

Wilfried Ley · Klaus Wittmann · Willi Hallmann (Hrsg.)

Handbuch der Raumfahrttechnik



5., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Wilfried Ley/Klaus Wittmann/Willi Hallmann (Herausgeber)

Handbuch der Raumfahrttechnik

5., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 892 Bildern und 132 Tabellen

HANSER



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-45429-3

E-Book-ISBN 978-3-446-45723-2

Einbandbild: NASA/ESA

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser.de

Projektleitung/Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: Firmengruppe Appl, aprinta druck, Wemding

Printed in Germany

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die 1. Auflage des **Handbuchs der Raumfahrttechnik** erschien im Jahre 1988. In drei weiteren Auflagen wurde das Buch jeweils überarbeitet und aktualisiert. In den letzten 30 Jahren hat sich technisch, werkstoffkundlich, verfahrenstechnisch, aber auch politisch, auf dem Gebiet der Raumfahrttechnik und ihrer Nutzung Wesentliches verändert. Für die jetzt vorliegende fünfte Auflage wurde daher das Buch umfassend überarbeitet und auf den Stand des Jahres 2018 aktualisiert.

Die Herausgeber sind dabei so vorgegangen, wie sie auch bei der Entwicklung eines Raumfahrtsystems vorgehen würden: Nach der Festlegung des Missionszieles wird aus zahlreichen Komponenten ein Gesamtsystem integriert, das dann seinen Zweck erfüllen soll.

Beginnen wir also, wie bei jeder guten Mission, mit der übergeordneten Zielsetzung, dem *Mission Statement*: „Das Handbuch der Raumfahrttechnik soll Studierenden, Ingenieuren und Physikern sowie ambitionierten Raumfahrtinteressierten das Design, den Bau und den Betrieb eines Raumfahrtsystems verständlich machen und tiefer reichendes Wissen in den entsprechenden Spezialgebieten vermitteln.“

Aus diesem *Mission Statement* ergeben sich die Anforderungen, dass das Buch:

- sowohl im Ganzen (mit etwas Ausdauer) zu lesen sein soll, aber auch in ausgewählten Teilgebieten befriedigende Einblicke und Informationen liefert,
- einen Überblick über ein Raumfahrtsystem in seiner Gesamtheit gibt,
- die zugrunde liegenden Verfahren für Design, Bau und Betrieb erläutert,
- Literaturhinweise zu den einzelnen Kapiteln enthält, die einer raschen Vertiefung des Wissens dienen können.

Die Herausgeber haben sich überlegt, wie diese Anforderungen erfüllt werden können. Dabei haben sie sich, auch mit Blick auf ihr eigenes Wissen, dagegen entschieden, das Buch ausschließlich selbst zu schreiben. Ein Raumfahrtsystem wird auch nicht vom Systemingenieur in allen Teilen selbst gebaut, sondern unterschiedlichste Komponenten und Bauteile werden sinnvoll zusammengesetzt. So haben wir zahlreiche Spezialisten angesprochen, Kapitel oder sogar Teilkapitel zu schreiben. Diese Kapitel enthalten das Fachwissen des jeweiligen Spezialisten, fügen sich aber trotzdem in diesem Buch zu einem Gesamtsystem zusammen, mit dem das *Mission Statement* (hoffentlich) erfüllt wird.

Bei der Integration der Beiträge wanderten die Herausgeber auf einem schmalen Grat. Zum einen sollte das Buch in seiner Gesamtheit lesbar, also „aus einem Guss“ sein, zum anderen sollten die einzelnen Autoren die spezifische

Herangehensweise in ihrer Disziplin reflektieren und so einem Studierenden einen Hinweis geben, was ihn bei einer entsprechenden Spezialisierung erwartet.

Die Herausgeber möchten sich hier bei allen Autoren für ihre Beiträge und Geduld bei der Einarbeitung von zahlreichen Änderungswünschen herzlich bedanken. Die Liste der Autoren auf den Seiten 8 bis 10 soll die Zuordnung der Autoren zu den einzelnen Kapiteln aufzeigen, damit auch klar wird, bei wem wir uns bedanken. Außerdem gibt sie dem Leser einen Überblick, welche Wissensträger in Deutschland und teilweise in Europa für Fachfragen ansprechbar sind.

Nach dem Erfolg der vierten Auflage wurde der Wunsch nach einer aktualisierten fünften Auflage des Handbuchs aus der Forschung und Industrie an den Carl Hanser Verlag herangetragen. Der Verlag hat, ohne zu zögern, alles in die Wege geleitet, diesen Wunsch in die Tat umzusetzen.

Die Herausgeber möchten sich hierfür beim Verlag für die sorgfältige Betreuung der Weiterentwicklung des Buches über einen langen Zeitraum bedanken. Der Dank gilt insbesondere Herrn *Volker Herzberg*. Weiterhin gilt der Dank Frau *Monika Ebke* (DLR Oberpfaffenhofen), die die Koordination zwischen Herausgebern, Autoren und dem Carl Hanser Verlag hervorragend gemeistert hat.

Das Konzept des Buches führte zu folgender Gliederung: Nach einer Einleitung mit historischem Überblick und der Charakterisierung von Missionstypen im 1. Kapitel folgt im 2. Kapitel ein Blick auf grundlegende Randbedingungen und Gesetzmäßigkeiten, die ein Raumfahrtsystem prägen. Die Kapitel 3 bis 7 charakterisieren die Segmente eines Raumfahrtsystems vom Transfersegment (Kapitel 3) über das Raumfahrzeug (Kapitel 4) und das Bodensegment (Kapitel 6) hin zu Nutzungsdisziplinen und Nutzlasten (Kapitel 7). Einige Besonderheiten von bemannten Missionen sind in Kapitel 5 behandelt. Die abschließenden Kapitel widmen sich den Aufgaben des Systemingenieurs (Kapitel 8) und des Managements bzw. behandeln die Qualitätssicherung und das Raumfahrtrecht (Kapitel 9).

Der Wunsch der Herausgeber, nicht nur einen Überblick über die Raumfahrt-Systemtechnik zu schaffen, sondern auch einen Einblick in die einzelnen Fachdisziplinen zu erlauben, hat zu einem erheblichen Umfang geführt, der einige Lesearbeit erfordert. Das haben die Herausgeber auch selbst erfahren.

Wir hoffen aber, dass die Faszination der Raumfahrt im Text immer wieder durchscheint und so das Lesen erleichtert wird.

Wlfrid Ley, Klaus Wittmann, Willi Hallmann



Thomas Reiter und Alexander Gerst (Bilder: ESA)

Geleit

Wir Menschen sind eine Spezies von Entdeckern. Seit Jahrtausenden nutzen wir all unsere Möglichkeiten, um unseren Lebensraum zu erforschen. Und manche von uns geben sich nicht mit den scheinbar unüberwindbaren technologischen Einschränkungen zufrieden, die uns den Blick hinter die momentanen Umrisse unseres Horizontes erschweren. So wie vor Jahrtausenden der erste Mensch den Sprung an Land gewagt hat, so hat vor einem halben Jahrhundert die Menschheit den ersten Sprung in den Weltraum gewagt. Und dabei wird es nicht bleiben. Wenn man diese Zeiträume nebeneinanderstellt, dann wird klar, dass wir im Moment lediglich die ersten Augenblicke eines neuen Zeitalters erleben – dem Zeitalter der Weltraumfahrt. Diese ersten Schritte der Menschheit im Weltraum, sowohl robotisch als auch astronautisch, werden für viele Jahrtausende als eine der signifikantesten Entwicklungen der menschlichen Evolution bestehen, und wir alle – ob Techniker, Astronauten, Wissenschaftler oder Ingenieure – haben die Möglichkeit, in dieser jungen Disziplin unseren einzigartigen Beitrag zu leisten.

Seit dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik vor 60 Jahren, im Oktober 1957, hat die Raumfahrt weltweit eine beachtliche Entwicklung durchlaufen. Ursprünglich eine Domäne von nur wenigen Nationen, sind heute mehr als 95 Länder weltweit in der Raumfahrt engagiert – und das mit steigender Tendenz. In gleich rasanter Weise hat sich die Raumfahrtindustrie in diesen Ländern

entwickelt. Der Bau von Satelliten ist heute, abgesehen von den einzigartigen wissenschaftlichen Missionen in die Tiefen unseres Sonnensystems, weitgehend Routine, und auch deren Miniaturisierung schreitet stetig voran. In den kommenden Jahren werden Konstellationen von Satelliten unseren Planeten umkreisen und die weltweite Verfügbarkeit von Telekommunikations- und Erdbeobachtungsdiensten ganz erheblich ausweiten.

Eine Vielzahl von Diensten, die ihren Ursprung in der Raumfahrt haben, sind inzwischen nicht nur für hochindustrialisierte Länder, sondern auch für Entwicklungsländer unverzichtbar geworden. Der Datenstrom aus dem Weltraum steigt stetig an. Alleine von den Sentinel Satelliten des europäischen Copernicus Programms werden täglich über 1 Terabyte an Erdbeobachtungsdaten generiert, mit optischen Kommunikationsterminals an geostationäre Datenrelaisatelliten gesendet und von dort zu den Bodenstationen übertragen. Dieser frei zugängliche Strom von Rohdaten erzeugt bereits heute in Europa eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle und schafft damit neue Arbeitsplätze.

Auch die robotische und astronautische Exploration des Weltraums schreitet weiter voran. Die Ziele, die im Rahmen der europäischen Explorationsstrategie verfolgt werden, sind der niedrige Erdorbit, unser Mond und der Mars.

Im niedrigen Erdorbit wird die internationale Raumstation ISS für die Forschung in einem weiten Spektrum wis-

senschaftlicher Disziplinen genutzt. Das Columbus-Modul erfüllt seit dem Andocken im März 2008 in hervorragender Weise seinen Zweck als multidisziplinäres Laboratorium. Seit dem Beginn des letzten Jahrzehnts arbeiteten bisher 16 ESA Astronauten an Bord der ISS. Zusammen mit den Astronauten und Kosmonauten der ISS Partner wurden dabei über 2000 Experimente durchgeführt, darunter etwa 300 Experimente unter der Führung europäischer Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen. Darüber hinaus waren europäische Forscher an etwa 270 Experimenten anderer ISS-Partner beteiligt, was den Gewinn durch die internationale Zusammenarbeit eindrucksvoll hervorhebt. Gleichzeitig dient die ISS als Testplattform für die Entwicklung und Reifung von Technologien, die für zukünftige Explorationsmissionen erforderlich sind. So ist das hochentwickelte europäische Lebenserhaltungssystem, das Life Support Rack (LSR) an Bord, um die Besatzung mit Sauerstoff zu versorgen, das Kohlendioxid aus der Luft herauszufiltern und in einem sogenannten Sabattier-Reaktor wieder in seine Bestandteile aufzubrechen.

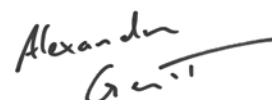
Der Mond rückt aus vielerlei Gründen als Explorationsziel wieder in den Fokus von Raumfahrtagenturen. Man kann ihn gewissermaßen als unseren 8. Kontinent ansehen. Viel können wir dort über die Entstehungsgeschichte unseres eigenen Planeten lernen, man vermutet Ressourcen in den höheren Breitengraden unseres Trabanten und es gibt Hinweise auf Wasservorkommen in den lunaren Polregionen. Zusätzlich bietet die erdabgewandte Seite des Mondes ganz besondere Bedingungen für Astronomie und die Suche und Verfolgung von Asteroiden, die unserem Planeten in Zukunft einmal gefährlich werden könnten. Im Rahmen einer Kooperation mit der NASA ist die europäische Raumfahrtagentur ESA an dem Bau des nächsten Transportsystems beteiligt, das Menschen mehr als 50 Jahre nach der ersten Mondlandung wieder in die Nähe dieses Himmelskörpers bringen soll. Das europäische Service Modul ESM wurde basierend auf dem sehr erfolgreichen und leistungsfähigen Raumtransporter ATV als Antriebsmodul für die amerikanische Orion Kapsel entwickelt. In Zusammenarbeit mit der russischen Raumfahrtagentur werden in Europa zwei essentielle Komponenten für eine robotische Mission zum Südpol des Mondes im Jahre 2021

entwickelt: ein optisches Navigationssystem, das eine präzise Landung auf ebener Fläche in der Nähe der Kraterränder ermöglichen-, sowie ein Bohrer und Analysesystem, das die Bestandteile von Proben aus einer Tiefe von bis zu 2 Metern nehmen und auswerten soll.

Auch was unseren Nachbarplaneten Mars betrifft, existieren in Europa ebenso wie auf internationaler Ebene vielfältige Aktivitäten. Im vergangenen Jahr erreichte die erste von zwei europäischen Sonden den Planeten. Der sogenannte Trace Gas Orbiter (TGO) wird unter anderem nach erfolgtem Aerobraking, das den Orbit auf eine Höhe von durchschnittlich 400 Kilometer verringern soll, mit einer bisher noch nicht dagewesenen Präzision das Spurengas Methan in der Marsatmosphäre messen. Im Jahr 2020 wird dann die zweite Sonde der Mission ExoMars, wiederum in enger Zusammenarbeit mit der russischen Raumfahrtagentur, einen robotischen Rover zur Marsoberfläche bringen. Zu hoffen ist, dass mit den vielfältigen Instrumenten an Bord dieses Rovers Anfang des kommenden Jahrzehnts die Frage beantwortet werden kann, ob es auf dem Mars einmal Leben gegeben hat oder sogar noch gibt.

Um auch in Zukunft die Herausforderungen in der erst wenige Jahrzehnte jungen Disziplin der Raumfahrt zu meistern, bedarf es exzellenter Ingenieurinnen und Ingenieure, die die Entwicklung der für die Missionserfüllung erforderlichen Technologien vorantreiben, den Betrieb von Satelliten in den Tiefen des Weltraums oder von Konstellationen in der Erdumlaufbahn ermöglichen und auch neue Ansätze entwickeln, um die Nutzbarkeit des erdnahen Orbits sicherzustellen. Auf ihren Schultern werden zukünftige Generationen von Raumfahrern und Raumsonden in den Weltraum fliegen. Das vorliegende Handbuch wird sowohl während des Studiums als auch im späteren Beruf als exzellente Referenz für die vielfältigen Aufgabenstellungen in der Entwicklung von Raumfahrtssystemen dienen.

Wir teilen mit allen Nutzern dieses Handbuchs die Begeisterung für die Raumfahrt und wünschen Ihnen bei ihren zukünftigen Projekten viel Spaß und Erfolg!



Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. *Wilfried Ley*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln und Fachhochschule Aachen

Prof. Dr. rer. nat. *Klaus Wittmann*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen und Fachhochschule Aachen

Prof. Dr.-Ing. *Willi Hallmann*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln und Fachhochschule Aachen

Autoren

Dr.-Ing. *Sven Abitzsch*, European Space Agency (ESA), ESTEC, Noordwijk, Niederlande, (Kapitel 9.3)

Dr.-Ing. *Rüdiger Albat*, European Space Agency (ESA) Paris, (Kapitel 3.3, 3.4)

Prof. Dipl.-Ing. *Christian Arbinger*, Galileo GfR Oberpfaffenhofen, (Kapitel 4.5)

Dipl.-Ing. *Wolfgang Bärwald*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Berlin-Adlershof, (Kapitel 8.5)

Prof. Dr. rer. nat. *Ralf Anken*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.7)

Dipl.-Ing. *Ralf Baumgartl*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 8.3)

Dr. rer. nat. *Heike Benninghoff*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.8)

DI Dr. *Thomas Berger*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln (Kapitel 7.7)

Dipl.-Ing. *Torsten Bieler*, European Space Agency (ESA), ESTEC Noordwijk, Niederlande, (Kapitel 9.3)

Prof. Dr.-Ing. *Joachim Block*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Braunschweig, (Kapitel 4.1)

Dipl. Wirt Ing. *Klaus Bockstahler*, Airbus Defence & Space GmbH, Friedrichshafen (Kapitel 5.2)

Dr. *Volker Böhm*, OHB Systems AG, Weßling (Kapitel 9.2)

Prof. Dr.-Ing. *Klaus Brieb*, Technische Universität Berlin, (Kapitel 8, 8.1, 8.2, 8.5)

Prof. Dr. rer. nat. *Stefan Dech*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.1)

Dr. rer. nat. *Erhard Diedrich*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.1)

Dr. Ing. Dipl.-Phys. *Daniel Döring*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn (Kapitel 2.1)

Dipl.-Ing. *Julian Doyé*, LSE Space AG, Weßling, (Kapitel 4.3)

Dipl.-Ing. *Sabrina Eberle*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.2)

Prof. Dr. rer. nat. *Ivan Egry*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.5)

Prof. Dr. *Werner Enderle*, European Space Agency (ESA), European Space Operations Centre, Darmstadt, (Kapitel 7.3)

Dr. rer. nat. *Reinhold Ewald*, Universität Stuttgart, Institut für Raumfahrtsysteme, (Kapitel 5.1)

Dr. *Paolo Ferri*, European Space Agency (ESA), European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, (Kapitel 6.1)

Prof. Dr. rer. nat. *Berndt Feuerbacher*, Past President, International Astronautical Federation (IAF), ehemals DLR, Standort Köln, (Kapitel 7)

Dr. iur. *Michael Gerhard*, Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA), Köln, und Fachhochschule Aachen, (Kapitel 9.4)

Dr. *Alexander Gerst*, European Space Agency (ESA), (Geleit)

Dr. *Michael Geyer*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 6.2)

Dorothee Grevers, Charité – Universitätsmedizin Berlin, (Kapitel 7.6)

Andreas Grielhüsl, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 8.3)

Dr.-Ing. *Anton Grillenbeck*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 2.1, 3.5, 8.3)

Dr. rer. nat. *Gerhard Grunwald*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.8.1)

Prof. Dr. med. Dipl.-Geol. *Hanns-Christian Gunga*, Charité – Universitätsmedizin Berlin, (Kapitel 7.6)

Prof. Dr. Dr. h. c. *Donat-P. Häder*, Friedrich-Alexander-Universität Nürnberg-Erlangen, (Kapitel 7.7)

Dr. *Gerald Hagemann*, Airbus Safran Launchers GmbH, Taufkirchen, (Kapitel 3.3)

- Dr.-Ing. *Oskar Josef Haidn*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Lampoldshausen, (Kapitel 3.3)
- Prof. Dr.-Ing. *Willi Hallmann*, ehemals Fachhochschule Aachen, (Kapitel 1.1)
- Dr.-Ing. *Klaus Hannemann*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Göttingen, (Kapitel 2.3)
- Dr. (PhD.) *Nicolaus Hanowski*, European Space Agency (ESA), ESRI, Frascati, Italien, (Kapitel 1, 1.1, 1.2)
- Dr.-Ing. *Stefan Häsler*, ariane group, Lampoldshausen, (Kapitel 3.4)
- Dr. rer. nat. *Jens Hauslage*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.7)
- Dipl.-Ing. *Martin Häusler*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Weilheim, (Kapitel 6.3)
- Dipl.-Ing. *Bernward Heese*, Airbus Safran Launchers GmbH Bremen, (Kapitel 3.2)
- Priv. Doz. Dr. rer. nat. *Ruth Hemmersbach*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.7)
- Dipl.-Ing. *Christian Henjes*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 2.1, 8.3)
- Prof. Dr.-Ing. *Gerhard Hirzinger*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.8)
- Prof. Dr.-Ing. *Felix Huber*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 4, 4.6)
- Dipl.-Ing. *Wolfgang Jung*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 3.6)
- Dr.-Ing. *Clemens Kaiser*, EUMETSAT, Darmstadt (Kapitel 7.8)
- Prof. Dr.-Ing. *Hakan Kayal*, Universität Würzburg, (Kapitel 8.4)
- Dr.-Ing. *Peter Kern*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 5.2)
- Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. *Frank Kirchner*, Robotics Innovation Center, Bremen (Kapitel 7.8)
- Prof. Dr. med. *Karl Kirsch*, ehemals Charité – Universitätsmedizin Berlin, (Kapitel 7.6)
- Dipl.-Ing. *Joachim Klein*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 9.1)
- Dr.-Ing. *Andreas Kohlhase*, OHB Systems AG, Bremen, (Kapitel 4.3)
- Dr. *Rolf Kozłowski*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 6.2)
- Dipl.-Ing. *Jörg Krüger*, Airbus Safran Launchers GmbH, Lampoldshausen, (Kapitel 3.2, 3.5)
- Dipl.-Ing. *Thomas Kuch*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 6, 6.4)
- Dr. rer. nat. *Holger Kügler*, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Ottobrunn, (Kapitel 2.1, 8.3)
- Dr. *Claudia Künzer*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.1)
- Prof. Dr. *Claus Lämmerzahl*, ZARM Uni Bremen, (Kapitel 7.5)
- Dipl.-Ing. *Klaus Landzettel*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.8)
- Dipl.-Ing. *Günter Langel*, EADS Deutschland GmbH München-Ottobrunn, (Kapitel 3.3)
- Dr.-Ing. *Jens Laßmann*, Airbus Safran Launchers GmbH, Bremen, (Kapitel 3, 3.1, 3.2)
- Prof. Dr.-Ing. *Wilfried Ley*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln und Fachhochschule Aachen, (Kapitel 2.1, 4, 4.2, 8.3, 8.4, 9)
- Dr.-Ing. *José M. A. Longo*, ESA/ESTEC, Noordwijk, Niederlande, (Kapitel 2.3)
- Dr.-Ing. *Bernhard Lübke-Ossenbeck*, OHB-System AG Bremen, (Kapitel 4.5)
- Dipl.-Ing. *Helmut Luttmann*, Airbus Defence and Space GmbH, Bremen, (Kapitel 5, 5.1)
- PD Dr. *Christoph Marquardt*, Max Planck Institute for the Science of Light, Erlangen, (Kapitel 7.2)
- B. Sc. *David Miller*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 8.7)
- Dr. rer. nat. habil. *Oliver Montenbruck*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 2.2)
- Dr. *Sven Oliver Opatz*, Charité – Universitätsmedizin Berlin, (Kapitel 7.6)
- Dr.-Ing. *Kristian Pauly*, OHB Systems AG, Bremen, (Kapitel 8.6)
- Dr. *Frank Pellowski*, OHB System AG Weßling, (Kapitel 9.2)
- Dr.-Ing. *Willigert Raatschen*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 5.2)
- Prof. Dr. *Lorenz Ratke*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.5)
- Prof. Dr.-Ing. *Hans-Günther Reimerdes*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, (Kapitel 2.4)
- Dipl.-Ing. *Thomas Reiter*, European Space Agency (ESA), ESOC, Darmstadt, (Geleit)
- Dipl.-Ing. *Reinhard Röder*, ehemals EADS Astrium GmbH Friedrichshafen, (Kapitel 4.2)
- Dr.-Ing. *Dieter Sabath*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 6.4)
- Dipl.-Ing. *Steffen Scharfenberg*, European Space Agency (ESA), ESTEC, Noordwijk, Niederlande, (Kapitel 2.1)
- M. Sc. *Fabian Schiemenz*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 8.7)
- Dr.-Ing. *Reinhard Schlitt*, OHB-System AG Bremen, (Kapitel 4.3)

- Dipl.-Ing. *Hans-Dieter Schmitz*, ehemals EADS Astrium Space Transportation Lampoldshausen, (Kapitel 4.4)
- Dipl.-Ing. *Alf Schneider*, European Space Agency (ESA), ESTEC, Noordwijk, Niederlande, (Kapitel 8.3)
- Dipl.-Ing. *Artur Scholz*, European Space Agency (ESA), ESOC, Darmstadt, (Kapitel 8.4)
- Dipl.-Geophys. *Gunter Schreier*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 7.1)
- Dr. *Rüdiger Seine*, European Space Agency (ESA), European Astronaut Centre (EAC), (Kapitel 5.1)
- Dipl.-Ing. *Josef Sommer*, Airbus Defence and Space GmbH, Bremen, (Kapitel 5.3)
- Dr. rer. medic. *Alexander Stahn*, Charité – Perelman School of Medicine, Blockley Hall PA, USA, (Kapitel 7.6)
- Mathias Steinach*, Charité – Universitätsmedizin Berlin, (Kapitel 7.6)
- Dipl.-Ing. *Peter Turner*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, (Kapitel 3.6, 4.7)
- Dr. rer. nat. *Stephan Ulamec*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Köln, (Kapitel 7.4)
- Dipl.-Ing. *Dieter Ulrich*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 8.7)
- Dr. rer. nat. *Manfred Warhaut*, ehemals European Space Agency (ESA), European Space Operations Centre (ESOC) Darmstadt, (Kapitel 6.1)
- Dr. med. *Andreas Werner*, Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Königsbrück, (Kapitel 7.6)
- Dr.-Ing. *Carsten Wiedemann*, Technische Universität Braunschweig, (Kapitel 2.4)
- Dipl.-Ing. *Klaus Wiedemann*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Weilheim, (Kapitel 6.3)
- Prof. Dr. rer. nat. *Klaus Wittmann*, ehemals Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Standort Oberpfaffenhofen, und Fachhochschule Aachen, (Kapitel 1, 1.1, 1.2, 2)
- Dipl.-Inform. *Ralf Zimmermann*, Airbus Defence and Space GmbH, Friedrichshafen, (Kapitel 8.7)

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	Elektrostat. 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	Batterieladeregulierung.....	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	Keulbreite 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 Besetzungen 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	Störerausblendende 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	Weltraumastronomie 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 Raumfahrtsystems	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	Entwurfsphilosophie 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 Raumfahrtrechts.....	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