
Springer Reference Naturwissenschaften

Springer Reference Naturwissenschaften bietet Praktikern, Wissenschaftlern und Studierenden zielführendes Fachwissen in aktueller, modularisierter und verständlicher Form.

Während traditionelle Handbücher ihre Inhalte bislang lediglich gebündelt und statisch in einer Druckausgabe präsentiert haben, bietet *Springer Reference Naturwissenschaften* eine um dynamische Komponenten erweiterte Online-Präsenz: ständige digitale Verfügbarkeit, frühes Erscheinen neuer Beiträge „online first“ und fortlaufende Erweiterung und Aktualisierung der Inhalte.

Die Werke und Beiträge der Reihe repräsentieren den jeweils aktuellen Stand des Wissens des Faches, insbesondere auch in den Anwendungen und in der Verzahnung der verschiedenen Gebiete.

Review-Prozesse sichern die Qualität durch die aktive Mitwirkung namhafter Herausgeber(inne)n und ausgesuchter Autor(inn)en. *Springer Reference Naturwissenschaften* wächst kontinuierlich um neue Kapitel und Fachgebiete.

Weitere Informationen zu dieser Reihe finden Sie auf <http://www.springer.com/series/15072>

Reiner Rummel
Herausgeber

Erdmessung und Satellitengeodäsie

Handbuch der Geodäsie,
herausgegeben von Willi Freeden und
Reiner Rummel

mit 168 Abbildungen und 13 Tabellen

 Springer Spektrum

Herausgeber

Reiner Rummel
Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
München, Deutschland

Springer Reference Naturwissenschaften

ISBN 978-3-662-47099-2

ISBN 978-3-662-47100-5 (eBook)

ISBN 978-3-662-55045-8 (Bundle)

DOI 10.1007/978-3-662-47100-5

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort der Gesamtherausgeber

In den Jahren 1961 bis 1968 erschienen die Bände der 10. und letzten Auflage des „Handbuch der Vermessungskunde“, jeweils mit einem Vorwort von Max Kneissl. Die erste Auflage aus den Jahren 1877 und 1878 stammte noch aus der Feder von Wilhelm Jordan (1842–1899). Sie fasste in zwei Büchern das Vermessungswesen der damaligen Zeit zusammen.

Seither hat sich in der Geodäsie ein tief greifender Wandel vollzogen. Mit der stürmischen Entwicklung der Computertechnologie einher gingen neuartige und präzisere Verfahren des Messens, der mathematischen Darstellung und Analyse, und parallel hierzu eine beträchtliche Erweiterung des Aufgabenspektrums. Man könnte von zwei Modernisierungswellen sprechen: In den fünfziger bis siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts ergaben sich aus neuen physikalischen Messprinzipien, den Anfängen elektronischen Rechnens und vor allem dem Eintritt ins Raumfahrtzeitalter grundlegend neue Perspektiven für die Geodäsie. In Ansätzen sind einige der daraus resultierenden Methoden und Verfahren in den sechs Bänden der zehnten Auflage des „Handbuch der Vermessungskunde“ bereits wieder zu finden. Seit einiger Zeit erleben wir eine zweite, vergleichbar grundlegende Welle der Veränderung der Geodäsie. Die komplette Verarbeitungskette von geodätischer Information, von ihrer Erfassung bis zur Anwendung geschieht ausschließlich digital, analoge geodätische Messverfahren wurden fast vollständig abgelöst von Verfahren, die auf der Verarbeitung elektromagnetischer Signale beruhen und es sind Satellitensysteme entstanden, mit denen die Erde global sehr schnell und genau vermessen werden kann. Auch die wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Anforderungen an die Geodäsie haben sich verändert. War früher die Aufgabe der Geodäsie überwiegend eine statische Bestandsaufnahme unseres Lebensraums und der Erde als Ganzem, so widmet sich die Geodäsie heute primär Veränderungsprozessen. Neben die klassischen Aufgabengebiete im Ingenieurbereich und in der Landesvermessung trat die Geoinformatik mit all ihren Facetten der Bereitstellung von Geoinformation. Die geodätischen Beiträge zu der Erforschung des Erdsystems – sowohl in seiner Gesamtheit als auch in lokalen Teilsystemen und bei der Bewältigung der Herausforderungen des globalen Wandels – spiegeln ebenfalls eine neue Qualität der Geodäsie wider.

Das vorliegende *Handbuch der Geodäsie* war inspiriert durch das große Erbe des „Handbuch der Vermessungskunde“ von Jordan-Eggert-Kneissl. Es wäre jedoch undenkbar, die neueren Entwicklungen in der Geodäsie mit vergleichbarer Akribie, Vollständigkeit und Detailgenauigkeit darstellen zu wollen, wie dies noch in den sechziger Jahren mit der zehnten Auflage des „Jordan-Eggert-Kneissl“ gelang. Stattdessen will das *Handbuch der Geodäsie* ein repräsentatives Gesamtbild des Sachstands der heutigen Geodäsie bieten. Die Geodäsie wird nicht flächendeckend behandelt, sondern exemplarisch anhand sorgfältig ausgewählter Einzelthemen. Die Beiträge sollen einen allgemein verständlichen Zugang zu den Themen der aktuellen Forschung und Entwicklung bieten. Das Handbuch richtet sich an die Studierenden und Kollegen in Forschung und Praxis ebenso wie an Fachkollegen der Nachbardisziplinen, die sich über den Stand der Geodäsie und ihre Herausforderungen informieren wollen.

Das Handbuch wurde zu diesem Zweck in sechs Einzelbände untergliedert. Für die Herausgabe eines jeden der sechs Einzelbände konnte ein renommierter Geodäsie-Kollege gewonnen werden. Die Herausgeber der Einzelbände sind in Klammer angegeben:

- Erdmessung und Satellitengeodäsie (Rummel, München)
- Fotogrammetrie und Fernerkundung (Heipke, Hannover)
- Ingenieurgeodäsie (Schwarz, Weimar)
- Geoinformationssysteme (Sester, Hannover)
- Bodenordnung und Landmanagement (Kötter, Bonn)
- Mathematische Geodäsie (Freeden, Kaiserslautern).

Den Herausgebern der Einzelbände wurde die Konzeption des Inhalts und die Auswahl der Autoren überlassen. Die Initiative zu diesem Handbuch geht zurück auf den Springer-Verlag. Wir bedanken uns sehr herzlich für die gute Zusammenarbeit mit den Vertretern des Verlags. Großer Dank geht an die Mitherausgeber und an alle Autoren dieser sechs Bände.

Kaiserslautern und München
April 2016

Willi Freedен und Reiner Rummel

Vorwort zum Band Erdmessung und Satellitengeodäsie

Die Erde ist ein dynamischer Planet. Sie ist einer Vielzahl äußerer und innerer Prozesse unterworfen, die unter anderem die Verteilung der Massen beeinflussen und die Form der Erdfigur verändern. Beispiele sind die leichte Taumelbewegung der rotierenden Erde, die Drift der tektonischen Platten, das Pulsieren der festen Erde und Ozeane im Rhythmus der Gezeiten, die Landhebungen in nördlichen Breiten seit dem Verschwinden der Auflast des Eises der letzten Eiszeit, das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde oder der Anstieg des Meeresspiegels. Es ist die Aufgabe der Geodäsie Form und Schwerefeld der Erde einschließlich der zeitlichen Veränderungen zu vermessen, doch lange waren die zur Verfügung stehenden Messmittel unzureichend.

Der technologische Wandel der zurückliegenden 60 Jahre schuf großartige neue Möglichkeiten. Insbesondere der Eintritt ins Raumzeitalter bedeutete für die Geodäsie einen Quantensprung. Durch den Einsatz von Satelliten wurde die Erdmessung erstmals tatsächlich global und dreidimensional. Ozeane und Eisschilde stellen keine Hindernisse mehr dar, sie lassen sich aus dem Weltraum mit gleicher Präzision erfassen wie die Kontinente. Verfeinerungen resultieren aus der Kombination von Raumverfahren mit terrestrischen Daten. Da auch die zeitlichen Veränderungen der physischen Erdoberfläche und gravimetrischen Erdfigur messbar wurden, gelingt es der Erdmessung neuerdings, fundamentale Beiträge zum Verständnis des Erdsystems und des Klimawandels zu liefern.

Im Band Erdmessung und Satellitengeodäsie werden exemplarisch die historischen Wurzeln, methodischen Grundlagen, verwendeten Messverfahren sowie die Forschungstrends vorgestellt.

Dieser Band richtet sich an Dozenten und Studierende der Geodäsie und verwandter Geo-, Natur- und Ingenieurwissenschaften, sowie an Kollegen aus Wissenschaft und Praxis der Geodäsie mit vertieftem Interesse an den Entwicklungen, theoretischen Grundlagen und Anwendungen der Erdmessung und Satellitengeodäsie.

Mein besonderer Dank geht an die Autoren dieses Bandes, allesamt hervorragende Vertreter ihres Fachgebietes für ihre Beiträge. Ich hoffe, es gelingt mit diesem Band dem Leser die Faszination der gegenwärtigen Erfolgsgeschichte der Satellitengeodäsie und Erdmessung näher zu bringen.

Ich bedanke mich für die angenehme Zusammenarbeit mit den Vertretern des Verlags.

München
April 2017

Reiner Rummel

Inhaltsverzeichnis

1	Geschichte der Erdmessung	1
	Wolfgang Torge	
2	Signalverarbeitung in der Physikalischen Geodäsie	73
	Wolf-Dieter Schuh	
3	Molodenski quo vadis?	123
	Bernhard Heck und Kurt Seitz	
4	Bahn- und Gravitationsfeldbestimmung aus den Positionen tief fliegender Satelliten	155
	Gerhard Beutler und Adrian Jäggi	
5	Globale Schwerefeldmodellierung am Beispiel von GOCE	217
	Roland Pail	
6	Topographische Modellierung des Gravitationsfeldes	259
	Christian Hirt	
7	Erdrotation	295
	Florian Seitz und Jürgen Müller	
8	Geometrische Referenzsysteme	325
	Manuela Seitz, Detlef Angermann, und Mathis Bloßfeld	
9	Höhensysteme der nächsten Generation	349
	Christian Gerlach, Thomas Gruber, und Reiner Rummel	
10	Globales Geodätisches Beobachtungssystem	401
	Hansjörg Kutterer	
11	Neue Sensorik für die Schwerefeldbestimmung und relativistische Geodäsie	423
	Jakob Flury	

12 Zukunft der globalen Geodäsie und Fernerkundung aus Sicht des Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam	443
Harald Schuh, Jens Wickert, Mike Sips, Tilo Schöne, Christian Rogaß, Sigrid Roessner, Rolf König, Volker Klemann, Robert Heinkelmann, Henryk Dobslaw, und Georg Beyerle	
Sachverzeichnis	499

Autorenverzeichnis

Detlef Angermann Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München, München, Deutschland

Gerhard Beutler Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz

Georg Beyerle Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Mathis Bloßfeld Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München, München, Deutschland

Henryk Dobsław Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Jakob Flury Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Christian Gerlach Kommission für Erdmessung und Glaziologie, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München, Deutschland

Thomas Gruber Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, München, Deutschland

Bernhard Heck Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

Robert Heinkelmann Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Christian Hirt Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Institute for Advanced Study, Technische Universität München, München, Deutschland

Department of Spatial Sciences, Western Australian Geodesy Group, The Institute for Geoscience Research, Curtin University Perth, Bentley, Australien

Adrian Jäggi Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz

Volker Klemann Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Rolf König Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Hansjörg Kutterer Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt, Deutschland

Jürgen Müller Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Roland Pail Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, München, Deutschland

Sigrid Roessner Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Christian Rogäß Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Reiner Rummel Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, München, Deutschland

Tilo Schöne Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Harald Schuh Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Wolf-Dieter Schuh Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn, Bonn, Deutschland

Florian Seitz Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut und Lehrstuhl für Geodätische Geodynamik, Technische Universität München, München, Deutschland

Kurt Seitz Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

Manuela Seitz Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München, München, Deutschland

Mike Sips Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland

Wolfgang Torge Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Jens Wickert Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Stiftung des öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg, Potsdam, Deutschland