

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](http://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.

*Wilfried 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 Jahrmillionen der erste Fisch 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 erfolgreichem 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 Briß*, 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	31
	Quellen und Literatur	34
<b>1.1</b>	<b>Historischer Überblick</b>	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
<b>1.2</b>	<b>Raumfahrtmissionen</b>	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
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	67
<b>2.1</b>	<b>Umgebung Weltraum</b>	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

<b>2.2</b>	<b>Bahnmechanik</b> .....	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
<b>2.3</b>	<b>Aerothermodynamik und Wiedereintritt</b> .....	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
<b>2.4</b>	<b>Mikrometeoriden und Space Debris</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Trägersysteme</b> .....	141
<b>3.1</b>	<b>Gesamtsysteme</b> .....	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
<b>3.2</b>	<b>Stufentechnologien</b>	<b>160</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Antriebssysteme</b>	<b>178</b>
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
<b>3.4</b>	<b>Startinfrastruktur</b>	<b>204</b>
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
<b>3.5</b>	<b>Qualifikationsprozess</b>	<b>212</b>
3.5.1	Einführung/Übersicht	212
3.5.2	Qualifikationskategorien	217
3.5.3	Mechanische Qualifikationsmaßnahmen	217
3.5.4	Funktionelle Qualifikationsmaßnahmen	218
<b>3.6</b>	<b>Höhenforschungsraketen</b>	<b>220</b>
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
<b>4</b>	<b>Raumfahrzeug-Subsysteme.....</b>	<b>235</b>
<b>4.1</b>	<b>Struktur und Mechanismen.....</b>	<b>236</b>
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
<b>4.2</b>	<b>Energieversorgung.....</b>	<b>265</b>
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
<b>4.3</b>	<b>Thermalkontrolle .....</b>	<b>299</b>
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 Thermal systems .....	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
<b>4.4</b>	<b>Satellitenantriebssysteme .....</b>	<b>334</b>
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
<b>4.5</b>	<b>Lageregelung .....</b>	<b>365</b>
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
<b>4.6</b>	<b>Datenmanagement</b>	<b>390</b>
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
<b>4.7</b>	<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>401</b>
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
<b>5 Aspekte bemannter Missionen .....</b>	<b>419</b>
<b>5.1 Der Mensch im Weltraum .....</b>	<b>420</b>
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
<b>5.2 Lebenserhaltungssysteme .....</b>	<b>435</b>
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

<b>5.3 Rendezvous und Docking</b> .....	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
<b>6 Missionsbetrieb</b> .....	479
<b>6.1 Satellitenbetrieb</b> .....	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
<b>6.2 Kontrollzentrum</b> .....	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
<b>6.3</b>	<b>Bodenstationsnetzwerk</b>	<b>506</b>
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
<b>6.4</b>	<b>Betrieb für bemannte Missionen</b>	<b>526</b>
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
<b>7</b>	<b>Raumfahrtnutzung .....</b>	<b>541</b>
<b>7.1</b>	<b>Erdbeobachtung .....</b>	<b>547</b>
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
<b>7.2</b>	<b>Kommunikation .....</b>	<b>569</b>
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
<b>7.3</b>	<b>Navigation .....</b>	<b>585</b>
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
<b>7.4</b>	<b>Weltraumastronomie und Planetenmissionen .....</b>	<b>609</b>
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
<b>7.5</b>	<b>Materialwissenschaften .....</b>	<b>630</b>
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
<b>7.6</b>	<b>Weltraummedizin .....</b>	<b>650</b>
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
<b>7.7</b>	<b>Biologie</b> .....	<b>666</b>
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
<b>7.8</b>	<b>Robotik</b> .....	<b>676</b>
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
<b>8</b>	<b>Konfiguration/Entwurf eines Raumflugkörpers</b> .....	<b>705</b>
<b>8.1</b>	<b>Missionskonzept und Missionsarchitektur</b> .....	<b>706</b>
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
<b>8.2</b>	<b>Systementwurf und Systemintegration .....</b>	<b>716</b>
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
<b>8.3</b>	<b>Umweltsimulation und Testkonzepte .....</b>	<b>725</b>
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
<b>8.4</b>	<b>Systemdesign am Beispiel CUBESAT.....</b>	<b>750</b>
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
<b>8.5</b>	<b>Systemdesign am Beispiel Mikrosatellit .....</b>	<b>760</b>
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
<b>8.6</b>	<b>Galileo Satelliten .....</b>	<b>770</b>
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
<b>8.7</b>	<b>Die Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X</b>	<b>789</b>
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
<b>9</b>	<b>Management von Raumfahrtprojekten</b>	<b>805</b>
	Literatur	806
<b>9.1</b>	<b>Projektmanagement in der Raumfahrt</b>	<b>806</b>
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
<b>9.2</b>	<b>Qualitätsmanagement .....</b>	<b>832</b>
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
<b>9.3</b>	<b>Kostenmanagement .....</b>	<b>853</b>
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
<b>9.4</b>	<b>Raumfahrtrecht.....</b>	<b>867</b>
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
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>893</b>
	<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>901</b>
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>905</b>