

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	24
1.6 MÖGLICHE MISSIONEN NACH DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION.....	34
2 DIE ZIOLKOWSKY-RAKETENGLEICHUNG	43
2.1 DIE ANNAHME DES SCHWEREFREIEN RAUMES.....	43
2.2 IMPULSGLEICHUNG DER RAKETE	44
2.3 WICHTIGE IMPULSDEFINITIONEN	47
2.3.1 Der Gesamtimpuls	47
2.3.2 Der spezifische Impuls	47
2.4 LEISTUNGS- ODER ENERGIEWIRKUNGSGRADE	48
2.4.1 Gesamtwirkungsgrad, innerer und äußerer Wirkungsgrad.....	48
2.4.2 Der integrale oder mittlere äußere Wirkungsgrad	49
2.5 EIN- UND MEHRSTUFIGE CHEMISCHE TRÄGERRAKETEN	51
2.5.1 Grenzen einstufiger chemischer Raketen	51
2.5.2 Stufenprinzip und Arten der Raketenstufungen	53
2.5.3 Tandemstufung	54
2.5.4 Parallel-Stufung	62
2.6 STUFENOPTIMIERUNG (TANDEMSTUFUNG)	72
3 GRUNDLAGEN DER BAHNMECHANIK.....	75
3.1 BEGRIFFE UND ANWENDUNGSBEREICHE.....	75
3.2 KEPLERS GESETZE UND NEWTONS ERGÄNZUNGEN	76
3.3 DIE VIS-VIVA-GLEICHUNG	81

3.3.1 Definitionen.....	81
3.3.2 Drehimpulserhaltung – Masse im zentralen Kraftfeld	81
3.3.3 Konservatives Kraftfeld und Energieerhaltung	83
3.3.4 Masse im Gravitationsfeld.....	84
3.3.5 Gravitationsbeschleunigung an der Erdoberfläche.....	84
3.3.6 Energien im Gravitationsfeld und Vis-Viva-Gleichung.....	85
3.4 ALLGEMEINE LÖSUNG DER VIS-VIVA-GLEICHUNG	87
3.5 WICHTIGE ERGEBNISSE AUS DER VIS-VIVA-GLEICHUNG	91
3.5.1 Umlaufzeiten für geschlossene Bahnen.....	91
3.5.2 Erste kosmische Geschwindigkeit.....	92
3.5.3 Zweite kosmische Geschwindigkeit (Fluchtgeschwindigkeit).....	93
3.5.4 Minimaler Energiebedarf bei einem Start von der Erdoberfläche.....	94
3.6 ALTERNATIVE HERLEITUNG DER GRUNDGLEICHUNGEN	96
3.6.1 Die Bewegungsgleichung für ein Zweikörperproblem	96
3.6.2 Die Drehimpulserhaltung	97
3.6.3 Die Vis-Viva-Gleichung.....	98
3.6.4 Die Kegelschnittgleichung	99
3.6.5 Das Dreikörperproblem	100
3.6.6 Das n-Körperproblem.....	102
3.7 BESCHREIBUNG VON FLUGKÖRPERBAHNEN.....	103
3.7.1 Koordinatensysteme und Darstellung von Umlaufbahnen.....	103
3.7.2 Die klassischen Bahnelemente	109
3.7.3 Ausgewählte Umlaufbahnen	109
3.8 ANWENDUNG VON ELLIPSENBAHNEN	114
3.8.1 Zeit entlang einer Keplerbahn	114
3.8.2 Ballistische Flugbahnen zwischen zwei Erdpunkten	117
4 MANÖVER ZUR BAHNÄNDERUNG	121
4.1 EINFÜHRENDE BEMERKUNGEN.....	121
4.2 MANÖVER MIT IMPULSIVEN SCHUBPHASEN	122
4.2.1 Definitionen.....	122
4.2.2 Allgemeine Betrachtung.....	123
4.2.3 Abhängigkeit des Antriebsbedarfs von der Verteilung der Schubphasen	124
4.2.4 Hohmann-Übergänge	127
4.2.5 Dreiimpuls-Übergänge (bielliptische Übergänge)	132
4.2.6 Inklinationsänderung.....	133
4.3 BAHNEN MIT ENDLICHEN SCHUBPHASEN	134
4.3.1 Richtungsänderung in konstanter Höhe	134
4.3.2 Aufspiralen	136
4.4 AUFSTIEGSBAHNEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON VERLUSTEN	140
4.5 RENDEZVOUS- UND ANDOCKMANÖVER	147
4.5.1 Problemstellung.....	148
4.5.2 Flugphasen	150

4.5.3 Die Bewegungsgleichungen für das Rendezvous-Problem.....	151
4.5.4 Restbeschleunigung in einem Raumfahrzeug	156
4.5.5 Ankoppeln (Docking) und Landung auf einem Planeten.....	157
4.6 GRAVITY-ASSIST- ODER SWINGBY-MANÖVER	158
4.6.1 Zur Entwicklung der Gravity-Assist-Technologie	158
4.6.2 Übergang vom heliozentrischen ins planetenfeste System.....	158
4.6.3 Berechnung der Geschwindigkeitsänderung	161
4.6.4 Maximaler Energiegewinn im heliozentrischen System	163
4.6.5 Maximierung der Austrittsgeschwindigkeit	165
4.7 SONNENSEGEL	167
4.8 TETHERS (SEILE) IM GRAVITATIONSFELD	171
4.8.1 Der Gravitationsgradient	172
4.8.2 Schwingungsverhalten und Störkräfte.....	175
4.8.3 Bahnmechanische Anwendung	175
4.8.4 Elektrodynamische (leitende) Seile.....	178
4.8.5 Konstellationen und künstliche Schwerkraft.....	180
4.9 ZAHLENWERTE FÜR VERSCHIEDENE MISSIONEN.....	182
5 THERMISCHE RAKETEN	185
5.1 EINTEILUNG	185
5.1.1 Methoden der Treibstoffheizung	185
5.1.2 Thermische Raketen mit geschlossener Heiz- oder Brennkammer	187
5.1.3 Thermische Raketen ohne geschlossene Heizkammer	189
5.2 BEMERKUNGEN ÜBER DIE VORGÄNGE IN THERMISCHEN RAKETEN	191
5.3 RAKETENSCHUB – DETAILS	196
5.4 ERGEBNISSE AUS DER ENERGIEGLEICHUNG	197
5.5 IDEALISIERTE RAKETE MIT IDEALEM GAS ALS TREIBSTOFF	201
5.5.1 Grundgleichungen der eindimensionalen reibungsfreien Strömung	201
5.5.2 Bestimmung der Lavalbedingungen.....	203
5.5.3 Abhängigkeiten von der Querschnittsänderung	204
5.6 IDEALE RAKETE	205
5.6.1 Massenstrom und Schub einer idealen Rakete	207
5.6.2 Spezifischer Impuls einer idealen Rakete.....	209
5.6.3 Wirkungsgrad des idealen Triebwerks	210
5.6.4 Einfluss des Flächenverhältnisses auf den Schub	211
5.6.5 „Abgesägte“ Düse	212
5.7 REALE (VERLUSTBEHAFTETE) DÜSEN	214
5.7.1 Mechanische Verluste	214
5.7.2 Thermische Verluste.....	218
5.7.3 Chemische Verluste	218
5.8 CHEMISCHE RAKETENTREIBSTOFFE	220
5.8.1 Theoretische Leistungen chemischer Raketentreibstoffe	220

5.8.2 Treibstoffauswahl	220
5.9 ANTRIEBSSYSTEME CHEMISCHER RAKETEN	223
5.9.1 Einteilung nach dem Aggregatzustand der Treibstoffe	223
5.9.2 Einteilung nach dem spezifischen Impuls	224
5.9.3 Einteilung nach der Zahl der Treibstoffkomponenten	225
5.9.4 Einteilung nach sonstigen Betriebsparametern	229
5.9.5 Einteilung nach Art der Anwendung	230
5.9.6 Komponenten und Prozesse	231
6 ELEKTRISCHE ANTRIEBE	245
6.1 DEFINITION	245
6.2 VORTEILE ELEKTRISCHER ANTRIEBE	246
6.3 WIDERSTANDSBEHEIZTE TRIEBWERKE (RESISTOJET)	248
6.4 GRUNDLAGEN FÜR LICHTBOGENTRIEBWERKE	250
6.5 ELEKTROTHERMISCHE LICHTBOGENTRIEBWERKE (ARCJETS)	252
6.6 MAGNETOPLASMADYNAMISCHE TRIEBWERKE	254
6.6.1 Eigenfeldbeschleuniger	254
6.6.2 Fremdfeldbeschleuniger	256
6.6.3 Hallionenbeschleuniger	258
6.7 ELEKTROSTATISCHE TRIEBWERKE	258
6.7.1 Grundlagen zu elektrostatischen Triebwerken	260
6.7.2 Kaufman-Triebwerk	261
6.7.3 RIT-Triebwerk	261
6.7.4 Feldemissions-Triebwerk	262
7 ANTRIEBSSYSTEME FÜR DIE LAGE- UND BAHNREGELUNG	263
7.1 EINFÜHRUNG	263
7.2 ABGRENZUNG DER SEKUNDÄR- GEGENÜBER DEN PRIMÄRSYSTEMEN	264
7.3 AUFGABEN UND ANFORDERUNGEN	269
7.4 DIE LAGEREGLUNG VON RAUMFAHRZEUGEN	270
7.4.1 Die Eulerschen Gleichungen	270
7.4.2 Aufgaben der Lageregelung, Stabilisierungsarten, Stellglieder	271
7.4.3 Anforderungen der Drallstabilisierung	274
7.4.4 Anforderungen der Dreiachsenstabilisierung	279
7.5 BAHNREGELUNG UND BAHNKORREKTUR	283
7.5.1 Übersicht	283
7.5.2 Kompensation von Injektionsfehlern und Positionierung	283
7.5.3 Bahnregelung geostationärer Satelliten	286
7.6 SYSTEMANFORDERUNGEN	291
7.7 ARTEN SEKUNDÄRER ANTRIEBSSYSTEME	293
7.8 VERGLEICH DER WICHTIGSTEN TRIEBWERKSSYSTEME	298

8 ENERGIEVERSORGUNGSSANLAGEN	301
8.1 ALLGEMEIN.....	301
8.1.1 Leistungsbedarf von Raumfahrzeugen	301
8.1.2 Mögliche Energiesysteme für Raumfahrtzwecke.....	302
8.1.3 Typische Missionen und Erfordernisse	308
8.1.4 Einfluss der Schattenphase auf solare Energieversorgungssysteme.....	309
8.2 ÜBERSICHT ÜBER KURZZEIT-ANLAGEN	312
8.2.1 Primärzellen	312
8.2.2 Sekundärzellen	313
8.3 ÜBERSICHT ÜBER LANGZEIT-ANLAGEN	315
8.3.1 Solarzellenanlagen	315
8.3.2 Das Prinzip der Solarzelle	315
8.3.3 Ausgeführte Anlagen.....	317
8.3.4 Nukleare Anlagen.....	320
8.3.5 Thermoelektrische Wandlung	320
8.3.6 Radioisotopenbatterien.....	322
8.3.7 Nukleare Reaktoren.....	324
8.4 ANDERE UNTERSUCHTE ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEME	327
8.4.1 Solardynamische Energieversorgungsanlagen	327
8.4.2 Vergleich Photovoltaik – Solardynamik für eine Raumstation	329
8.4.3 Solare Kraftwerksatelliten	332
9 THERMALKONTROLLSYSTEME.....	333
9.1 GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH STRAHLUNG	333
9.1.1 Der schwarze Strahler	333
9.1.2 Optische Eigenschaften von Materialien.....	335
9.1.3 Graue Strahler und technische Oberflächen.....	336
9.2 UMWELTBEDINGUNGEN.....	339
9.2.1 Solarstrahlung.....	339
9.2.2 Albedostrahlung	341
9.2.3 Erdeigenstrahlung.....	342
9.2.4 Aerodynamische Aufheizung	343
9.3 ENTWURF VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN	345
9.4 THERMALANALYSE.....	347
9.4.1 Durchführung von Thermalanalysen.....	347
9.4.2 Wärmebilanz	349
9.4.3 Gleichgewichtstemperaturen	350
9.4.4 Mathematische Modellierung.....	351
9.4.5 Thermische Massen.....	353
9.4.6 Wärmetransportmechanismen	354
9.4.7 Formfaktoren, Strahlungskopplungen	355
9.4.8 Software-Werkzeuge	356
9.5 ARTEN VON THERMALKONTROLLSYSTEMEN	357

9.5.1 Passive Thermalkontrolle	357
9.5.2 Aktive Thermalkontrolle	363
9.6 THERMALTESTS	368
10 RAUMTRANSPORTSYSTEME	371
10.1 EINLEITUNG	371
10.2 MOMENTANER STAND	371
10.2.1 Überblick	371
10.2.2 Einteilungskriterien von Trägerraketen	382
10.3 DAS ARIANE-PROGRAMM	382
10.4 ZUSAMMENFASSUNG EXISTIERENDER STARTFAHRZEUGE	386
10.4.1 Die europäische Ariane im kommerziellen Geschäft zeitweise vorn	387
10.4.2 Russland: Der wieder erstarkte Riese	387
10.4.3 Marktführer USA	387
10.4.4 Aufsteiger Japan	388
10.4.5 Die Neulinge China und Indien	388
10.5 ZUKÜNTIGE PROJEKTE FÜR RAUMTRANSPORTFAHRZEUGE	389
10.5.1 NASA's geplante <i>Constellation</i> -Raketen zum Mond	389
10.5.2 Europäische Entwicklungen und die Konkurrenz	393
10.5.3 Studien über zukünftige Raumtransportsysteme	394
10.5.4 Missionen für die zukünftigen Raumtransportsysteme	401
10.5.5 Konzepte für zukünftige europäische Transportsysteme	402
10.5.6 Startkosten für zukünftige Startfahrzeuge	403
10.5.7 Technologieentwicklungen und langfristige Zielsetzung	407
11 DER EINTRITT VON FAHRZEUGEN IN DIE ATMOSPHÄRE	409
11.1 EINLEITUNG	409
11.2 FLUGBEREICHE	411
11.2.1 Wiedereintrittsflugprofile	411
11.2.2 Strömungsbereiche	411
11.3 FLUGBEREICHSBESCHRÄNKUNGEN UND FAHRZEUGANFORDERUNGEN	413
11.4 WÄRMESCHUTZMETHODEN	418
11.5 BALLISTISCHER UND SEMIBALLISTISCHER WIEDEREINTRITT	419
11.5.1 Wiedereintrittsflüge ohne Auftrieb	419
11.5.2 Wiedereintrittsflüge mit Auftrieb	419
11.6 WIEDEREINTRITT VON GEFLÜGELTEN GLEITFAHRZEUGEN	425
11.7 AERODYNAMISCHE ORBIT-TRANSFERFAHRZEUGE (AOTV)	432
11.7.1 Einleitung	432
11.7.2 Aerodynamische Orbit Transfer Fahrzeuge für erdnahen Bahnen	432
11.7.3 Synergetische Bahndrehmanöver	436
11.7.4 Planetenmissionen	438
11.7.5 Technologieaspekte der Aeroassist-Konzepte	440

12 DATEN- UND KOMMUNIKATIONSSYSTEME	441
12.1 EINLEITUNG	441
12.2 DATENMANAGEMENTSYSTEM	442
12.3 ÜBERTRAGUNGSTRECKEN ZU DEN RAUMSTATIONEN	443
12.4 VERTEILTE DATENSYSTEME.....	445
12.4.1 Netz-Topologien.....	446
12.4.2 Physikalische Datenverbindungen	447
12.4.3 Software und Programmiersprachen	447
12.5 AUSLEGUNG DER FUNKSYSTEME	449
12.6 ANTENNEN	453
12.7 MODULATION UND CODIERUNG	456
12.8 DAS TDRS-SYSTEM	459
13 UMWELTFAKTOREN	463
13.1 EINFÜHRUNG.....	463
13.2 GRAVITATIONSFELDER	463
13.2.1 Gravitationsfeld in größerem Abstand von einem Zentralkörper.....	463
13.2.2 Gravitationsfeld in der Nähe eines Zentralkörpers.....	465
13.2.3 Entwicklung des Gravitationspotenzials nach Kugelfunktionen.....	466
13.3 MAGNETFELDER	467
13.3.1 Das magnetische Dipolfeld	467
13.3.2 Das Magnetfeld der Sonne	468
13.3.3 Das Magnetfeld der Erde.....	469
13.4 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG	472
13.5 ATMOSPHÄRE.....	473
13.6 FESTE MATERIE	476
13.7 DAS SONNENSYSTEM	479
13.7.1 Die Sonne	479
13.7.2 Die Planeten und Zwergplaneten	479
13.7.3 Die Planetoiden	483
13.7.4 Die Monde.....	484
13.7.5 Die Kometen	485
ANHANG A GESCHICHTLICHE DATEN.....	489
ANHANG B ÜBUNGSAUFGABEN	511
ANHANG C FORMELSAMMLUNG	581