

Willi Hallmann/Wilfried Ley

Handbuch der Raumfahrttechnik

Grundlagen
Nutzung, Raumfahrtsysteme
Produktsicherung
und Projektmanagement

mit 468 Abbildungen und 92 Tabellen



Carl Hanser Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen (Kap1-16)	1
1 HISTORISCHER ÜBERBLICK ÜBER DIE ANFÄNGE DER RAUMFAHRT	3
1.0 Veränderungen im Zeitraum 1988-1998	3a
1.0.1 Deutsches Raumfahrtgeschehen	3a
1.0.2 Internationale Weltraumaktivitäten	3b
1.1 Historische Einleitung	4
1.1.1 Die Entstehungsphase einer neuen Technologie	4
1.1.2 Konzepte für Satelliten und Kooperationen	10
1.2 Anfänge der deutschen und europäischen Raumfahrt	12
1.2.1 Die transatlantische Zusammenarbeit	12
1.2.2 Die Entwicklung des Europäischen Weltraumprogramms	13
1.2.3 Das nationale Raumfahrtprogramm	20
1.3 Zusammenfassung (Stand 1988)	35
1.4 Literaturverzeichnis	36
2 BEGRIFFE UND UMGEBUNGSBEDINGUNGEN	37
2.0 Ergänzungen zu den Umweltbedingungen	37a
2.0.1 Zum Beitrag der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung	37a
2.0.2 Der Einfluß des atomaren Sauerstoffs im LEO	37a
2.0.3 Weltraummüll / Space Debris	37b
2.1 Begriffe	38
2.2 Umgebungsbedingungen	40
3 TRÄGERSYSTEME	47
3.1 Antriebsbedarf von Trägermissionen	48
3.2 Antriebsvermögen von Trägerraketen	48
3.2.1 Raketengrundgleichung	49
3.2.2 Antriebsleistung	51
3.3 Raketenantriebe	54
3.3.1 Treibstoffe	54
3.3.2 Triebwerke	57
3.3.2.1 Feststofftriebwerke	57
3.3.2.2 Flüssigkeitstriebwerke	58
3.4 Trägersysteme	64
3.4.1 Terminologie und Einleitung	64
3.4.2 Europäische Träger	66
3.4.3 Außereuropäische Träger	72
3.4.3.1 US - Trägersysteme	72
3.4.3.2 UdSSR - Träger	76
3.4.3.3 Japanische Trägerraketen	76
3.4.3.4 Chinesische Träger	79
3.5 Raumtransportkosten und Entwicklungstrends	79
3.6 Literaturverzeichnis	88
4 BAHNMECHANIK UND STABILISIERUNGSMÖGLICHKEITEN	91
4.1 Grundlagen der Bahnmechanik	92
4.1.1 Satellitenbahn im Raum	94
4.2 Bahntransfer	94

4.3	Grundlagen der Satellitendynamik und der Lageregelung	95
4.3.1	Allgemeine Vereinbarungen	95
4.3.2	Euler-Gleichung	96
4.3.3	Kinematische Beziehungen	97
4.3.4	Simulationspezifische Kinematik	98
4.3.5	Klassifizierung von Lageregelungssystemen	99
4.3.6	Beispiele für Lagestabilisierungssysteme	100
4.4	Literaturverzeichnis	102
4.5	Bahnmechanischer Satellitenglobus	102a
4.6	Korrekturen zur 1. Auflage	102b
5	SYSTEM-BETRIEB	103
5.0	Neue Entwicklungen	103a
5.1	Systembetrieb	104
5.1.1	Einleitung	104
5.1.2	Definition	104
5.1.3	Beispiele	105
5.1.4	Anforderungen	105
5.1.5	Teilaufgaben des Betriebs	109
5.1.6	Literaturverzeichnis	111
5.2	Nutzlasten und Betriebssysteme	113
5.2.1	Einführung	114
5.2.2	Nutzlasten von Nachrichtensatelliten	115
5.2.2.1	Umlaufbahnen von Nachrichtensatelliten	115
5.2.2.2	Prinzipieller Aufbau einer Nutzlast	115
5.2.2.3	Kriterien für die Auslegung einer Nutzlast	119
5.2.2.4	Beispiel einer Streckenbilanz (Link-Bilanz)	122
5.2.2.5	Satellitenantennen	123
5.2.2.6	Ausblick	131
5.2.3	Telemetrie, Tracking und Kommando-System (TTC)	132
5.2.3.1	Aufgabe	132
5.2.3.2	Konzept eines TTC-Systems	132
5.2.4	Bodeneinrichtungen	134
5.2.4.1	Erdefunkstellen und TTC-Stationen	134
5.2.4.2	Beispiele für Bodenstationen (hochfrequenter Teil)	135
5.2.4.3	Endeinrichtungen	136
5.2.4.4	Nutzlasten anderer Satelliten	136
5.2.5	Navigationssatelliten	137
5.2.6	Literaturverzeichnis	139
6	WERKSTOFFE	141
6.1	Einleitung	142
6.2	Einflußnehmende Raumbedingungen	142
6.3	Anhang	171
6.4	Literaturverzeichnis	174
7	TRIBOLOGISCHE MATERIALIEN	177
7.1	Einleitung	178
7.2	Einfluß der Weltraumbedingungen	178
7.3	Schmierstoffe	180
7.4	Grundlagen der Tribologie (Reibungslehre)	184
7.5	Schmierung von Mechanismen	189
7.6	Literaturverzeichnis	192

8 FERTIGUNGS- UND BEARBEITUNGSTECHNIKEN	197
8.0 Neue Entwicklungen	197a
8.0.1 Elektrische Bauteile und Fertigungstechniken	197a
8.0.2 Optische Bauweisen und Elemente	197b
8.1 Einleitung, Definition und prinzipielle Aspekte	198
8.2 Mechanische Bauweisen und Bearbeitungstechniken	200
8.2.1 Sandwichbauweise	200
8.2.2 Differentialbauweise	204
8.2.3 Integralbauweise	213
8.2.4 Korrosionsschutz	215
8.2.5 Fertigungskontrolle	216
8.3 Thermische / mechanische Bauelemente	217
8.4 Elektrische Bauteile und Fertigungstechniken	222
8.4.1 Spezielle Anforderungen	222
8.4.2 Elektrische Bauteile und Material	225
8.4.3 Elektrische Fertigungstechniken	227
8.5 Optische Bauweisen und Elemente	229
8.6 Literaturverzeichnis zu Abschnitt 8.4	234
8.7 Literaturverzeichnis zu Abschnitt 8.5	235
9 STRUKTURMECHANIK	237
9.1 Einleitung	238
9.2 Definition der Struktur und Mechanismen	238
9.3 Die wesentlichen Anforderungen	239
9.4 Die Entwicklung der Struktur	247
9.4.1 Die Entwicklungsphilosophie	247
9.4.2 Detaillierte Beschreibung der Hauptaktivitäten	253
9.4.2.1 Konzeptauswahl	253
9.4.2.2 Konstruktion, Materialauswahl	254
9.4.2.3 Analysen	258
9.4.2.4 Fertigung, Montage, Integration	259
9.4.2.5 Tests	261
9.4.3 Zeitplanung (Balkenplan)	261
9.4.4 Kosten und Entwicklung	265
9.5 Literaturverzeichnis	267
10 AUSGEFÜHRTE MECHANISMEN UND KONSTRUKTIVE DETAILS	269
10.0 Neue Entwicklungen bei Lagern und deren Einsatzgebiete	269a
10.1 Mechanische Mechanismen	270
10.2 Elektrisch angetriebene Mechanismen	281
10.3 Motor, Getriebe, Lager, Schmierung	282
10.4 Literaturverzeichnis	284
11 THERMALHAUSHALT	285
11.0 Entwicklungen und Tendenzen in der Temperaturkontrolle	285a
11.1 Einführung	286
11.2 Temperaturkontrolle im Weltraum	286
11.2.1 Die Temperatur eines Körpers im Weltraum	286
11.2.2 Integrale Gleichgewichtstemperatur und Einstellzeit	288
11.2.3 Entwurf eines Temperaturkontrollsystems	291
11.2.4 Methoden der Temperaturkontrolle	294

11.3	Das mathematische Modell des Wärmehaushalts	295
11.3.1	Das Knotenpunktmodell	298
11.3.2	Die Parameter des Knotenpunktmodells	299
11.3.2.1	Die thermisch-optischen Eigenschaften	299
11.3.2.2	Die Strahlungsaustauschfaktoren	307
11.3.2.3	Die Wärmeleitfaktoren	318
11.3.2.4	Die thermischen Massen	325
11.3.2.5	Interne und externe Dissipationen	326
11.3.3	Numerische Berechnung des Temperaturfelds	331
11.3.3.1	Berechnung des stationären Temperaturfelds ...	331
11.3.3.2	Berechnung des instationären Temperaturfelds ..	332
11.3.4	Der thermische Verifikationstest	334
11.4	Ausblick	336
11.5	Beispiele	338
11.5.1	Temperaturverlauf auf einem Stab	338
11.5.2	Erzwungene Luftkühlung (suction cooling)	339
11.6	Literaturverzeichnis	343
12	ENERGIEVERSORGUNG	345
12.0	Ergänzungen zum heutigen Stand	345a
12.1	Einleitung	346
12.2	Die Erzeugung elektrischer Energie	347
12.3	Die photovoltaische Energieumwandlung	349
12.3.1	Das Prinzip der photovoltaischen Energiewandlung	349
12.3.2	Solarzellen für die Raumfahrt	351
12.3.3	Die Solarzelle und die Umgebungsbedingungen des Weltraums	354
12.4	Die Energieaufbereitung und die Energieverteilung	357
12.5	Die Energiespeicherung	359
12.6	Literaturverzeichnis	360
13	SYSTEM-INTEGRATION	361
13.1	Zielsetzung	362
13.2	Planung	362
13.3	Ausführung	364
13.4	Betriebsunterstützung	365
14	UMWELTSIMULATION	367
14.0	Aktualisierung und Ergänzung	367a
14.1	Die Bedeutung von Entwicklungs- und Abnahmeversuchen am Raumfahrtgerät und dessen Komponenten	368
14.2	Mechanische Tests	371
14.2.1	Belastung während der Startphase und ihre Vorhersage ..	371
14.2.2	Zweck von Vibrationstests	372
14.2.3	Mechanische Testprüfstände	374
14.2.3.1	Der elektrodynamische Vibrator	374
14.2.3.2	Der hydraulische Vibrator	376
14.2.3.3	Die akustische Testanlage	377
14.2.4	Verschiedene Formen der Schwingungserregung	381
14.2.4.1	Die Sinuserregung	381
14.2.4.2	Die Zufallserregung (Random)	384
14.2.4.3	Die kurzzeitige Zufallserregung (Transient)	386

14.2.5 Der Vibrationstest, Messung und Auswertung	389
14.2.5.1 Die Modalanalyse beim Vibrationstest	390
14.2.5.2 Die Bestimmung der Strukturmatrizen	393
14.2.5.3 Der Qualifikations- und der Abnahmetest	395
14.3 Thermische Tests	397
14.3.1 Randbedingungen für den Thermalhaushalt des Satelliten	397
14.3.2 Thermische Tests unter weltraumähnlichen Bedingungen .	398
14.3.3 Anforderungen und Aufbau der thermischen Simulationsanlagen	399
14.3.3.1 Weltraumsimulation	399
14.3.3.2 Vakuum-Temperaturkammern	409
14.3.3.3 Anlagenbedingte Grenzen	411
14.3.4 Besondere Problemstellungen	412
14.3.4.1 Oberflächeneffekte und Kontamination	412
14.3.4.2 Restgasuntersuchungen und Lecktests	413
14.3.4.3 Sensoren und Kalibrierung der Testanlage	414
14.3.4.4 Elektrische Entladungen	418
14.4 Ergänzende Satellitentests und Simulationsanlagen	419
14.5 Testzentren und Kostenaspekte	421
14.6 Anforderungen an zukünftige Testanlagen	423
14.7 Literaturverzeichnis	424
15 SATELLITENLAGEREGELUNG UND DEREN SIMULATION	427
15.1 Überblick über die verschiedenen Simulationsverfahren zur Satellitenlageregelung	428
15.1.1 Rechnersimulation	428
15.1.2 Rechnersimulation unter Einbeziehung von Echtteilen: „Dynamische Simulation“	429
15.1.3 Physikalische Simulation	431
15.2 Optische Referenz-Simulatoren	436
15.2.1 Sonnensimulator	436
15.2.2 Erdsimulator	436
15.3 Literaturverzeichnis	438
16 AERODYNAMIK VON SATELLITEN	439
16.0 Aktualisierungen zur Simulation	442a
16.1 Einführung in die Problematik	443
16.1.1 Auswirkung der aerodynamischen Kräfte	443
16.1.2 Kontamination	443
16.1.3 Vom Satelliten direkt verursachte Strömungsprobleme ...	443
16.2 Die hohe Atmosphäre und der freimolekulare Anströmzustand von Satelliten	445
16.2.1 Anströmzustand und Kennzahlen	446
16.3 Die aerodynamischen Beiwerte	449
16.3.1 Die Gesamtkraftbeiwerte	449
16.3.2 Die örtlichen Beiwerte für ein Oberflächenelement	450
16.4 Die Grundlagen der freien Molekülströmung	451
16.4.1 Die Gasoberflächenwechselwirkung	451
16.4.2 Konvex- und konkavgekrümmte Oberflächen	452
16.5 Konvexe Körper	453
16.5.1 Die örtlichen aerodynamischen Beiwerte	453
16.5.2 Gesamtkraftbeiwerte von konvexen Körpern	456

16.6 Körper mit konkaven Oberflächenelementen	463
16.6.1 Die Abschirm- und Abschattwirkung	463
16.6.2 Die Strömung in eine halbbunendliche Ecke	463
16.6.3 Aerodynamische Beiwerte konkaver Gesamtkonfigurationen 468	
16.7 Zusammenfassung	474
16.8 Literaturverzeichnis	475
16.9 Anhang	476
Teil II Nutzung, Raumfahrtsysteme (Kap17-20)	483
17 DER MENSCH IM WELTRAUM	485
17.0 Raumstationen als nächster Schritt	485a
17.1 Einleitung	486
17.2 Die menschliche Rolle im All	487
17.2.1 Allgemein	487
17.2.2 Der Mensch im praktischen Einsatz	488
17.2.2.1 Bisherige bemannte Programme	488
17.2.2.2 Bisherige Lehren	494
17.2.3 Die Nutzbarkeit des Alls für die Menschheit	495
17.3 Forderungen von Morgen	497
17.4 Die Umgebungszustände des Raumflugs	499
17.4.1 Atmosphäre	499
17.4.2 Schwerfelder	500
17.4.3 Schwerelosigkeit	501
17.4.4 Strahlung	501
17.4.5 Andere Welten	503
17.5 Human-Physiologische Auswirkungen der Weltraumumwelt	506
17.6 Lebenserhaltung im All	513
17.6.1 Allgemein	513
17.6.2 Bordatmosphäre	515
17.6.3 Nahrung	518
17.7 Bordsysteme für Umweltkontrolle und Lebenserhaltung	520
17.7.1 Offene Systeme	522
17.7.2 Außenbord (EVA)-Systeme	529
17.7.3 Geschlossene (regenerative) Systeme	531
17.7.3.1 Allgemein	531
17.7.3.2 Physikalisch-Chemische Verfahren	533
17.7.3.3 Bioregenerative Verfahren	539
17.7.3.4 Künstliche Ökosysteme der Zukunft	543
17.8 Die ständige Bewohnung des Alls	545
17.8.1 Allgemein	545
17.8.2 Restrisiko	546
17.8.3 Lebensraumbeschränkung	546
17.8.4 Schwererefreier Zustand	547
17.8.5 Gruppendynamik	549
17.8.6 Ergonomik	550
17.8.7 Zusammenfassung und Ausblick	554
17.9 Literaturverzeichnis	556
18 NUTZUNG DER ORBITALSYSTEME	559
18.0 Aktuelle Nutzungsaspekte	559a

Inhaltsverzeichnis	XIX
18.1 Einleitung	560
18.2 Innovationsschub und Anwendung neuer Technologien	561
18.3 Europäische und internationale Kooperation	563
18.4 Wissenschaftliche und kommerzielle Aspekte der Raumfahrtnutzung	565
18.4.1 Ziele bei der erdgerichteten Nutzung	565
18.4.2 Ziele der weltraumausgerichteten Nutzung	570
18.4.3 Ziele der Nutzung der Weltraumumgebung	572
18.5 Zukünftige Trends in der Nutzung	575
18.6 Orbitale Infrastruktur	577
18.7 Literaturverzeichnis	580
19 TRANSPORTSYSTEME, PLATTFORMEN, RAUMSTATIONEN UND NOTWENDIGE INFRASTRUKTUR	581
19.0 Über 10 Jahre später	581a
19.1 Weltrauminfrastruktur und ihre Dienstleistungen	582
19.2 Transportsysteme	583
19.2.1 Überblick	583
19.2.2 Raketen	585
19.2.3 Rückkehrfähige Transportsysteme	586
19.3 Orbitalsysteme	590
19.3.1 Überblick	590
19.3.2 Satelliten, Sonden, Plattformen	590
19.3.3 Rückführbare Systeme	591
19.3.4 Raumstations-Systeme	593
19.3.5 Orbitale Betriebseinrichtungen	601
19.4 Grundzüge der Systemtechnik	601
19.5 Literaturverzeichnis	604
20 SEILGEFESSELTE FLUGKÖRPER-SYSTEME	607
20.0 Update der Aktivitäten	607a
20.1 Einleitung	608
20.2 Grundlagen gravitationsstabilisierter Seilsysteme	611
20.2.1 Mechanische Zusammenhänge	611
20.2.2 Allgemeine Zusammenhänge	616
20.2.3 Nicht-Gleichgewichtszustände beim Abspulen und Einholen von Massen	619
20.3 Elektrodynamische Seilsysteme	619
20.3.1 Potentialdifferenz und Ladungsausgleich	619
20.3.1.1 Seilsysteme als Quelle elektrischer Energie	620
20.3.1.2 Schuberzeugung mittels Seilsystem	621
20.4 Anwendungsbeispiele	622
20.4.1 Elektrodynamische Seilsysteme	622
20.4.2 Momententransfer	626
20.4.3 Künstliche Gravitation	628
20.4.4 Technologie und Test	629
20.4.5 Strukturen	631
20.5 Literaturverzeichnis	633

Teil III Produktsicherung und Projektmanagement (Kap21-23)	635
21 PRODUKTSICHERUNG UND IHRE METHODIK	637
21.0 Beispiele zur System-Sicherheitstechnik (System-Safety)	637a
21.1 Einleitung	638
21.2 Definition der Produktsicherung	638
21.3 Produktsicherung: Kontrollierte Bereitstellung von Sicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität	640
21.4 Zuverlässigkeit	645
21.5 System-Sicherheitstechnik	668
21.6 Qualitätssicherung	681
21.7 Literaturverzeichnis	692
22 PROJEKTMANAGEMENT IN DER RAUMFAHRT	693
22.0 Ergänzungen und Korrekturen	693a
22.1 Projekt und Projektleitung in der Raumfahrttechnik	694
22.1.1 Einleitung und Definition	694
22.1.2 Organisationsstrukturen	696
22.1.2.1 Problematik von herkömmlichen Organisationsstrukturen	696
22.1.2.2 Matrix Konzeption	696
22.1.3 Projektorganisation	698
22.1.3.1 Der Projektleiter (Project Manager)	698
22.1.3.2 Die Projektleitung (Project Management)	699
22.1.3.3 Projektbüro (Project Office)	701
22.1.4 Managementplanung	702
22.2 Projektplanung und -steuerung	707
22.2.1 Einleitung und Definition	707
22.2.2 Phasenweise Projektbearbeitung	708
22.2.2.1 Phase A - Konzeptphase	710
22.2.2.2 Phase B - Definitionsphase	711
22.2.2.3 Phase C/D - Entwurfs-, Entwicklungs- und Produktionsphase	712
22.2.2.4 Phase E - Betriebsphase	712
22.2.2.5 Phase F - Endverwendungsphase	712
22.2.2.6 Zeitlicher und finanzieller Zusammenhang der Phasen	713
22.2.3 Projektstrukturplan (PSP) [Work Breakdown Structure (WBS)]	713
22.2.4 Kostenplanung und -kontrolle	715
22.2.4.1 Vorbereitung	715
22.2.4.2 Cost Control	719
22.2.4.3 Prämiensysteme	721
22.2.5 Terminplanung und -kontrolle	722
22.2.5.1 Vorbereitung	722
22.2.5.2 Balkenpläne (Bar Charts)	722
22.2.5.3 Netzpläne (Network)	725
22.2.6 Design to Cost	727
22.2.7 Vertragsentwurf, -abschluß und -betreuung	728
22.2.7.1 Vertragsmanagement	728
22.2.7.2 Der Vertrag	729
22.2.7.3 Änderungen	729
22.2.7.4 Preisgestaltung	730

Inhaltsverzeichnis	XXI
22.2.8 EDV-Einsatz	731
22.2.8.1 Allgemeines	731
22.2.8.2 EDV-Ausrüstung	731
22.2.8.3 EDV-Anwendung	731
22.2.8.4 EDV-Zukunft	732
22.3 Anhang	733
22.3.1 Literaturverzeichnis	733
22.3.2 Begriffe, Abkürzungen und Übersetzungen	734
23 METHODEN ZUR SCHÄTZUNG DER LEBENSZYKLUSKOSTEN	739
23.1 Einleitung	740
23.2 Definition der Lebenszykluskosten	740
23.3 Entwurfsfeststellung und Kostenverbindung	742
23.4 Möglichkeiten zur Ermittlung der Lebenszykluskosten	743
23.4.1 Der Projektstrukturplan	743
23.4.2 Kostenschätzmethoden	744
23.4.2.1 Detaillierte Methoden	745
23.4.2.2 Beurteilungsmethoden	756
23.4.2.3 Parametrische Methoden	746
23.4.2.4 Beispiele für parametrische Kostenschätzmodelle und -verfahren	764
23.5 Schätzgenauigkeit	769
23.5.1 Schätzgenauigkeit detaillierter Methoden	770
23.5.2 Schätzgenauigkeit bei Beurteilungsmethoden	770
23.5.3 Schätzgenauigkeit parametrischer Methoden	770
23.6 Sensitivitäts- und Risikoanalysen	771
23.6.1 Sensitivitätsanalysen	772
23.6.2 Risikoanalysen	772
23.6.2.1 Methodik der Risikoanalyse	772
23.7 Zusammenfassung	774
23.8 Literaturverzeichnis	775
24 SACHREGISTER	777