

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	10
1.3.3 Erkundung des Weltraums	13
1.3.4 Nutzung der Weltraumumgebung	16
1.4 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ DER RAUMFAHRTTECHNIK UND -NUTZUNG ..	18
1.5 VOM SPACELAB ÜBER DIE MIR-STATION ZUR ISS	22
1.6 MÖGLICHE MISSIONEN NACH DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION	31
2 DIE ZIOLKOWSKY-RAKETENGLEICHUNG	39
2.1 DIE ANNAHME DES SCHWEREFREIEN RAUMES	39
2.2 IMPULSGLEICHUNG DER RAKETE	40
2.3 WICHTIGE IMPULSDEFINITIONEN	43
2.3.1 Der Gesamtimpuls	43
2.3.2 Der spezifische Impuls	43
2.4 LEISTUNGS- ODER ENERGIEWIRKUNGSGRAD	44
2.4.1 Gesamtwirkungsgrad, innerer und äußerer Wirkungsgrad	44
2.4.2 Der integrale oder mittlere äußere Wirkungsgrad	45
2.5 EIN- UND MEHRSTUFIGE CHEMISCHE TRÄGERRAKETEN	47
2.5.1 Grenzen einstufiger chemischer Raketen	47
2.5.2 Stufenprinzip und Arten der Raketenstufungen	49
2.5.3 Tandemstufung	50
2.5.4 Parallel-Stufung	58
2.6 STUFENOPTIMIERUNG (TANDEMSTUFUNG)	68
3 GRUNDLAGEN DER BAHNMECHANIK	71
3.1 BEGRIFFE UND ANWENDUNGSBEREICHE	71
3.2 KEPLERS GESETZE UND NEWTONS ERGÄNZUNGEN	72
3.3 DIE VIS-VIVA-GLEICHUNG	77
3.3.1 Definitionen	77

3.3.2 Drehimpulserhaltung – Masse im zentralen Kraftfeld.....	77
3.3.3 Konservatives Kraftfeld und Energieerhaltung	79
3.3.4 Masse im Gravitationsfeld	80
3.3.5 Gravitationsbeschleunigung an der Erdoberfläche	80
3.3.6 Energien im Gravitationsfeld und Vis-Viva-Gleichung	81
3.4 ALLGEMEINE LÖSUNG DER VIS-VIVA-GLEICHUNG	83
3.5 WICHTIGE ERGEBNISSE AUS DER VIS-VIVA-GLEICHUNG.....	87
3.5.1 Umlaufzeiten für geschlossene Bahnen.....	87
3.5.2 Erste kosmische Geschwindigkeit	88
3.5.3 Zweite kosmische Geschwindigkeit (Fluchtgeschwindigkeit)	89
3.5.4 Minimaler Energiebedarf bei einem Start von der Erdoberfläche.....	90
3.6 ALTERNATIVE HERLEITUNG DER GRUNDGLEICHUNGEN	92
3.6.1 Die Bewegungsgleichung für ein Zweikörperproblem.....	92
3.6.2 Die Drehimpulserhaltung.....	93
3.6.3 Die Vis-Viva-Gleichung.....	94
3.6.4 Die Kegelschnittgleichung.....	95
3.6.5 Das Dreikörperproblem	96
3.6.6 Das n-Körperproblem	98
3.7 BESCHREIBUNG VON FLUGKÖRPERBAHNEN.....	99
3.7.1 Koordinatensysteme und Darstellung von Umlaufbahnen	99
3.7.2 Die klassischen Bahnelemente.....	105
3.7.3 Ausgewählte Umlaufbahnen.....	105
3.8 ANWENDUNG VON ELLIPSENBAHNEN	110
3.8.1 Zeit entlang einer Keplerbahn	110
3.8.2 Ballistische Flugbahnen zwischen zwei Erdpunkten.....	113
4 MANÖVER ZUR BAHNÄNDERUNG.....	117
4.1 EINFÜHRENDE BEMERKUNGEN	117
4.2 MANÖVER MIT IMPULSIVEN SCHUBPHASEN	118
4.2.1 Definitionen	118
4.2.2 Allgemeine Betrachtung	119
4.2.3 Abhängigkeit des Antriebsbedarfs von Verteilung Schubphasen	120
4.2.4 Hohmann-Übergänge.....	123
4.2.5 Dreiimpuls-Übergänge (bielliptische Übergänge).....	128
4.2.6 Inklinationsänderung	129
4.3 BAHNEN MIT ENDLICHEN SCHUBPHASEN	130
4.3.1 Richtungsänderung in konstanter Höhe.....	130
4.3.2 Aufspiralen.....	132
4.4 AUFSTIEGSBAHNEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON VERLUSTEN	136
4.5 RENDEZVOUS- UND ANDOCKMANÖVER.....	143
4.5.1 Problemstellung	144
4.5.2 Flugphasen	146
4.5.3 Die Bewegungsgleichungen für das Rendezvous-Problem.....	147

4.5.4 Restbeschleunigung in einem Raumfahrzeug	152
4.5.5 Ankoppeln (Docking) und Landung auf einem Planeten	153
4.6 GRAVITY-ASSIST- ODER SWINGBY-MANÖVER	154
4.6.1 Zur Entwicklung der Gravity-Assist-Technologie	154
4.6.2 Übergang vom heliozentrischen ins planetenfeste System.....	154
4.6.3 Berechnung der Geschwindigkeitsänderung	157
4.6.4 Maximaler Energiegewinn im heliozentrischen System	159
4.6.5 Maximierung der Austrittsgeschwindigkeit	161
4.7 SONNENSEGEL	163
4.8 TETHERS (SEILE) IM GRAVITATIONSFELD	167
4.8.1 Der Gravitationsgradient	167
4.8.2 Schwingungsverhalten und Störkräfte	171
4.8.3 Bahnmechanische Anwendung.....	171
4.8.4 Elektrodynamische (leitende) Seile	174
4.8.5 Konstellationen und künstliche Schwerkraft	176
4.9 ZAHLENWERTE FÜR VERSCHIEDENE MISSIONEN.....	178
5 THERMISCHE RAKETEN.....	181
5.1 EINTEILUNG	181
5.1.1 Methoden der Treibstoffheizung	181
5.1.2 Thermische Raketen mit geschlossener Heiz- oder Brennkammer ...	183
5.1.3 Thermische Raketen ohne geschlossene Heizkammer	185
5.2 BEMERKUNGEN ÜBER DIE VORGÄNGE IN THERMISCHEN RAKETEN.....	187
5.3 RAKETENSCHUB – DETAILS	192
5.4 ERGEBNISSE AUS DER ENERGIEGLEICHUNG	193
5.5 IDEALISIERTE RAKETE MIT IDEALEM GAS ALS TREIBSTOFF	197
5.5.1 Grundgleichungen der eindimensionalen reibungsfreien Strömung .	197
5.5.2 Bestimmung der Lavalbedingungen	199
5.5.3 Abhängigkeiten von der Querschnittsänderung.....	200
5.6 IDEALE RAKETE	201
5.6.1 Massenstrom und Schub einer idealen Rakete	203
5.6.2 Spezifischer Impuls einer idealen Rakete	205
5.6.3 Wirkungsgrad des idealen Triebwerks	206
5.6.4 Einfluss des Flächenverhältnisses auf den Schub.....	207
5.6.5 „Abgesägte“ Düse.....	208
5.7 REALE (VERLUSTBEHAFTETE) DÜSEN.....	210
5.7.1 Mechanische Verluste	210
5.7.2 Thermische Verluste	214
5.7.3 Chemische Verluste	214
5.8 CHEMISCHE RAKETENTREIBSTOFFE.....	216
5.8.1 Theoretische Leistungen chemischer Raketentreibstoffe	216
5.8.2 Treibstoffauswahl	216

5.9 ANTRIEBSSYSTEME CHEMISCHER RAKETEN.....	219
5.9.1 Einteilung nach dem Aggregatzustand der Treibstoffe	219
5.9.2 Einteilung nach dem spezifischen Impuls	220
5.9.3 Einteilung nach der Zahl der Treibstoffkomponenten.....	221
5.9.4 Einteilung nach sonstigen Betriebsparametern.....	225
5.9.5 Einteilung nach Art der Anwendung	226
5.9.6 Komponenten und Prozesse.....	227
6 ELEKTRISCHE ANTRIEBE	241
6.1 DEFINITION	241
6.2 VORTEILE ELEKTRISCHER ANTRIEBE	242
6.3 WIDERSTANDSBEHEIZTE TRIEBWERKE (RESISTOJET)	244
6.4 GRUNDLAGEN FÜR LICHTBOGENTRIEBWERKE	246
6.5 ELEKTROTHERMISCHE LICHTBOGENTRIEBWERKE (ARCJETS).....	248
6.6 MAGNETOPLASMADYNAMISCHE TRIEBWERKE	250
6.6.1 Eigenfeldbeschleuniger.....	250
6.6.2 Fremdfeldbeschleuniger.....	252
6.6.3 Hallionenbeschleuniger	254
6.7 ELEKTROSTATISCHE TRIEBWERKE.....	254
6.7.1 Grundlagen zu elektrostatischen Triebwerken	256
6.7.2 Kaufman-Triebwerk.....	257
6.7.3 RIT-Triebwerk	257
6.7.4 Feldemissions-Triebwerk.....	258
6.8 UNKONVENTIONELLE KONZEPTE ELEKTRISCHER RAUMFAHRTANTRIEBE...	259
7 ANTRIEBSSYSTEME FÜR DIE LAGE- UND BAHNREGELUNG.....	261
7.1 EINFÜHRUNG	261
7.2 ABGRENZUNG DER SEKUNDÄR- GEGENÜBER DEN PRIMÄRSYSTEMEN.....	262
7.3 AUFGABEN UND ANFORDERUNGEN	267
7.4 DIE LAGEREGELUNG VON RAUMFAHRZEUGEN	268
7.4.1 Die Eulerschen Gleichungen	268
7.4.2 Aufgaben der Lageregelung, Stabilisierungsarten, Stellglieder	269
7.4.3 Anforderungen der Drallstabilisierung	272
7.4.4 Anforderungen der Dreiaachsenstabilisierung	277
7.5 BAHNREGELUNG UND BAHNKORREKTUR.....	281
7.5.1 Übersicht.....	281
7.5.2 Kompensation von Injektionsfehlern und Positionierung	281
7.5.3 Bahnregelung geostationärer Satelliten	284
7.6 SYSTEMANFORDERUNGEN	289
7.7 ARTEN SEKUNDÄRER ANTRIEBSSYSTEME.....	291
7.8 VERGLEICH DER WICHTIGSTEN TRIEBWERKSSYSTEME	296

8 ENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN.....	299
8.1 ALLGEMEIN	299
8.1.1 Leistungsbedarf von Raumfahrzeugen	299
8.1.2 Mögliche Energiesysteme für Raumfahrtzwecke	300
8.1.3 Typische Missionen und Erfordernisse	305
8.1.4 Einfluss der Schattenphase auf solare Energieversorgungssysteme..	307
8.2 ÜBERSICHT ÜBER KURZZEIT-ANLAGEN	310
8.2.1 Primärzellen.....	310
8.2.2 Sekundärzellen.....	311
8.3 ÜBERSICHT ÜBER LANGZEIT-ANLAGEN.....	313
8.3.1 Solarzellenanlagen	313
8.3.2 Das Prinzip der Solarzelle	313
8.3.3 Ausgeführte Anlagen	315
8.3.4 Nukleare Anlagen	318
8.3.5 Thermoelektrische Wandlung.....	318
8.3.6 Radioisotopenbatterien	320
8.3.7 Nukleare Reaktoren	322
8.4 ANDERE UNTERSUCHTE ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEME.....	325
8.4.1 Solardynamische Energieversorgungsanlagen	325
8.4.2 Vergleich Photovoltaik – Solardynamik für eine Raumstation	327
8.4.3 Solare Kraftwerksatelliten	330
9 THERMALKONTROLLSYSTEME	331
9.1 GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH STRAHLUNG	331
9.1.1 Der schwarze Strahler.....	331
9.1.2 Optische Eigenschaften von Materialien	333
9.1.3 Graue Strahler und technische Oberflächen	334
9.2 UMWELTBEDINGUNGEN.....	337
9.2.1 Solarstrahlung	337
9.2.2 Albedostrahlung.....	339
9.2.3 Erdeigenstrahlung	340
9.2.4 Aerodynamische Aufheizung	341
9.3 ENTWURF VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN.....	343
9.4 THERMALANALYSE.....	345
9.4.1 Durchführung von Thermalanalysen	345
9.4.2 Wärmebilanz.....	347
9.4.3 Gleichgewichtstemperaturen	348
9.4.4 Mathematische Modellierung	349
9.4.5 Thermische Massen	351
9.4.6 Wärmetransportmechanismen.....	352
9.4.7 Formfaktoren, Strahlungskopplungen	353
9.4.8 Software-Werkzeuge	354
9.5 ARTEN VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN	355

9.5.1 Passive Thermalkontrolle	355
9.5.2 Aktive Thermalkontrolle.....	361
9.6 THERMALTESTS	366
10 RAUMTRANSPORTSYSTEME.....	369
10.1 EINLEITUNG.....	369
10.2 MOMENTANER STAND	371
10.2.1 Überblick	371
10.2.2 China.....	379
10.2.3 Europa.....	379
10.2.4 Indien	381
10.2.5 Japan	381
10.2.6 Russland.....	383
10.2.7 USA	384
10.3 DAS ARIANE-PROGRAMM.....	387
10.3.1 Ariane 1-4	388
10.3.2 Ariane 5.....	389
10.3.3 Ariane 6.....	396
10.4 AKTUELLE UND ZUKÜNFTIGE PROJEKTE IN DEN USA.....	397
10.4.1 NASA's geplantes Constellation- und Folgeprogramm	397
10.4.2 Privatisierung des Raumtransports am Beispiel von SpaceX.....	401
10.5 STUDIEN ÜBER ZUKÜNFTIGE RAUMTRANSPORTSYSTEME.....	403
11 DER EINTRITT VON FAHRZEUGEN IN DIE ATMOSPHERE.....	415
11.1 EINLEITUNG.....	415
11.2 FLUGBEREICHE	417
11.2.1 Wiedereintrittsflugprofile	417
11.2.2 Strömungsbereiche.....	417
11.3 FLUGBEREICHBSCHRÄNKUNGEN UND FAHRZEUGANFORDERUNGEN	419
11.4 WÄRMESCHUTZMETHODEN	424
11.5 BALLISTISCHER UND SEMIBALLISTISCHER WIEDEREINTRITT	425
11.5.1 Wiedereintrittsflüge ohne Auftrieb.....	425
11.5.2 Wiedereintrittsflüge mit Auftrieb	425
11.6 WIEDEREINTRITT VON GEFLÜGELTEN GLEITFAHRZEUGEN	431
11.7 AERODYNAMISCHE ORBIT-TRANSFERFAHRZEUGE (AOTV).....	438
11.7.1 Einleitung.....	438
11.7.2 Aerodynamische Orbit Transfer Fahrzeuge für erdnahe Bahnen	438
11.7.3 Synergetische Bahndrehmanöver	442
11.7.4 Planetenmissionen	444
11.7.5 Technologieaspekte der Aeroassist-Konzepte.....	446

12 DATEN- UND KOMMUNIKATIONSSYSTEME	447
12.1 EINLEITUNG	447
12.2 DATENMANAGEMENTSYSTEM.....	448
12.3 ÜBERTRAGUNGSSTRECKEN ZU DEN RAUMSTATIONEN	449
12.4 VERTEILTE DATENSYSTEME	451
12.4.1 Netz-Topologien	452
12.4.2 Physikalische Datenverbindungen.....	453
12.4.3 Software und Programmiersprachen.....	453
12.5 AUSLEGUNG DER FUNKSYSTEME	455
12.6 ANTENNEN.....	459
12.7 MODULATION UND CODIERUNG.....	462
12.8 DAS TDRS-SYSTEM	465
13 UMWELTFAKTOREN.....	469
13.1 EINFÜHRUNG	469
13.2 GRAVITATIONSFELDER	469
13.2.1 Gravitationsfeld in größerem Abstand von einem Zentralkörper....	469
13.2.2 Gravitationsfeld in der Nähe eines Zentralkörpers	471
13.2.3 Entwicklung des Gravitationspotenzials nach Kugelfunktionen....	472
13.3 MAGNETFELDER	473
13.3.1 Das magnetische Dipolfeld	473
13.3.2 Das Magnetfeld der Sonne.....	474
13.3.3 Das Magnetfeld der Erde	475
13.4 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG	478
13.5 ATMOSPHERE	479
13.6 FESTE MATERIE	482
13.7 DAS SONNENSYSTEM.....	485
13.7.1 Die Sonne.....	485
13.7.2 Die Planeten und Zwergplaneten.....	485
13.7.3 Die Planetoiden.....	489
13.7.4 Die Monde	490
13.7.5 Die Kometen	491
ANHANG A GESCHICHTLICHE DATEN	495
ANHANG B ÜBUNGSAUFGABEN	519
ANHANG C FORMELSAMMLUNG.....	613