

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
1.1 EINFÜHRUNG	1
1.2 GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG	3
1.2.1 Frühe Entwicklungsphase (vorchristliche Zeit bis 1900)	3
1.2.2 Die Phase der ideenreichen Literaten (1865–1927).....	4
1.2.3 Die Phase der „enthusiastischen Ingenieure“ (1895–1935).....	4
1.2.4 Die Phase der vorsichtigen Akzeptanz (1935 – 1957).....	5
1.2.5 Die Phase der operationellen Raumfahrt (ab 04.10.1957).....	5
1.3 RAUMFAHRTNUTZUNG HEUTE UND MORGEN	6
1.3.1 Überwachung, Erforschung und Erhaltung der terrestrischen Umwelt	7
1.3.2 Verbesserung der Infrastruktur in Verkehr und Kommunikation.....	11
1.3.3 Erkundung des Weltraums	14
1.3.4 Nutzung der Weltraumumgebung	16
1.4 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ DER RAUMFAHRTTECHNIK UND -NUTZUNG	19
1.5 RAUMSTATIONEN	23
1.6 MÖGLICHE MISSIONEN NACH DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION.....	31
2 DIE ZIOLKOWSKY-RAKETENGLEICHUNG	33
2.1 DIE ANNAHME DES SCHWEREFREIEN RAUMES	33
2.2 IMPULSGLEICHUNG DER RAKETE	34
2.3 WICHTIGE IMPULSDEFINITIONEN	37
2.3.1 Der Gesamtimpuls	37
2.3.2 Der spezifische Impuls.....	37
2.4 LEISTUNGS- ODER ENERGIEWIRKUNGSGRAD.....	38
2.4.1 Gesamtwirkungsgrad, innerer und äußerer Wirkungsgrad	38
2.4.2 Der integrale oder mittlere äußere Wirkungsgrad	39
2.5 EIN- UND MEHRSTUFIGE CHEMISCHE TRÄGERRAKETEN.....	41
2.5.1 Grenzen einstufiger chemischer Raketen.....	41
2.5.2 Stufenprinzip und Arten der Raketenstufungen.....	43
2.5.3 Tandemstufung	44
2.5.4 Parallel-Stufung	52
2.6 STUFENOPTIMIERUNG (TANDEMSTUFUNG).....	62

3 GRUNDLAGEN DER BAHNMECHANIK	65
3.1 BEGRIFFE UND ANWENDUNGSBEREICHE	65
3.2 KEPLERS GESETZE UND NEWTONS ERGÄNZUNGEN.....	66
3.3 DIE VIS-VIVA-GLEICHUNG	71
3.3.1 Definitionen	71
3.3.2 Drehimpulserhaltung - Masse im zentralen Kraftfeld	71
3.3.3 Konservatives Kraftfeld und Energieerhaltung	73
3.3.4 Masse im Gravitationsfeld	74
3.3.5 Gravitationsbeschleunigung an der Erdoberfläche	75
3.3.6 Energien im Gravitationsfeld und Vis-Viva-Gleichung	76
3.4 ALLGEMEINE LÖSUNG DER VIS-VIVA-GLEICHUNG	78
3.5 WICHTIGE ERGEBNISSE AUS DER VIS-VIVA-GLEICHUNG	82
3.5.1 Umlaufzeiten für geschlossene Bahnen	82
3.5.2 Erste kosmische Geschwindigkeit	83
3.5.3 Zweite kosmische Geschwindigkeit (Fluchtgeschwindigkeit)	84
3.5.4 Minimaler Energiebedarf bei einem Start von der Erdoberfläche	85
3.6 BESCHREIBUNG VON FLUGKÖRPERBAHNEN	87
3.6.1 Koordinatensysteme und Darstellung von Umlaufbahnen	87
3.6.2 Die klassischen Bahnelemente.....	93
3.6.3 Ausgewählte Umlaufbahnen	93
3.7 ANWENDUNG VON ELLIPSENBAHNEN	98
3.7.1 Zeit entlang einer Keplerbahn.....	98
3.7.2 Ballistische Flugbahnen zwischen zwei Erdpunkten	101
4 MANÖVER ZUR BAHNÄNDERUNG.....	105
4.1 EINFÜHRENDE BEMERKUNGEN	105
4.2 MANÖVER MIT IMPULSIVEN SCHUBPHASEN	106
4.2.1 Definitionen	106
4.2.2 Allgemeine Betrachtung	107
4.2.3 Abhängigkeit des Antriebsbedarfs von der Verteilung der Schubphasen ...	108
4.2.4 Hohmann-Übergänge	111
4.2.5 Dreiimpuls-Übergänge (bielliptische Übergänge).....	116
4.2.6 Inklinationsänderung.....	117
4.3 BAHNEN MIT ENDLICHEN SCHUBPHASEN.....	118
4.3.1 Richtungsänderung in konstanter Höhe	118
4.3.2 Aufspiralen.....	120
4.4 AUFSTIEGSBAHNEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON VERLUSTEN	124
4.5 RENDEZVOUS- UND ANDOCKMANÖVER	131
4.5.1 Problemstellung	132

4.5.2	Flugphasen	134
4.5.3	Die Bewegungsgleichungen für das Rendezvous-Problem	135
4.5.4	Restbeschleunigung in einem Raumfahrzeug	140
4.5.5	Ankoppeln (Docking) und Landung auf einem Planeten.....	141
4.6	GRAVITY-ASSIST- ODER SWINGBY-MANÖVER.....	142
4.6.1	Zur Entwicklung der Gravity-Assist-Technologie.....	142
4.6.2	Übergang vom heliozentrischen ins planetenfeste System.....	142
4.6.3	Berechnung der Geschwindigkeitsänderung.....	145
4.6.4	Maximaler Energiegewinn im heliozentrischen System.....	147
4.6.5	Maximierung der Austrittsgeschwindigkeit.....	149
4.7	SONNENSEGEL	151
4.8	TETHERS (SEILE) IM GRAVITATIONSFELD	155
4.8.1	Der Gravitationsgradient.....	156
4.8.2	Schwingungsverhalten und Störkräfte	159
4.8.3	Bahnmechanische Anwendung.....	160
4.8.4	Elektrodynamische (leitende) Seile	162
4.8.5	Konstellationen und künstliche Schwerkraft.....	165
4.9	ZAHLENWERTE FÜR VERSCHIEDENE MISSIONEN	166
5	THERMISCHE RAKETEN.....	169
5.1	EINTEILUNG.....	169
5.1.1	Methoden der Treibstoffheizung	169
5.1.2	Thermische Raketen mit geschlossener Heiz- oder Brennkammer	171
5.1.3	Thermische Raketen ohne geschlossene Heizkammer	173
5.2	BEMERKUNGEN ÜBER DIE VORGÄNGE IN THERMISCHEN RAKETEN	175
5.3	RAKETENSCHUB – DETAILS	180
5.4	ERGEBNISSE AUS DER ENERGIEGLEICHUNG.....	181
5.5	IDEALISIERTE RAKETE MIT IDEALEM GAS ALS TREIBSTOFF	185
5.5.1	Grundgleichungen der eindimensionalen reibungsfreien Strömung.....	185
5.5.2	Bestimmung der Lavalbedingungen	187
5.5.3	Abhängigkeiten von der Querschnittsänderung.....	188
5.6	IDEALE RAKETE.....	189
5.6.1	Massenstrom und Schub einer idealen Rakete	191
5.6.2	Spezifischer Impuls einer idealen Rakete	193
5.6.3	Wirkungsgrad des idealen Triebwerks	194
5.6.4	Einfluss des Flächenverhältnisses auf den Schub.....	195
5.6.5	„Abgesägte“ Düse.....	196
5.7	REALE (VERLUSTBEHAFTETE) DÜSEN.....	198
5.7.1	Mechanische Verluste.....	198

5.7.2 Thermische Verluste	202
5.7.3 Chemische Verluste	202
5.8 CHEMISCHE RAKETENTREIBSTOFFE	204
5.8.1 Theoretische Leistungen chemischer Raketentreibstoffe	204
5.8.2 Treibstoffauswahl	204
5.9 ANTRIEBSSYSTEME CHEMISCHER RAKETEN	207
5.9.1 Einteilung nach dem Aggregatzustand der Treibstoffe	207
5.9.2 Einteilung nach dem spezifischen Impuls	208
5.9.3 Einteilung nach der Zahl der Treibstoffkomponenten	209
5.9.4 Einteilung nach sonstigen Betriebsparametern	213
5.9.5 Einteilung nach Art der Anwendung	214
5.9.6 Komponenten und Prozesse	215
6 ELEKTRISCHE ANTRIEBE	229
6.1 DEFINITION	229
6.2 VORTEILE ELEKTRISCHER ANTRIEBE	230
6.3 WIDERSTANDSBEHEIZTE TRIEBWERKE (RESISTOJET)	232
6.4 GRUNDLAGEN FÜR LICHTBOGENTRIEBWERKE	234
6.5 ELEKTROTHERMISCHE LICHTBOGENTRIEBWERKE (ARCJETS)	236
6.6 MAGNETOPLASMADYNAMISCHE TRIEBWERKE	238
6.6.1 Eigenfeldbeschleuniger	238
6.6.2 Fremdfeldbeschleuniger	240
6.6.3 Hallionenbeschleuniger	242
6.7 ELEKTROSTATISCHE TRIEBWERKE	242
6.7.1 Grundlagen zu elektrostatischen Triebwerken	244
6.7.2 Kaufman-Triebwerk	245
6.7.3 RIT-Triebwerk	245
6.7.4 Feldemissions-Triebwerk	246
7 ANTRIEBSSYSTEME FÜR DIE LAGE- UND BAHNREGELUNG	247
7.1 EINFÜHRUNG	247
7.2 ABGRENZUNG DER SEKUNDÄR- GEGENÜBER DEN PRIMÄRSYSTEMEN	248
7.3 AUFGABEN UND ANFORDERUNGEN	253
7.4 DIE LAGEREGELUNG VON RAUMFAHRZEUGEN	254
7.4.1 Die Eulerschen Gleichungen	254
7.4.2 Aufgaben der Lageregelung, Stabilisierungsarten, Stellglieder	255
7.4.3 Anforderungen der Drallstabilisierung	258

7.4.4 Anforderungen der Dreiachsenstabilisierung	263
7.5 BAHNREGELUNG UND BAHNKORREKTUR	267
7.5.1 Übersicht	267
7.5.2 Kompensation von Injektionsfehlern und Positionierung	267
7.5.3 Bahnregelung geostationärer Satelliten	270
7.6 SYSTEMANFORDERUNGEN.....	275
7.7 ARTEN SEKUNDÄRER ANTRIEBSSYSTEME	277
7.8 VERGLEICH DER WICHTIGSTEN TRIEBWERKSSYSTEME	282
8 ENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN.....	285
8.1 ALLGEMEIN	285
8.1.1 Leistungsbedarf von Raumfahrzeugen.....	285
8.1.2 Mögliche Energiesysteme für Raumfahrtzwecke	286
8.1.3 Typische Missionen und deren Erfordernisse.....	291
8.1.4 Einfluss der Schattenphase auf solare Energieversorgungssysteme.....	293
8.2 ÜBERSICHT ÜBER KURZZEIT-ANLAGEN.....	296
8.2.1 Primärzellen	296
8.2.2 Sekundärzellen.....	297
8.3 ÜBERSICHT ÜBER LANGZEIT-ANLAGEN	301
8.3.1 Solarzellenanlagen	301
8.3.2 Das Prinzip der Solarzelle.....	301
8.3.3 Ausgeführte Anlagen	303
8.3.4 Nukleare Anlagen	306
8.3.5 Thermoelektrische Wandlung.....	306
8.3.6 Radioisotopenbatterien	308
8.3.7 Nukleare Reaktoren	310
8.4 ANDERE UNTERSUCHTE ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEME.....	313
8.4.1 Solardynamische Energieversorgungsanlagen.....	313
8.4.2 Vergleich Photovoltaik - Solardynamik für eine Raumstation	315
8.4.3 Solare Kraftwerksatelliten	318
9 THERMALKONTROLLSYSTEME	319
9.1 GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH STRAHLUNG.....	319
9.1.1 Der schwarze Strahler	319
9.1.2 Optische Eigenschaften von Materialien	321
9.1.3 Graue Strahler und technische Oberflächen	322
9.2 UMWELTBEDINGUNGEN	325
9.2.1 Solarstrahlung	325
9.2.2 Albedostrahlung.....	327

9.2.3 Erdeigenstrahlung	328
9.2.4 Aerodynamische Aufheizung.....	329
9.3 ENTWURF VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN	330
9.4 THERMALANALYSE	333
9.4.1 Durchführung von Thermalanalysen	333
9.4.2 Wärmebilanz.....	335
9.4.3 Gleichgewichtstemperaturen	336
9.4.4 Mathematische Modellierung	337
9.4.5 Thermische Massen	339
9.4.6 Wärmetransportmechanismen.....	340
9.4.7 Formfaktoren, Strahlungskopplungen.....	341
9.4.8 Software-Werkzeuge.....	342
9.5 ARTEN VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN.....	343
9.5.1 Passive Thermalkontrolle	343
9.5.2 Aktive Thermalkontrolle.....	349
9.6 THERMALTESTS	354
10 RAUMTRANSPORTSYSTEME.....	357
10.1 EINLEITUNG.....	357
10.2 MOMENTANER STAND.....	357
10.2.1 Überblick.....	357
10.2.2 Einteilungskriterien von Trägerraketen	368
10.3 DAS ARIANE–PROGRAMM.....	368
10.4 ZUSAMMENFASSUNG EXISTIERENDER STARTFAHRZEUGE	373
10.5 ZUKÜNFTIGE PROJEKTE FÜR RAUMTRANSPORTFAHRZEUGE	373
10.5.1 Gegenwärtiger Status und laufende Projekte.....	373
10.5.2 Studien über zukünftige Raumtransportsysteme	375
10.5.3 Missionen für die zukünftigen Raumtransportsysteme.....	379
10.5.4 Konzepte für zukünftige europäische Transportsysteme.....	381
10.5.5 Startkosten für zukünftige Startfahrzeuge	382
10.5.6 Technologieentwicklungen und langfristige Zielsetzung	387
11 DER EINTRITT VON FAHRZEUGEN IN DIE ATMOSPHÄRE.....	389
11.1 EINLEITUNG.....	389
11.2 FLUGBEREICHE.....	391
11.2.1 Wiedereintrittsflugprofile	391
11.2.2 Strömungsbereiche.....	391
11.3 FLUGBEREICHSBESCHRÄNKUNGEN UND FAHRZEUGANFORDERUNGEN.....	393

11.4 WÄRMESCHUTZMETHODEN.....	398
11.5 BALLISTISCHER UND SEMIBALLISTISCHER WIEDEREINTRITT	398
11.5.1 Wiedereintrittsflüge ohne Auftrieb.....	398
11.5.2 Wiedereintrittsflüge mit Auftrieb	401
11.6 WIEDEREINTRITT VON GEFLÜGELTEN GLEITFAHRZEUGEN.....	405
11.7 AERODYNAMISCHE ORBIT-TRANSFERFAHRZEUGE (AOTV)	412
11.7.1 Einleitung.....	412
11.7.2 Aerodynamische Orbit Transfer Fahrzeuge für erdnahe Bahnen	412
11.7.3 Synergetische Bahndrehmanöver.....	421
11.7.4 Planetenmissionen	423
11.7.5 Technologieaspekte der Aeroassist-Konzepte	426
12 DATEN- UND KOMMUNIKATIONSSYSTEME	427
12.1 EINLEITUNG.....	427
12.2 DATENMANAGEMENTSYSTEM.....	428
12.3 ÜBERTRAGUNGSTRECKEN ZU DEN RAUMSTATIONEN	429
12.4 VERTEILTE DATENSYSTEME	431
12.4.1 Netz-Topologien	432
12.4.2 Physikalische Datenverbindungen	433
12.4.3 Software und Programmiersprachen.....	433
12.5 AUSLEGUNG DER FUNKSYSTEME	435
12.6 ANTENNEN	439
12.7 MODULATION UND CODIERUNG.....	442
12.8 DAS TDRS-SYSTEM	445
13 UMWELTFAKTOREN.....	449
13.1 EINFÜHRUNG	449
13.2 GRAVITATIONSFELDER.....	449
13.2.1 Gravitationsfeld in größerem Abstand von einem Zentralkörper	449
13.2.2 Gravitationsfeld in der Nähe eines Zentralkörpers	451
13.2.3 Entwicklung des Gravitationspotentials nach Kugelfunktionen.....	452
13.3 MAGNETFELDER.....	453
13.3.1 Das magnetische Dipolfeld.....	453
13.3.2 Das Magnetfeld der Sonne.....	454
13.3.3 Das Magnetfeld der Erde	455
13.4 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG	458

13.5 ATMOSPHERE	459
13.6 FESTE MATERIE.....	462
13.7 DAS SONNENSYSTEM	465
13.7.1 Die Sonne.....	465
13.7.2 Die Planeten.....	465
13.7.3 Die Planetoiden.....	469
13.7.4 Die Monde	470
13.7.5 Die Kometen	473
ANHANG A GESCHICHTLICHE DATEN	475
A.1 FRÜHE ENTWICKLUNGSPHASE (VORCHRISTLICHE ZEIT BIS 1900).....	475
A.2 PHASE DER IDEENREICHEN LITERATEN (1865–1927)	478
A.3 PHASE DER „ENTHUSIASTISCHEN INGENIEURE“ (1895–1935)	478
A.4 PHASE DER VORSICHTIGEN AKZEPTANZ (1935 – 1957).....	480
A.5 PHASE DER OPERATIONELLEN RAUMFAHRT (AB 04.10.1957).....	481
B ÜBUNGSAUFGABEN	493