

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	31
	Quellen und Literatur	34
1.1	Historischer Überblick	34
1.1.1	Die Entwicklung der Raketentechnik	34
1.1.2	Die Entwicklung der unbemannten deutschen und europäischen Raumfahrt	38
1.1.3	Die Entwicklung der bemannten Raumfahrt	43
	Literatur	51
1.2	Raumfahrtmissionen	51
1.2.1	Raumfahrt-Systemsegmente	51
1.2.1.1	Das Raumsegment	52
1.2.1.2	Das Transfersegment	54
1.2.1.3	Das Bodensegment	55
1.2.2	Auslegung der Systemsegmente für Raumfahrtmissionen	57
1.2.3	Klassifizierung von Raumfahrtmissionen	60
1.2.3.1	Erdbeobachtung	60
1.2.3.2	Wetterbeobachtung	60
1.2.3.3	Technologieerprobung	60
1.2.3.4	Grundlagenforschung	61
1.2.3.5	Kommunikation	62
1.2.3.6	Navigation	62
1.2.3.7	Militärische Missionen	63
1.2.3.8	Planetare Erkundung und Exploration	63
1.2.3.9	Bemannte Raumfahrt	64
	Quellen und Literatur	64
2	Grundlagen	67
2.1	Umgebung Weltraum	67
2.1.1	Raumfahrzeug und Weltraumumgebung	67
2.1.2	Einfluss von Sonne und Weltraumhintergrund	69
2.1.2.1	Physik der Sonne	69
2.1.2.2	Die Sonnenstrahlung	70
2.1.2.3	Sonnenwind	71
2.1.2.4	Energiereiche Teilchen	72
2.1.3	Einfluss der Erde	72
2.1.3.1	Die Erdatmosphäre	72
2.1.3.2	Magnetfeld der Erde	74
2.1.3.3	Bewegung geladener Teilchen in der Magnetosphäre	75
2.1.3.4	Der Strahlungsgürtel (Van-Allen-Belt)	75
2.1.4	Einfluss auf das Raumfahrzeug und die Missionsplanung	76
2.1.4.1	Gravitation und Magnetik	76
2.1.4.2	Elektromagnetische Strahlung	78
2.1.4.3	Atmosphärische Einflüsse	79
2.1.4.4	Energiereiche Teilchenstrahlung	80
2.1.4.5	Hochvakuum	82
2.1.4.6	Kontamination	82
2.1.4.7	Mikrometeoriten und Weltraummüll	83
	Literatur	84

2.2	Bahnmechanik	84
2.2.1	Bahnmodellierung	84
2.2.1.1	Kepler-Bahnen	84
2.2.1.2	Die Bahn im erdfesten System	87
2.2.1.3	Bahnstörungen	88
2.2.1.4	Analytische Bahnmodelle	92
2.2.1.5	Numerische Bahnvorhersage	95
2.2.2	Bahnbestimmung	97
2.2.2.1	Tracking-Systeme	97
2.2.2.2	Beobachtungsmodell	100
2.2.2.3	Linearisierung	101
2.2.2.4	Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate	101
2.2.2.5	Kalman-Filterung	103
2.2.3	Bahnauslegung und -haltung	105
2.2.3.1	Hohmann-Transfer	105
2.2.3.2	Fernerkundungssatelliten	106
2.2.3.3	Geostationäre Satelliten	108
	Literatur	111
2.3	Aerothermodynamik und Wiedereintritt	112
2.3.1	Einleitung	112
2.3.2	Globale Energiebetrachtungen	112
2.3.3	Strömungsmechanische und chemische Phänomene beim Wiedereintritt	114
2.3.4	Wärmeflussbilanz und Thermalschutzsysteme	116
2.3.5	Wiedereintrittsbahn	119
2.3.6	Aerodynamische Betrachtungen	121
2.3.7	Werkzeuge zur Bestimmung aerothermodynamischer Daten	123
	Literatur	126
2.4	Mikrometeoriden und Space Debris	127
2.4.1	Die Umgebungsbedingungen	127
2.4.1.1	Mikrometeoriden	127
2.4.1.2	Space Debris	127
2.4.2	Zukünftige Entwicklung und Vermeidungstechniken	128
2.4.3	Impaktflüsse und Impaktrisiko	130
2.4.3.1	Mikrometeoriden	131
2.4.3.2	Space Debris	131
2.4.3.3	Impaktrisiko	133
2.4.4	Schutzmaßnahmen für Raumfahrzeuge	133
2.4.4.1	Schutzkonzepte	133
2.4.4.2	Bemessung von Schutzmaßnahmen	134
2.4.5	Planung von Missionen	138
	Literatur	138
3	Trägersysteme	141
3.1	Gesamtsysteme	142
3.1.1	Einführung	142
3.1.2	Grundlagen	143
3.1.2.1	Nutzlasten und Missionen	143
3.1.2.2	Impuls und Raketengrundgleichung	144
3.1.2.3	Stufung	144
3.1.2.4	Aufstiegsbahn und Antriebsbedarf	145
3.1.3	Baugruppen	146

3.1.4	Projektphasen.....	146
3.1.5	Trägersysteme	147
3.1.5.1	Aktuelle Trägersysteme.....	148
3.1.5.2	Konzepte für die Zukunft	157
	Literatur	159
3.2	Stufentechnologien.....	160
3.2.1	Einführung/Übersicht	160
3.2.2	Missionsprofile und Betrieb.....	163
3.2.3	Baugruppen/Subsysteme/Technologien.....	166
3.2.4	Systemauslegung	173
3.2.4.1	Auslegung des Gesamtsystems	173
3.2.4.2	Einflüsse auf die Systemauslegung	174
3.2.4.3	Teilsystem-Auslegung.....	176
3.3	Antriebssysteme	178
3.3.1	Theorie des chemischen Antriebs.....	178
3.3.1.1	Grundlagen	178
3.3.1.2	Treibstoffe	179
3.3.2	Raketenantriebstypen: Feststoffmotoren und Flüssigkeitsantriebe	180
3.3.2.1	Feststoffantriebe	180
3.3.2.2	Triebwerkstypen für Flüssigtreibstoffe.....	182
3.3.3	Komponenten von Flüssigantrieben	185
3.3.3.1	Einspritzkopf.....	186
3.3.3.2	Brennkammer und Düse	189
3.3.3.3	Gasgeneratoren	195
3.3.3.4	Turbopumpe	195
3.3.4	Sonderprobleme.....	198
3.3.5	Testanlagen für Raketenantriebe	200
3.3.6	Zukünftige Antriebe	203
	Literatur	203
3.4	Startinfrastruktur.....	204
3.4.1	Wesentliche Elemente	204
3.4.2	Aufgaben und Anforderungen.....	205
3.4.3	Konzepte.....	205
3.4.4	Ein ausgeführtes Beispiel: Ariane 5.....	207
3.4.5	Neue Herausforderungen: Ariane 6.....	210
3.4.6	Übersicht über bestehende Startanlagen	211
3.5	Qualifikationsprozess	212
3.5.1	Einführung/Übersicht	212
3.5.2	Qualifikationskategorien.....	217
3.5.3	Mechanische Qualifikationsmaßnahmen	217
3.5.4	Funktionelle Qualifikationsmaßnahmen	218
3.6	Höhenforschungsraketen.....	220
3.6.1	Aufbau einer Höhenforschungsrakete.....	220
3.6.1.1	Antriebe	221
3.6.1.2	Nutzlasten	222
3.6.1.3	Auslegung	223
3.6.2	Anwendungen.....	223
3.6.2.1	Atmosphärenphysik	224
3.6.2.2	Weltraumwissenschaften	224

3.6.2.3	Schwerelosigkeitsforschung.....	224
3.6.2.4	Hyperschalltechnologien.....	226
3.6.2.5	Studentenexperimente.....	226
3.6.3	Missionsablauf.....	227
3.6.3.1	Trägerauswahl.....	227
3.6.3.2	Startplätze.....	227
3.6.3.3	Missionsvorbereitung.....	229
3.6.3.4	Startdurchführung.....	229
3.6.4	Kommerzielle suborbitale Raumfahrzeuge.....	230
3.6.4.1	Wiederverwendbare Raumfahrzeuge.....	230
3.6.4.2	Absatzmarkt.....	231
3.6.4.3	Gegenüberstellung.....	231
3.6.5	Ausblick.....	231
	Literatur.....	232
4	Raumfahrzeug-Subsysteme.....	235
4.1	Struktur und Mechanismen.....	236
4.1.1	Die Primärstruktur des Raumfahrzeugs.....	237
4.1.1.1	Designtreiber und dimensionierende Lastfälle.....	237
4.1.1.2	Auswahl der Strukturwerkstoffe.....	238
4.1.1.3	Bauweisen.....	239
4.1.1.4	Ausgasung, Degradation und Oberflächenschutz.....	243
4.1.1.5	Inserts.....	244
4.1.1.6	Fertigung und Integration.....	245
4.1.2	Sekundäre und entfaltbare Strukturen.....	246
4.1.2.1	Gerätehalterungen und Isolierungen.....	246
4.1.2.2	Entfaltbare Panels.....	247
4.1.2.3	Booms.....	248
4.1.3	Strukturmechanische Modellierung und Analyse.....	249
4.1.3.1	Finite-Elemente-Modelle und Modalmodelle.....	249
4.1.3.2	Resonanzverhalten und Eigenmoden.....	251
4.1.3.3	Festigkeitsnachweis und Margins of Safety (MoS).....	252
4.1.3.4	Modellierung kritischer Schnittstellen.....	252
4.1.4	Qualifikation der Raumfahrzeugstruktur.....	253
4.1.5	Mechanismen.....	254
4.1.5.1	Pyromechanismen.....	254
4.1.5.2	Nicht-explosive Aktuatoren und Launch Locks.....	255
4.1.5.3	Federmechanismen.....	256
4.1.5.4	Elektromotoren und Stelltriebe.....	258
4.1.5.5	Drallräder und Kreisel.....	259
4.1.5.6	Tribologische Materialien.....	260
4.1.5.7	Schmierung von Lagern und Mechanismen.....	262
	Literatur.....	264
4.2	Energieversorgung.....	265
4.2.1	Energieerzeugung.....	266
4.2.2	Energiequellen.....	266
4.2.2.1	Fotovoltaik.....	268
4.2.2.2	Solardynamik.....	268
4.2.2.3	Nukleare Energieversorgung.....	270
4.2.2.4	Chemische Energie/Brennstoffzelle.....	271
4.2.3	Entwicklungsprozess zur Auslegung einer optimierten EVS-Architektur.....	272
4.2.4	EVS-Architekturen.....	273

4.2.5	Solargenerator	279
4.2.5.1	Solarzellen-Technologien	279
4.2.5.2	Silizium-Solarzellen	281
4.2.5.3	Multijunction Gallium-Arsenid auf Germanium-Solarzellen (GaAs/Ge)	281
4.2.5.4	Elektrische Kennwerte von Solarzellen	282
4.2.5.5	Berechnung der Solargeneratorleistung	282
4.2.5.6	Solargenerator-Technologien	284
4.2.5.7	Reihenschaltung von Solarzellen	285
4.2.5.8	Parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten	285
4.2.5.9	Betriebstemperaturen	286
4.2.5.10	Elektrostatische Aufladung, Entladung und Durchschlagseffekte	286
4.2.6	Energiespeicher	287
4.2.6.1	Sekundärbatterie-Technologien	287
4.2.6.2	Vergleich der Batterietechnologien	291
4.2.6.3	Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von Batterien	293
4.2.6.4	Batterieladeregelung	293
4.2.7	Grundsätzliche EVS-Designbetrachtungen	294
4.2.7.1	Busspannung	294
4.2.7.2	Aufbereitung der Solargeneratorenergie	295
4.2.7.3	Spannungswandler und Leistungsregler	296
4.2.7.4	Erdungskonzept	297
4.2.7.5	Maßnahmen zum Schutz des Energieversorgungsbusses	297
4.2.7.6	Energieverteilung	297
4.2.7.7	Datenmanagement	298
	Literatur	298
4.3	Thermalkontrolle	299
4.3.1	Einleitung	299
4.3.2	Thermische Grundlagen	299
4.3.2.1	Umweltbedingungen	299
4.3.2.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	301
4.3.2.3	Wärmeleitung	304
4.3.2.4	Wärmetransport durch erzwungene Konvektion	305
4.3.2.5	Mathematisches Thermalmodell	306
4.3.3	Entwicklung des Thermalsystems	307
4.3.3.1	Übersicht	307
4.3.3.2	Analyseverfahren	308
4.3.3.3	Verifikation durch Test	312
4.3.4	Technische Lösungen	313
4.3.4.1	Überblick	313
4.3.4.2	Thermische Isolation	313
4.3.4.3	Zwei-Phasen-Kühlkreisläufe	315
4.3.4.4	Thermische Oberflächen	319
4.3.4.5	Heizelemente	320
4.3.4.6	Pumpkühlkreisläufe	321
4.3.5	Beispiele für einen Thermalentwurf	322
4.3.5.1	TerraSAR-X	322
4.3.5.2	Columbus	329
	Literatur	333
4.4	Satellitenantriebssysteme	334
4.4.1	Grundlagen der Satellitenantriebe	334
4.4.1.1	Antriebssystem-Aufgaben	334
4.4.1.2	Stabilisierungsverfahren	334

4.4.2	Antriebssystemtypen	335
4.4.2.1	Kaltgassysteme.....	335
4.4.2.2	Einstoffsysteme	335
4.4.2.3	Zweistoffsysteme	335
4.4.2.4	Elektrische Systeme	336
4.4.2.5	Feststoffsysteme.....	336
4.4.2.6	Antriebe ohne Treibstoff.....	336
4.4.2.7	Vor- und Nachteile verschiedener Antriebssysteme	337
4.4.3	Treibstoffe	338
4.4.4	Förderverfahren und Treibstofflagerung	341
4.4.4.1	Blow-Down-Betrieb	341
4.4.4.2	Förderung bei konstantem Druck.....	342
4.4.4.3	Treibstofflagerung.....	342
4.4.5	Kaltgas-Antriebe	346
4.4.5.1	Kaltgastriebwerke	347
4.4.5.2	Entwurfsaspekte	347
4.4.6	Chemische Antriebe	348
4.4.6.1	Systeme mit Mono-Treibstoffen.....	348
4.4.6.2	Systeme mit Bi-Treibstoffen	352
4.4.7	Elektrische Antriebe.....	356
4.4.7.1	Triebwerkstypen und -Prinzipien.....	356
4.4.7.2	Aufbau eines elektrischen Antriebssystems	358
4.4.7.3	Satelliten mit rein elektrischem Antrieb	359
4.4.8	Komponenten für chemische Antriebssysteme.....	361
4.4.9	Bodenanlagen und Services	363
	Literatur	364
4.5	Lageregelung	365
4.5.1	Einführung und Übersicht	365
4.5.1.1	Bedeutung für den Satellitenbus.....	365
4.5.1.2	Bedeutung für die Nutzlast.....	365
4.5.1.3	Anwendungsgebiete	365
4.5.2	Anforderungen an die Lageregelung	366
4.5.3	Lagebeschreibung	367
4.5.3.1	Koordinatensysteme	367
4.5.3.2	Richtungskosinus-Matrix	367
4.5.3.3	Euler-Winkel	368
4.5.3.4	Quaternionen	368
4.5.4	Lagedynamik.....	369
4.5.4.1	Lagekinematik und -dynamik	369
4.5.4.2	Störmomente.....	369
4.5.5	Lagebestimmung und -regelung	371
4.5.5.1	Lagebestimmung	371
4.5.5.2	Lageregelung.....	372
4.5.6	Lagesensorik.....	372
4.5.6.1	Generelle Aspekte für Lagesensoren	372
4.5.6.2	Sternsensoren.....	373
4.5.6.3	Sonnensensoren.....	375
4.5.6.4	Erdsensoren.....	376
4.5.6.5	Magnetometer	377
4.5.6.6	Gyroskope, Kreisel	378
4.5.6.7	GNSS als Lagesensor	380
4.5.7	Lageaktuatorik	381
4.5.7.1	Generelle Aspekte für Aktuatoren	381

4.5.7.2	Reaktionsräder, Drallräder, Control Moment Gyros	382
4.5.7.3	Triebwerke für die Lageregelung	384
4.5.7.4	Magnet-Torquer	385
4.5.8	Verifikation der Lageregelung	386
4.5.8.1	Analytische Verifikation	387
4.5.8.2	Software-Simulation	387
4.5.8.3	Hardware-in-the-Loop-Test	388
4.5.8.4	Testmodelle und Testumgebung	389
	Literatur	389
4.6	Datenmanagement	390
4.6.1	Bordrechner-Architektur	391
4.6.2	Strahlungsfestigkeit, Temperaturprobleme	393
4.6.3	Busse	394
4.6.3.1	Serielle asynchrone Schnittstelle RS232, RS422 und RS485	394
4.6.3.2	CAN-Bus (Controller Area Network)	394
4.6.3.3	I2C-Bus	395
4.6.3.4	SPI-Bus	396
4.6.3.5	SpaceWire	396
4.6.3.6	MIL-STD-1553	397
4.6.4	Betriebssysteme	397
4.6.5	Rechner mit rekonfigurierbarer Logik	398
4.6.5.1	Logikbausteine	398
4.6.5.2	Hardware-Beschreibungssprachen	399
4.6.6	Software-Entwicklung	400
	Literatur	401
4.7	Kommunikationstechnik	401
4.7.1	Einleitung	401
4.7.2	Frequenzbänder	402
4.7.2.1	Atmosphärische Dämpfung	402
4.7.2.2	Maximale Leistungsflussdichte auf dem Erdboden	402
4.7.3	Kanalkapazität	403
4.7.4	Antennen	404
4.7.4.1	Parabolantenne mit hoher Richtwirkung	404
4.7.4.2	Antennengewinn der Parabolantenne	404
4.7.4.3	Keulenbreite der Parabolantenne	405
4.7.4.4	Polarisation	405
4.7.5	Thermisches Rauschen	405
4.7.5.1	Antennentemperatur	406
4.7.5.2	Systemrauschtemperatur	406
4.7.6	Modulationsarten	407
4.7.6.1	Frequenzmodulation (FM)	407
4.7.6.2	Signal-Rausch-Leistung bei Frequenzmodulation	407
4.7.6.3	Präemphase und Deemphase	408
4.7.6.4	Phasenmodulation (PM)	409
4.7.6.5	Frequency Shift Keying (FSK)	409
4.7.6.6	Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	409
4.7.6.7	Bitfehlerwahrscheinlichkeiten für verschiedene Modulationsarten	409
4.7.7	Pulscodemodulation (PCM)	410
4.7.8	Paket-Telemetrie	412
4.7.9	Code Division Multiple Access (CDMA)	412
4.7.10	Koppelnetzwerke	413
4.7.11	Sende- und Empfangsanlage des BIRD-Satelliten	414

4.7.11.1 Auslegung	414
4.7.11.2 Streckenbilanz	414
4.7.11.3 Ausblick	416
Literatur	417
5 Aspekte bemannter Missionen	419
5.1 Der Mensch im Weltraum	420
5.1.1 Die Besatzungen der Internationalen Raumstation	420
5.1.1.1 Zusammensetzung und Auswahl der Mannschaft	420
5.1.1.2 Entwicklung der Crew-Aufgaben	421
5.1.1.3 ISS-Crew-Alltag	422
5.1.1.4 Die ISS-Crew als Arbeitsteam	423
5.1.2 Das Astronautentraining	425
5.1.2.1 Das mehrstufige Astronautentrainingsprogramm	425
5.1.2.2 Trainingsorganisation und Methoden	428
5.1.2.3 Crew-Qualifikationen	429
5.1.3 Trainingsinfrastruktur im Europäischen Astronauten-Zentrum (EAC)	431
5.1.3.1 Allgemeine Trainingsinfrastruktur	431
5.1.3.2 Infrastruktur für das Columbus-System-Training	431
5.1.3.3 Nutzlast-Training und Simulationsinfrastruktur	433
5.1.3.4 Infrastruktur für das Training zur Raumfahrzeugsteuerung und für Extravehicular Activities ...	434
Literatur	435
5.2 Lebenserhaltungssysteme	435
5.2.1 Aufgaben und Komponenten eines Lebenserhaltungssystems	435
5.2.1.1 Einleitung	435
5.2.1.2 Die Atmosphäre	436
5.2.1.3 Druckkontrolle, Abgabe und Ventile	436
5.2.1.4 Überwachung der Luftzusammensetzung	437
5.2.1.5 Lüftung und Luftkonditionierung	438
5.2.1.6 Luftaufbereitung und Schadgasbindung	440
5.2.1.7 Wasser- und Urinaufbereitung	445
5.2.1.8 Branderkennung und -bekämpfung	447
5.2.1.9 Außenbordaktivitäten	447
5.2.1.10 Thermalkontrolle	449
5.2.1.11 Crew Habitation Systems	450
5.2.1.12 Nahrung	450
5.2.2 Bilanzen	451
5.2.2.1 Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion eines Astronauten	451
5.2.2.2 Das offene Lebenserhaltungssystem	451
5.2.2.3 Das geschlossene Lebenserhaltungssystem	451
5.2.2.4 Vom offenen zum geschlossenen Lebenserhaltungssystem	452
5.2.3 Das Lebenserhaltungssystem der ISS	454
5.2.3.1 ECLS-Designphilosophie	454
5.2.3.2 ECLS-Gesamtsystem	456
5.2.3.3 Versorgung der ISS und Entsorgung	456
5.2.3.4 Komplementäre, dezentrale Konfigurationen	456
5.2.4 Biologische Lebenserhaltungssysteme	458
5.2.4.1 Einleitung	458
5.2.4.2 Terrestrische Entwicklungen, Erfahrungen auf Systemebene	458
5.2.4.3 Fluganlagen	459
5.2.4.4 Offene Punkte	460
Literatur	462

5.3	Rendezvous und Docking	463
5.3.1	Einleitung	463
5.3.2	Die RVD-Mission	463
5.3.2.1	Dragon/Cygnus (USA)	464
5.3.2.2	Sojus und Progress (Russland)	464
5.3.2.3	ATV (Europa)	465
5.3.3	Grundlagen der Bahndynamik	465
5.3.4	Die Sicherheitsanforderungen	468
5.3.5	Das ATV-RVD-System	470
5.3.5.1	Das Antriebssystem	472
5.3.5.2	Flugführung und Flugregelung	473
5.3.6	Verifikation und Test	474
5.3.7	Ausblick	475
	Literatur	477
6	Missionsbetrieb	479
6.1	Satellitenbetrieb	479
6.1.1	Prinzipien und Vorgehensweise	479
6.1.2	Missionstypen	481
6.1.2.1	Satelliten im niedrigen Erdorbit	481
6.1.2.2	Satelliten im hochelliptischen Orbit	482
6.1.2.3	Navigationssatelliten im mittleren Erdorbit	482
6.1.2.4	Geostationäre Satelliten	482
6.1.2.5	Sonden in den Lagrange-Punkten L1/L2	482
6.1.2.6	Interplanetare Sonden	482
6.1.3	Vorbereitungsaktivitäten	483
6.1.3.1	Missionsanalysen und Systemstudien	483
6.1.3.2	Implementierung	484
6.1.3.3	Test und Validierung	484
6.1.3.4	Training und Simulationen	485
6.1.4	Missionsphasen	486
6.1.4.1	LEOP-Betrieb	486
6.1.4.2	Commissioning und In-Orbit Test Phase	487
6.1.4.3	Routinebetrieb	488
6.1.4.4	Außerbetriebnahme und De-Orbiting	488
6.1.5	Aufgaben des Missionsbetriebs	489
6.1.5.1	Analyse des Satellitenverhaltens	489
6.1.5.2	Bearbeitung von Anomalien	489
6.1.5.3	Satellitenbetrieb	489
6.1.5.4	Datenerfassung und -verteilung	489
6.1.5.5	Missionsplanung	490
6.1.5.6	Flugdynamik	491
6.1.5.7	Vermeidung von Kollisionen (Collision Avoidance)	491
6.1.6	Satellitenbetrieb von kommerziellen Konstellationsmissionen	492
6.2	Kontrollzentrum	492
6.2.1	Kontrollräume	492
6.2.1.1	Überblick	492
6.2.2	Hardwarekomponenten	495
6.2.2.1	Rechner- und Netzwerkarchitektur	495
6.2.2.2	Sprachkommunikationssystem	495
6.2.2.3	Videosystem	496
6.2.2.4	Überwachung der technischen Infrastruktur	496

6.2.2.5	Strom- und Klimaversorgung	498
6.2.2.6	Zugangskontrolle und IT-Sicherheit	498
6.2.3	Softwarekomponenten	499
6.2.3.1	Telemetrie- und Kommandosystem	499
6.2.3.2	Display-System	501
6.2.3.3	Missionsplanungssystem	502
6.2.3.4	Unterstützungssoftware	504
6.2.4	Kommunikationsverbindungen	505
6.2.4.1	Lokale Netzwerke	505
6.2.4.2	Externe Netzwerkverbindungen	506
6.2.4.3	Ad-hoc Netzwerke	506
6.3	Bodenstationsnetzwerk	506
6.3.1	Aufgaben einer Bodenstation	506
6.3.1.1	Übertragung vom Boden zum Raumfahrzeug (Uplink)	506
6.3.1.2	Übertragung vom Raumfahrzeug zum Boden (Downlink)	506
6.3.1.3	Telemetrie	508
6.3.1.4	Telekommando	508
6.3.1.5	Bahnbestimmung (Tracking)	508
6.3.2	Standortauswahl für eine Bodenstation	508
6.3.3	Bodenstationskomponenten für erdumlaufende Satelliten	510
6.3.3.1	Empfangspfad (Downlink)	511
6.3.3.2	Sendepfad (Uplink)	511
6.3.3.3	Nachführung einer Antenne	511
6.3.3.4	Rauscharmer Vorverstärker (LNA)	511
6.3.3.5	Endverstärker (HPA)	511
6.3.3.6	Frequenzumsetzer	512
6.3.3.7	Basisband-Geräte	513
6.3.3.8	Zeit- und Referenzfrequenz-Anlagen	514
6.3.3.9	Datennetzwerk	514
6.3.4	Link-Designaspekte	515
6.3.4.1	Frequenzbereiche	516
6.3.4.2	Antennengröße	517
6.3.4.3	Abgestrahlte Leistung EIRP	519
6.3.4.4	Empfangsgüte G-T	519
6.3.4.5	Antennenausrichtung	520
6.3.4.6	Funkfelddispersion und Regendämpfung	521
6.3.4.7	Störleistung	522
6.3.4.8	Die Streckenbilanz	524
6.3.5	Bodenstationsbetrieb	524
6.3.5.1	Steuerungs- und Kontrollsystem	524
6.3.5.2	Operationelle Durchführung einer Passage	525
6.4	Betrieb für bemannte Missionen	526
6.4.1	Vorbereitung	527
6.4.1.1	Entwicklung der Softwarewerkzeuge	528
6.4.1.2	Training, Simulationen und Zertifizierung	529
6.4.1.3	Abstimmung der Schnittstellen zu den internationalen Partnern	529
6.4.1.4	Planung der Aktivitäten	530
6.4.2	Die ISS-Kommunikationsinfrastruktur	531
6.4.2.1	Betrieb der europäischen Kommunikationsinfrastruktur	532
6.4.2.2	Verbindung zu den Nutzerzentren, zum EAC und zu den ESCs	532
6.4.3	Der Betrieb des Columbus-Moduls von 2008 bis 2018	532
6.4.4	Systembetrieb eines ISS-Moduls	533

6.4.4.1	Systembetrieb des Columbus-Moduls	535
6.4.4.2	Lebenserhaltungssystem	536
6.4.4.3	Stromversorgung und Temperaturregelung.....	536
6.4.4.4	Daten- und Kommunikationssystem	536
6.4.5	Koordination des Nutzlastbetriebs auf der ISS.....	536
6.4.5.1	Nutzlastkoordinierung am Col-CC	537
6.4.5.2	Koordination mit den europäischen Nutzerzentren	537
6.4.5.3	Koordination mit der ESA	538
6.4.6	Ausblick	538
	Literatur	538
7	Raumfahrtnutzung	541
7.1	Erdbeobachtung.....	547
7.1.1	Kategorien der Anwendung der Erdbeobachtung	547
7.1.2	Anwendung der Erdbeobachtung am Beispiel der Fernerkundung globaler Schneeflächen und ihrer Dynamiken	553
7.1.3	Anwendung der Erdbeobachtung am Beispiel der Feldfruchtkartierung	556
7.1.4	Anwendung der Erdbeobachtung zum Monitoring von Aquakultur in Küstenzonen	558
7.1.5	Elemente von Erdbeobachtungsmissionen.....	559
7.1.5.1	Beobachtungsprofile.....	560
7.1.5.2	Typische Bahnen von Erdbeobachtungssatelliten	560
7.1.5.3	On Board Data Handling	561
7.1.5.4	Nutzlast-Bodensegmente.....	561
7.1.6	Das Europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus	566
	Literatur	568
7.2	Kommunikation.....	569
7.2.1	Der Anfang – Sputnik.....	569
7.2.1.1	Der Einstieg – COMSAT.....	569
7.2.1.2	Der Mobilfunk – MARISAT.....	569
7.2.1.3	Das nationale MOLNIJA-Programm	570
7.2.1.4	Nationale Satellitennetze.....	570
7.2.2	Die Satellitenkommunikationsdienste.....	570
7.2.2.1	MOLNIJA-Satelliten und -Bahnen	571
7.2.2.2	Lokale Dienste und die Last Mile	571
7.2.3	Die Tiefflieger.....	571
7.2.4	Satelliten in mittlerer Flughöhe	573
7.2.5	Satelliten in höheren Bahnen.....	573
7.2.6	Satelliten in hochinklinierten Bahnen.....	574
7.2.7	Satelliten in inklinierten, geosynchronen Bahnen	574
7.2.8	Satelliten in polaren Bahnen	576
7.2.9	Stratosphärenplattformen.....	576
7.2.10	Die Fernmeldedienste Little – Big – Mega	576
7.2.10.1	Little Services.....	576
7.2.10.2	Big Services.....	577
7.2.10.3	Super Services	577
7.2.10.4	Mega Services.....	577
7.2.10.5	New Space	577
7.2.11	Der Transponder	577
7.2.11.1	Variable Transponder-Sendeleistungen	578
7.2.11.2	Multi-Mode Tubes	578
7.2.11.3	Variable Transponder-Bandbreite.....	578
7.2.11.4	Intelligente Antennen.....	579

7.2.11.5 Störerausblende Satellitenantennen	579
7.2.11.6 Multiple Zellen bildende Antennen	579
7.2.11.7 Bordseitige Verarbeitung und Vermittlung	579
7.2.11.8 Nutzlasten mit multiplen Frequenzbändern	580
7.2.12 Die Übertragungstechnik	580
7.2.13 Die Zugriffstechnik	581
7.2.14 Frequenzbereiche über dem elektromagnetischen Spektrum	581
7.2.15 Die Entsorgung von Satelliten	581
7.2.16 Ausblick für die Satellitenkommunikation	582
7.2.17 Kryptografie	582
7.2.17.1 Klassische kryptografische Verfahren	582
7.2.17.2 Grundlage der Quantenkryptografie	583
7.2.17.3 Realisierung der Quantenkryptografie	584
7.2.17.4 Ausblick für die Quantenkryptografie	585
Literatur	585
7.3 Navigation	585
7.3.1 Historischer Rückblick	585
7.3.1.1 Navigation	586
7.3.1.2 Satellitennavigation	586
7.3.1.3 Satellitennavigation für Raumfahrtanwendungen	587
7.3.2 Referenzsysteme	587
7.3.2.1 Zeitreferenz	587
7.3.2.2 Geodätische Referenz	588
7.3.3 Prinzip der Satellitennavigation	589
7.3.4 Satelliten-Navigationssysteme	590
7.3.5 Prinzipielle Architektur von Satelliten-Navigationssystemen	591
7.3.5.1 Raumsegment	591
7.3.5.2 Bodensegment	592
7.3.5.3 Nutzersegment	592
7.3.6 Frequenzen, Signale und Dienste	593
7.3.6.1 Überblick Frequenzen und Signale für alle Satelliten-Navigationssysteme	593
7.3.6.2 Dienste	593
7.3.6.3 Galileo-Dienste	597
7.3.7 GNSS-Empfänger	597
7.3.7.1 Architektur und prinzipielle Funktionsweise eines GNSS-Empfängers	597
7.3.7.2 GNSS-Empfänger – Raumfahrtspezifische Aspekte	598
7.3.8 GNSS-Beobachtungen	599
7.3.8.1 Code- und Trägerphasen-Beobachtungen	599
7.3.8.2 Fehlereinflüsse auf die Beobachtungen	600
7.3.8.3 Ionosphärenfreie Linearkombination	601
7.3.9 Anwendungen	601
7.3.9.1 Terrestrische Anwendungen	601
7.3.9.2 Raumfahrtanwendungen	602
7.3.10 Zusammenfassung und Ausblick	607
Literatur	609
7.4 Weltraumstronomie und Planetenmissionen	609
7.4.1 Astronomiemissionen	609
7.4.1.1 Röntgensatelliten	609
7.4.1.2 Gamma-Astronomie	610
7.4.1.3 Infrarot-Satelliten	611
7.4.1.4 Hubble Space Telescope (HST) und Nachfolger	612
7.4.1.5 Die Suche nach Exoplaneten	613

7.4.1.6	Messung von Gravitationswellen	613
7.4.2	Mondmissionen	614
7.4.3	Planetenmissionen	617
7.4.4	Bahndynamik interplanetarer Raumsonden	626
7.4.4.1	Interplanetarer Transfer	626
7.4.4.2	Orbit- und Rendezvousmissionen	626
7.4.4.3	Swing-by-Manöver	627
7.4.5	Schlüsseltechnologien für Planetenmissionen	627
7.4.5.1	Thermalsystem für extreme Umgebungsbedingungen	627
7.4.5.2	Radiothermal Generators RTGs	627
7.4.5.3	Landesysteme	628
7.4.5.4	Kommunikationssysteme für große Distanzen	629
7.4.5.5	Navigation	629
	Literatur	630
7.5	Materialwissenschaften	630
7.5.1	Mikrogravitation	630
7.5.1.1	Entstehung	630
7.5.1.2	Auswirkung	632
7.5.2	Kritische Phänomene	633
7.5.3	Quantensysteme	634
7.5.3.1	Ultrakalte Atome	635
7.5.3.2	Anwendungen	636
7.5.3.3	Experimente im Fallturm und auf der ISS	637
7.5.4	Fluidphysik	637
7.5.4.1	Statik	637
7.5.4.2	Dynamik	638
7.5.4.3	Verbrennung	638
7.5.4.4	Weiche Materie	639
7.5.5	Erstarrung	640
7.5.5.1	Kristallzucht	641
7.5.5.2	Gerichtete Erstarrung	641
7.5.5.3	Metalle	641
7.5.5.4	Unterkühlung	643
7.5.6	Thermophysik	643
7.5.6.1	Messungen in Kartuschen	644
7.5.6.2	Behälterfreie Experimente	645
7.5.7	Nutzlasten	646
	Literatur	649
7.6	Weltraummedizin	650
7.6.1	Medizin im Weltraum	650
7.6.2	Missionsszenarien	652
7.6.3	Erfahrungshorizont	652
7.6.4	Umweltparameter	653
7.6.5	Medizinisch-physiologische Probleme beim Aufenthalt im All	654
7.6.5.1	Veränderungen der Körperzusammensetzung	654
7.6.5.2	Kardio-vaskuläres System	654
7.6.5.3	Muskel- und Skelettsystem	656
7.6.5.4	Sinnessysteme	657
7.6.5.5	Ernährung	657
7.6.5.6	Strahlung	658
7.6.6	Psycho-physiologische Probleme beim Aufenthalt im All	659
7.6.6.1	Biorhythmen	659

7.6.6.2	Isolation und Beengtsein	660
7.6.7	Gegenmaßnahmen	661
7.6.7.1	Kardio-vaskuläres System	663
7.6.7.2	Muskel- und Skelettsystem	663
7.6.7.3	Neuro-sensorisches System	663
7.6.7.4	Strahlenschutz	663
7.6.7.5	Individuelle Datenbasis für Astronauten	664
7.6.8	Ausblick	664
	Literatur	664
7.7	Biologie	666
7.7.1	Gravitationsbiologie	667
7.7.1.1	Methoden der Gravitationsbiologie	667
7.7.1.2	Pflanzen nutzen die Schwerkraft zur Ausrichtung ihres Wachstums	668
7.7.1.3	Tierexperimente im Weltraum liefern biomedizinisch relevante Erkenntnisse	670
7.7.1.4	Zellbiologie – auch einzellige Mikroorganismen können oben von unten unterscheiden	671
7.7.1.5	Humane Zellen	673
7.7.2	Interplanetares Leben	673
	Literatur	674
7.8	Robotik	676
7.8.1	Raumfahrt-Robotik	676
7.8.1.1	Manipulatoren im Erdorbit	678
7.8.1.2	Erste Technologie-Experimente auf dem Weg zum teilautonomen Service-Roboter im Weltraum	679
7.8.1.3	Weitere Technologieentwicklungen und -experimente	683
7.8.1.4	Landermissionen zur Exploration des Weltraums	688
7.8.1.5	On-Orbit Servicing	692
7.8.1.6	Eigenschaften und Optionen	692
7.8.1.7	Serviceaufgaben im Orbit	693
7.8.1.8	Bisherige und geplante Missionsbeispiele	695
7.8.1.9	Test und Simulation von On-Orbit Servicing Szenarien	697
7.8.2	Robotik und Künstliche Intelligenz	700
7.8.2.1	Definition der Künstlichen Intelligenz	700
7.8.2.2	Künstliche Intelligenz in der Raumfahrt	701
	Literatur	703
8	Konfiguration/Entwurf eines Raumflugkörpers	705
8.1	Missionskonzept und Missionsarchitektur	706
8.1.1	Die Elemente einer Raumflugmission	706
8.1.1.1	Das Missionsziel	706
8.1.1.2	Das Missionskonzept	706
8.1.1.3	Das Startelement	707
8.1.1.4	Orbit und Konstellation	707
8.1.1.5	Das Raumelement	708
8.1.1.6	Die Kommunikationsarchitektur	708
8.1.1.7	Satelliten-Bodenstationen	709
8.1.1.8	Missionskontrollzentrum und Missionsbetrieb	709
8.1.1.9	Datenprozessierung, Archivierung und Verteilung	710
8.1.1.10	Nutzer	710
8.1.2	Die Segmente einer Raumflugmission	711
8.1.3	Die Missionsarchitektur	711
8.1.4	Entwicklung eines Missionskonzepts und einer Missionsarchitektur	712
8.1.4.1	Die Missionsidee	712

8.1.4.2	Formulierung der Missionsziele	712
8.1.4.3	Definition des Nutzerbedarfs	713
8.1.4.4	Definition der Missionsanforderungen und Randbedingungen	713
8.1.4.5	Grobkonzepte der Mission und alternative Missionsarchitekturen	715
8.1.4.6	Identifizierung der Systemtreiber	715
8.1.4.7	Beschreibung der ausgewählten Missionsarchitektur	715
8.1.4.8	Identifikation der kritischen Anforderungen	715
8.1.4.9	Missionsanalyse und Bewertung, Missionsnutzen	715
8.1.4.10	Beschreibung des Missionskonzepts	715
	Literatur	715
8.2	Systementwurf und Systemintegration	716
8.2.1	Der Systementwurf eines Raumfahrtssystems	716
8.2.1.1	Der Systembegriff	716
8.2.1.2	Der Entwurfsprozess	716
8.2.1.3	Die Entwurfsphilosophie	718
8.2.2	Die Systemintegration	720
8.2.2.1	Der Prozess der Systemintegration	720
8.2.2.2	Integrations- und Testeinrichtungen	721
8.2.2.3	Bodenhilfseinrichtungen	721
8.2.3	Die Systemverifikation	722
8.2.3.1	Die Ziele der Verifikation	722
8.2.3.2	Phasen der Verifikation	722
8.2.3.3	Methoden der Verifikation	722
8.2.3.4	Ebenen der Verifikation	723
8.2.3.5	Modelle zur Verifikation	723
8.2.3.6	Modellphilosophien	724
8.2.3.7	Die Hardwarematrix	724
8.2.3.8	Die Verifikationsmatrix	725
	Literatur	725
8.3	Umweltsimulation und Testkonzepte	725
8.3.1	Wesen und Bedeutung der Umweltsimulation	725
8.3.2	Verifikationsplanung und Kosteneinfluss	727
8.3.3	Mechanische Tests	728
8.3.3.1	Vibrationstests	728
8.3.3.2	Akustik	731
8.3.3.3	Schock	732
8.3.3.4	Modaltest	734
8.3.3.5	Masseigenschaften	736
8.3.4	Weltraumsimulationstests	737
8.3.4.1	Thermal Balance Tests	738
8.3.4.2	Bakeout-Test	738
8.3.4.3	Thermal-Vakuumtest	738
8.3.4.4	Thermal-Zyklentest	739
8.3.4.5	OSTC-Test	739
8.3.4.6	Thermoelastischer Verformungstest	739
8.3.4.7	Testanlagen	741
8.3.5	EMV und Magnetik	743
8.3.5.1	Elektromagnetische Verträglichkeit	743
8.3.5.2	Magnetik (Magnetische Reinheit)	744
8.3.6	Spezielle Umwelttests und Funktionstests	746
8.3.6.1	Spezielle Umwelttests	746
8.3.6.2	Funktionstests	747

8.3.7	Künftige Entwicklung.....	749
	Literatur	749
8.4	Systemdesign am Beispiel CUBESAT.....	750
8.4.1	Einleitung.....	750
8.4.2	Missionskonzepte und -szenarien.....	751
8.4.2.1	Missionsziel.....	751
8.4.2.2	Nutzlast.....	751
8.4.2.3	Satellitenbus	752
8.4.2.4	Orbit.....	752
8.4.2.5	Startrakete.....	752
8.4.2.6	Bodensegment	752
8.4.3	Anforderungen.....	752
8.4.4	Systementwurf und Subsysteme.....	753
8.4.4.1	Lageregelungssystem.....	754
8.4.4.2	Antriebssystem	754
8.4.4.3	Kommunikationssystem	754
8.4.4.4	Energieversorgungssystem.....	755
8.4.4.5	Kommando- und Datenverarbeitungssystem.....	755
8.4.4.6	Thermalsystem.....	756
8.4.4.7	Struktur und Mechanismen	756
8.4.5	Modellphilosophie.....	756
8.4.5.1	Prototypen	756
8.4.5.2	Ingenieurmodell.....	757
8.4.5.3	Flugmodell.....	757
8.4.6	AIT (Assembly, Integration and Testing)	758
8.4.6.1	Integration.....	758
8.4.6.2	Vibrationstests	758
8.4.6.3	Thermal-Vakuumtests	758
8.4.7	Betriebsaspekte und Bodensegment	759
	Literatur	760
8.5	Systemdesign am Beispiel Mikrosatellit	760
8.5.1	Entwurfphilosophie für Mikrosatelliten	760
8.5.2	Design der Missionselemente der Mikrosatellitenmission BIRD	761
8.5.2.1	Motivation und Missionsziel	761
8.5.2.2	Das Missionskonzept	761
8.5.2.3	Das Startelement	761
8.5.2.4	Orbit und Konstellation	761
8.5.2.5	Das Raumsegment.....	762
8.5.2.6	Kommunikationsarchitektur	765
8.5.2.7	Satelliten-Bodenstationen	765
8.5.2.8	Missionskontrollzentrum und Missionsbetrieb	765
8.5.2.9	Datenprozessierung, Archivierung und Verteilung.....	766
8.5.2.10	Nutzer.....	767
8.5.3	Systemintegration und Systemverifikation	767
	Literatur	770
8.6	Galileo Satelliten.....	770
8.6.1	Hintergrund, Missionsbeschreibung	770
8.6.2	Entwicklungsprozess	772
8.6.3	Nutzlast.....	777
8.6.3.1	Atomuhren.....	777
8.6.3.2	Missions-/Navigationsdaten Uplink.....	777

8.6.3.3	Signalgenerierung.....	778
8.6.3.4	Signalverstärkung.....	778
8.6.3.5	Sekundärnutzlasten	779
8.6.4	Satellitenbus	780
8.6.4.1	Struktur und Strukturanalyse.....	780
8.6.4.2	Datenverarbeitung.....	780
8.6.4.3	Telemetrie und Telekommando	781
8.6.4.4	Energieversorgung	781
8.6.4.5	Thermalkontrolle	782
8.6.4.6	Antriebssystem	783
8.6.4.7	Lageregelung.....	783
8.6.5	Serienfertigung und Testkampagne.....	784
8.6.6	Interface zur Trägerrakete und Startkampagne.....	786
8.6.7	Inbetriebnahme im Orbit.....	788
8.7	Die Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X.....	789
8.7.1	Projektorganisation.....	790
8.7.2	Missionskonzept	790
8.7.3	Das Terra-SAR-X- und TanDEM-X-Raumsegment.....	792
8.7.3.1	Satellitenkonzept.....	792
8.7.3.2	Satellitenbus	792
8.7.3.3	SAR-Instrument	793
8.7.3.4	Tracking, Occultation und Ranging Equipment.....	794
8.7.3.5	Laser Communication Terminal	794
8.7.3.6	Unterschiede zwischen TerraSAR-X und TanDEM-X.....	795
8.7.4	Das operationelle Konzept.....	796
8.7.4.1	Auswahl und Festlegung der Orbitparameter.....	796
8.7.4.2	Bodensegment und Missionsbetrieb	798
8.7.5	Inbetriebnahme	799
8.7.6	Missionsprodukte	801
8.7.7	Satellitenzustand und Ausblick.....	802
	Literatur	802
9	Management von Raumfahrtprojekten	805
	Literatur	806
9.1	Projektmanagement in der Raumfahrt.....	806
9.1.1	Projektmanagement	806
9.1.1.1	Rückblick	806
9.1.1.2	Einführung	807
9.1.2	Charakterisierung eines Raumfahrtprojekts.....	810
9.1.2.1	Prozesse in der Raumfahrttechnik.....	811
9.1.2.2	Realisierungsphasen der ESA	813
9.1.2.3	Kommerzieller Beschaffungsansatz.....	816
9.1.3	Projektmanagement-Disziplinen.....	817
9.1.3.1	Planung.....	817
9.1.3.2	Projektführung.....	821
9.1.3.3	Projekt-Controlling	822
9.1.3.4	Kommunikation und Reporting	822
9.1.4	Projektmanagement-Hilfsmittel	822
9.1.4.1	Organisationsformen	822
9.1.4.2	Modellphilosophie.....	824
9.1.4.3	Risikomanagement	824
9.1.4.4	Kosten- und Zeitplanung	824

9.1.4.5	Qualitätsmanagement-Aspekte	826
9.1.4.6	Konfigurationsmanagement	826
9.1.4.7	Logistik	826
9.1.4.8	IT-Sicherheit und Geheimhaltung	827
9.1.4.9	Personen- und Gütersicherheit	827
9.1.5	Projektmanagement-Dokumentation	828
9.1.5.1	Managementplan	828
9.1.5.2	Projekthandbuch	829
9.1.6	Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehung	829
9.1.6.1	Beschaffungsvorgang	829
9.1.6.2	Reviewprozess	830
9.1.6.3	Abnahmen	831
9.1.6.4	Endabnahme	831
9.1.7	Orientierung	832
	Literatur	832
9.2	Qualitätsmanagement	832
9.2.1	Begriffe	833
9.2.2	Anforderungen und Vorgaben	834
9.2.2.1	Anforderungen	834
9.2.2.2	Qualitätspolitik und Qualitätsziele	834
9.2.2.3	Qualitätskennzahlen	834
9.2.2.4	Kundenzufriedenheit	835
9.2.2.5	Handbuch	837
9.2.2.6	Verfahrensanweisungen, Arbeitsanweisungen	837
9.2.3	Managementprozesse	837
9.2.4	Die Kernprozesse	837
9.2.4.1	Angebot	837
9.2.4.2	Entwicklung	837
9.2.4.3	Beschaffung	838
9.2.4.4	Fertigung (MAIT)	838
9.2.4.5	Betrieb und Support	839
9.2.5	Unterstützungsprozesse	839
9.2.6	Die Organisation des Qualitätsmanagements	839
9.2.7	Produktsicherung (PS)	839
9.2.7.1	Design Assurance	841
9.2.7.2	Zuverlässigkeit (Reliability)	841
9.2.7.3	Verfügbarkeit (Availability)	844
9.2.7.4	Wartbarkeit (Maintainability)	845
9.2.7.5	Sicherheit (Safety)	845
9.2.7.6	Material und Prozesssicherung	845
9.2.7.7	Elektrische, elektronische und elektromechanische (EEE) Bauteile	846
9.2.7.8	Qualitätssicherung	846
9.2.7.9	Software-Qualitätssicherung	846
9.2.8	Produktsicherung im Projekt	848
9.2.8.1	Projektphasen	848
9.2.8.2	Projektnahtstellen	848
9.2.8.3	Produktbaum (Product Tree)	848
9.2.8.4	Lasten- und Pflichtenheft	848
9.2.8.5	Auswahl Qualitätsstandards	848
9.2.8.6	Modellphilosophie	849
9.2.8.7	Projektmeilensteine	849
9.2.9	Planung der Produktsicherung im Projekt	851
9.2.9.1	Planungsvoraussetzungen	851

9.2.9.2	Produktsicherungsplan	851
9.2.10	Risikomanagement	852
9.2.11	Lessons Learned	852
9.2.12	Zusammenfassung	852
	Literatur	853
9.3	Kostenmanagement	853
9.3.1	Einleitung	853
9.3.2	Zielsetzung	853
9.3.3	Kostenmanagementprozess	854
9.3.3.1	Prozessüberblick	855
9.3.3.2	Einbettung in den Projektmanagementzyklus	855
9.3.4	Aufgabenfelder im Kostenmanagement	857
9.3.4.1	Kostenschätzung	857
9.3.4.2	Kostenbudgetierung (Kostenplanung)	862
9.3.4.3	Kostenkontrolle	863
9.3.5	Close-out	866
9.3.6	Ausblick	867
9.3.6.1	Virtueller Wettbewerb	867
9.3.6.2	Electronic B2B	867
	Literatur	867
9.4	Raumfahrtrecht	867
9.4.1	Grundlagen des Raumfahrts	867
9.4.1.1	Internationales Raumfahrtrecht der Vereinten Nationen	868
9.4.1.2	Sonstiges internationales Raumfahrtrecht	871
9.4.2	Rechtliche Begleitung der Mission	872
9.4.2.1	Erforderliche staatliche Genehmigungen	872
9.4.2.2	Registrierung von Weltraumgegenständen	880
9.4.2.3	Vertragliche Gestaltung der Mission	881
9.4.2.4	Haftungsrisiken	887
9.4.3	Raumfahrt in der Zuständigkeit von ESA und EU	888
	Literatur	889
	Abkürzungsverzeichnis	893
	Symbolverzeichnis	901
	Sachwortverzeichnis	905