

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 DIE ZIOLKOWSKY-RAKETENGLEICHUNG .....</b>	<b>43</b>
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 ENERGIEWIRKUNGSGRAD .....	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
<b>3 GRUNDLAGEN DER BAHNMECHANIK.....</b>	<b>75</b>
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
<b>4 MANÖVER ZUR BAHNÄNDERUNG .....</b>	<b>121</b>
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 Dreimpuls-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
<b>5 THERMISCHE RAKETEN .....</b>	<b>185</b>
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
<b>6 ELEKTRISCHE ANTRIEBE .....</b>	<b>245</b>
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 MAGNETOPLASMA DYNAMISCHE 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
<b>7 ANTRIEBSSYSTEME FÜR DIE LAGE- UND BAHNREGELUNG .....</b>	<b>263</b>
7.1 EINFÜHRUNG.....	263
7.2 ABGRENZUNG DER SEKUNDÄR- GEGENÜBER DEN PRIMÄRSYSTEMEN.....	264
7.3 AUFGABEN UND ANFORDERUNGEN.....	269
7.4 DIE LAGEREGELUNG 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

<b>8 ENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN .....</b>	<b>301</b>
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 ENERGIEVERSORGUNGSYSTEME .....	327
8.4.1 Solardynamische Energieversorgungsanlagen .....	327
8.4.2 Vergleich Photovoltaik – Solardynamik für eine Raumstation .....	329
8.4.3 Solare Kraftwerksatelliten .....	332
<b>9 THERMALKONTROLLSYSTEME.....</b>	<b>333</b>
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
<b>10 RAUMTRANSPORTSYSTEME .....</b>	<b>371</b>
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 ZUKÜNFTIGE 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
<b>11 DER EINTRITT VON FAHRZEUGEN IN DIE ATMOSPÄRE .....</b>	<b>409</b>
11.1 EINLEITUNG .....	409
11.2 FLUGBEREICHE .....	411
11.2.1 Wiedereintrittsflugprofile .....	411
11.2.2 Strömungsbereiche .....	411
11.3 FLUGBEREICHBSCHRÄNKUNGEN 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 erdnahe Bahnen .....	432
11.7.3 Synergetische Bahndrehmanöver .....	436
11.7.4 Planetenmissionen .....	438
11.7.5 Technologieaspekte der Aeroassist-Konzepte .....	440

<b>12 DATEN- UND KOMMUNIKATIONSSYSTEME .....</b>	<b>441</b>
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
<b>13 UMWELTFAKTOREN .....</b>	<b>463</b>
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 ATMOSPHERE.....	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
<b>ANHANG A GESCHICHTLICHE DATEN.....</b>	<b>489</b>
<b>ANHANG B ÜBUNGSAUFGABEN.....</b>	<b>511</b>
<b>ANHANG C FORMELSAMMLUNG .....</b>	<b>581</b>