bewegungsgleichung des Mehrkörperproblems	148
9.2 Impulserhaltung im Mehrkörperproblem	149
9.3 Energieerhaltung im Mehrkörperproblem	149
9.4 Gleichung der relativen Bewegung	152
9.5 Eingeschränktes Dreikörperproblem und Jacobi-Integral	153
9.6 Nullgeschwindigkeitsflächen	157
9.7 Tisserandkriterium.....	158
9.8 Schwungholmanöver	160
9.9 Librationspunkte.....	164
10 Reale Bahnen	167
10.1 Methoden auf Basis des Zweikörperproblems.....	167
10.1.1 Cowell-Methode.....	168
10.1.2 Enckesche Methode	169
10.2 Änderung der Bahnelemente	172
10.2.1 Änderung der Halbachse	173
10.2.2 Änderung der Exzentrizität	175

10.2.3	Änderung der Inklination und Rektaszension	177
10.2.4	Änderung der wahren Anomalie	179
10.2.5	Änderung des Arguments des Perizentrums	180
10.2.6	Änderung des Zeitpunkts des Perizentrumsdurchgangs	181
10.2.7	Anwendung bei Bahnberechnungen	182
10.3	Änderung der Bahnelemente durch Abweichungen vom Kugelpotential	183
10.4	Numerische Integrationsverfahren	185
10.5	Bahnbestimmung und -korrektur	187
11	Niedrigschub: die Besonderen Bahnen	189
11.1	Definition und Bedeutung	189
11.2	Antriebsarten und Anwendungsfälle	191
11.2.1	Elektrothermische Triebwerke	192
11.2.2	Elektromagnetische Triebwerke	192
11.2.3	Elektrostatische Triebwerke	192
11.2.4	Segelantrieb	193
11.2.5	Historie wichtiger Missionen	193
11.3	Bahnberechnung	194
11.3.1	Berechnung des Δv über die Edelbaum-Gleichung	195
11.3.2	Berechnung der Schubdauer	197
11.4	Optimierungsmethoden	197
11.4.1	Diskretisierung	198
11.4.2	Bahnmodellierung	199
11.4.3	Suche nach der optimalen Lösung	200
12	Nicht-gravitativ Störungen und Einfluss der Satellitenlage	203
12.1	Beschreibung der Satellitenlage mit Quaternionen	204
12.2	Nicht-gravitativ Störungen	212
12.3	Berücksichtigung der Satellitengeometrie	213
12.4	Atmosphärischer Widerstand	214
12.5	Solardruck	218
12.6	Thermaldruck	222
12.7	Infrarot- und Albedodruck	225
I	Anhang	229
I.1	Daten der Himmelskörper	229
I.2	Übungsaufgaben	230
	Aufgabe 1: Bezugssysteme	230
	Lösung Aufgabe 1	231
	Aufgabe 2: Zweikörperproblem	234
	Lösung Aufgabe 2	235
	Aufgabe 3: Bahnen mit Antrieb und Keplergleichung	238
	Lösung Aufgabe 3	239
	Aufgabe 4: Bezugssysteme Keplergleichung und Sonneneklipsen	243
	Aufgabe 5: Quaternionentransformation	244
	Aufgabe 6: Bahnform, Raketengrundgleichung und Rotation	245
	Aufgabe 7: Besondere Bahnen und Keplergleichung	246
	Aufgabe 8: Bahnform, Raketengrundgleichung und Rotation	247

Aufgabe 9: Bodenspuren und Bahnen mit Antrieb	248
Aufgabe 10: Keplergleichung und Bahnen mit Antrieb	249
Aufgabe 11: Bahntransfer und -geschwindigkeiten.....	250
Aufgabe 12: Bahnenergie und Keplergleichung.....	251
Aufgabe 13: Koordinatentransformation.....	252

II Abbildungsverzeichnis	253
---------------------------------------	------------

III Tabellenverzeichnis	255
--------------------------------------	------------

IV Abkürzungsverzeichnis	256
---------------------------------------	------------

V Schlagwortverzeichnis	258
--------------------------------------	------------