

Detlef Angermann · Roland Pail  
Florian Seitz · Urs Hugentobler



# Mission Erde

Geodynamik  
und Klimawandel  
im Visier der Satellitengeodäsie

SACHBUCH

 Springer

# Mission Erde

Detlef Angermann · Roland Pail ·  
Florian Seitz · Urs Hugentobler

# Mission Erde

Geodynamik und Klimawandel  
im Visier der Satellitengeodäsie

Mit Interviewbeiträgen von Günter Hein,  
Harald Lesch und Stefan Rahmstorf

 Springer

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

Roland Pail  
Astronomische & Physikalische Geodäsie  
Technische Universität München  
München, Bayern, Deutschland

Florian Seitz  
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut  
Technische Universität München  
München, Bayern, Deutschland

Urs Hugentobler  
Satellitengeodäsie  
Technische Universität München  
München, Bayern, Deutschland

ISBN 978-3-662-62337-4      ISBN 978-3-662-62338-1 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62338-1>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Einbandabbildung: © moZZ / stock.adobe.com, Satellit: © ESA, P. Carril

Planung/Lektorat: Stefanie Wolf

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

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

# Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser!

Wollten Sie immer schon erfahren, woher Ihr Handy weiß, wo Sie gerade unterwegs sind? Interessiert es Sie, wie geodynamische Prozesse und der fortschreitende Klimawandel unseren Planeten ständig verändern und wie wir zuverlässige Informationen über seinen Zustand und seine Veränderungen gewinnen können?

Gerade in Zeiten von „Fake News“ und einer im wahrsten Sinne des Wortes heißen Klimadebatte finden wir es wichtig, einmal niederzuschreiben, was wir gesichert wissen, weil wir es direkt gemessen haben. Wir stellen dar, wie aus geodätischen Satellitenbeobachtungen eine Vielzahl an Informationen über den Zustand und die Veränderungen unserer Erde gewonnen werden und wie sich diese Informationen in immer bessere Modelle zur Beschreibung unseres komplexen Erdsystems einspeisen lassen – aber auch, wo wir mit unseren Messungen an Grenzen stoßen. Und es gibt da noch einen Aspekt, der vielfach übersehen wird. Uns Geodäten wird häufig mit Augenzwinkern vorgeworfen, dass wir uns lieber mit Messfehlern beschäftigen als mit der Messung selbst. Tatsächlich aber ist das Bewusstsein über Ungenauigkeiten entscheidend, um beurteilen zu können, wie verlässlich die aus den Messungen abgeleiteten Ergebnisse und Modelle überhaupt sind. Nur auf der Grundlage dieses Wissens kann die Zuverlässigkeit von Prognosen über zukünftige Entwicklungen beurteilt werden. Sie werden sehen: Mit hochgenauen Satellitendaten liefert die moderne Geodäsie belastbare Aussagen über geodynamische Prozesse im Erdsystem und über die Auswirkungen des Klimawandels. Über die Realisierung von globalen

Bezugssystemen höchster Genauigkeit schafft sie zudem die nötige Voraussetzung, um kleinste Veränderungen verlässlich über Jahre hinweg festzustellen.

Die Geodäsie ist eine der ältesten Wissenschaften der Welt und ihre Daten und Erkenntnisse hatten schon immer eine hohe gesellschaftliche Relevanz. Mit dem Eintritt in das Satellitenzeitalter haben sich ihr Charakter und das Anwendungsspektrum jedoch geradezu explosionsartig entwickelt. Für viele Bereiche des täglichen Lebens und als Informationsgrundlage für politische Entscheidungsträger spielt sie heute eine wichtige Rolle.

Ja, wir wissen es: Dieses Buch ist mit großem Mut zu noch größerer Lücke geschrieben – und mit der für viele vielleicht ungewohnten Perspektive „von oben“. Wir bitten Kolleginnen und Kollegen aus anderen geodätischen Disziplinen um Nachsicht, dass wir deren Steckenpferde wie Ingenieurgeodäsie, Geoinformation, Landmanagement, Fotogrammetrie oder Kartografie, nur am Rande gestreift haben, obwohl sie mit ihren Ergebnissen genauso hohe gesellschaftliche Relevanz erzielen.

Dieses Buch ist geschrieben für Neugierige! Suchen Sie Formeln und mathematische Herleitungen? Tut uns Leid, dann ist es ein Fehlkauf. Erwarten Sie, auf der Basis dieses Buches jene umfassenden Algorithmen programmieren zu können, die benötigt werden, um die hier beschriebenen Ergebnisse zu reproduzieren? Vergeben Sie uns, dann ist das Buch für Sie ebenfalls ein Fehlkauf. Wir erheben auch nicht den Anspruch, ein Lehrbuch verfasst zu haben, obwohl die Inhalte für Studierende aus den Natur-, Geo- und Technikwissenschaften gleichermaßen interessant sein werden.

Zuletzt noch eine Anmerkung für Sprachwissenschaftler: Als ausgebildete Ingenieure verwenden wir in diesem Buch den zweckmäßigen Ansatz des generischen Maskulinums. Dadurch ersparen wir uns und Ihnen gendersprachliche Verrenkungen. Also, liebe Leserin und lieber Leser (ein letztes Mal), wir tun das mit der ausdrücklichen Feststellung, dass wir uns über großes Interesse weiblicher Lesender (sehen Sie, genau deshalb!) mindestens genauso freuen. Ja genau, Frauen und Mädels, wir brauchen auch Euch in den Natur- und Technikwissenschaften ganz dringend!

Und nun laden wir Sie ein, uns auf unserer „Mission Erde“ zu begleiten. Wir wünschen Ihnen viel Spaß und Interesse beim Erkunden und Vermessen des wohl spannendsten Planeten unseres Universums!

# Prolog

Traurig schaut sie aufs Meer hinaus. Eine sanfte Brise zieht vom Meer herein und wiegt ihr langes, wallendes Haar. Gedankenverloren lässt sie ihre Blicke über den Horizont schweifen. Sie bleiben an den letzten Strahlen der untergehenden Sonne hängen, die der große Ozean täglich neu verschluckt – wieder und wieder. Das Meer war bisher ihr Freund gewesen. Über viele Generationen hat es ihre Familie mit Nahrung versorgt und ihr als wichtigster Spielplatz während ihrer Kindheit gedient. Unzählige Geschichten haben ihre Eltern und Großeltern von diesem Paradies erzählt. Nun hat sich aber etwas Entscheidendes verändert. Fast unmerklich, aber stetig dringt das Meer während der Gezeitenflut immer tiefer in das Landesinnere ein, verschluckt mehr und mehr vom schneeweißen Sandstrand und frisst sich immer weiter in Richtung ihres Dorfes vor. Noch hat es nicht begonnen, ihr Haus zu unterspülen. Sie weiß nicht, dass moderne Satellitentechniken das Fortschreiten des Meeresspiegelanstiegs mit hoher Genauigkeit vom Weltraum aus tagtäglich vermessen. Damit hat sie sich noch nie beschäftigt, wie moderne Technik bislang noch nie ein zentrales Element ihres Lebens war. Aber sie kann das, was die Satelliten messen, mit eigenen Augen sehen und erahnen, dass das ansteigende Meer nicht nur ein Problem für ihre kleine Welt darstellt. Sie weiß, dass sie bald wird gehen müssen, noch bevor das aquatische Ungetüm die Türschwelle ihres Hauses erreicht. Das steigende Salzwasser des Meeres hat das Grundwasser verseucht und die Böden unfruchtbar gemacht. Seit sich ihre Familie erinnern kann, konnte sich ihr Dorf autark ernähren. Von den Schätzen, die der reichlich vorhandene Boden und das noch reichlicher vorhandene Meer ihnen zu bieten hatten. Das hat sich nun geändert – schleichend, aber doch unaufhaltsam.

Sie werden von hier wegziehen in die nächstgelegene Großstadt am Festland. Zumindest für ein paar Generationen, bis auch diese vom steigenden Meeresspiegel bedroht wird. Sie wird gehen müssen, aber sie weiß, dass ihr Herz für immer hierbleiben wird ...

Strömender Regen peitscht auf sie herab, durchnässt ihre Haare und ihre Kleidung. Sie vergräbt sich tief in ihre Jacke und versucht, an der nächstgelegenen Markise des Lebensmittelgeschäfts Unterstand zu finden. Umständlich kramt sie ihr neues Mobiltelefon aus der Tasche. Mit dem Umzug wurde sie mit einem Schlag mit einer völlig neuen Welt konfrontiert. Riesige Häuser, belebte Straßen, schmutzige Luft und unzählige Menschen. Nichts ist wie früher, und etwas Gravierendes hat sich geändert: Moderne Technik beherrscht das neue Leben in der pulsierenden Stadt. Mittlerweile hat sie sich an das Handy gewöhnt und gelernt, es für sich persönlich zu nutzen. Es ist nicht größer als die Muschelschale, die sich in ihrer anderen Jackentasche befindet und sie an ihr altes Leben erinnern, sie mit ihrem alten Leben verbinden soll. Dieses kleine Hightech-Gerät ist zu ihrem unverzichtbaren Begleiter geworden, um sich in diesem Dschungel aus Häusern, Autos und Straßen zu orientieren, während ihre Eltern und Großeltern so gar nicht damit warm werden können. Seit gut fünf Wochen ist sie nun hier, aber vieles ist ihr noch fremd, etwa die undurchsichtige Bürokratie, mit der sie zuvor niemals etwas zu tun hatte. Sie muss aufs Einwohnermeldeamt, um persönliche Dinge zu regeln und wichtige Dokumente vorzulegen. Noch nie war sie in diesem Teil der Stadt, der so ganz anders aussieht wie jener, wo sie zusammen mit ihrer Familie eine kleine, einfache Wohnung bezogen hat. Sie hat im strömenden Regen die Orientierung verloren und sich verlaufen. Um ihr Mobiltelefon vor der Sintflut, die vom Himmel strömt, zu schützen, presst sie sich eng an die Wand. Der Bildschirm wird hell erleuchtet, als sie die Aktivierungstaste drückt. Unbemerkt nimmt ihr Mobiltelefon Kontakt mit allen von ihrem Standort aus sichtbaren Positionierungssatelliten auf, um in Windeseile ihre aktuelle Position zu ermitteln und auf der elektronischen Karte anzuzeigen. Weitere Informationen poppen auf: die Positionen von Banken, Postämtern, Restaurants und Supermärkten in ihrer Nähe. All das, was ein ausgeklügeltes System dahinter als „wichtige Orte“ interpretiert hat. Nachdem der Regen nun langsam an Intensität verliert, setzt sie sich in Bewegung, geleitet von einem kleinem blauen Punkt und einem Pfeil auf einem winzigen Bildschirm ...

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
1.1	Die Erde – Ein dynamischer Planet	1
1.2	Erdsystem, Klimawandel und Gesellschaft	3
1.3	Geodynamische Prozesse – Sehr ungleich schnell	5
1.4	Globale Vermessung der Erde	6
<b>2</b>	<b>Die Vermessung der Erde im Wandel der Zeit</b>	11
2.1	Einführung	11
2.2	Die Ursprünge der Vermessung	13
2.3	Das antike Griechenland – Von der Scheibe zur kugelförmigen Erde	15
2.4	Die Vermessungskünste im römischen Reich	18
2.5	Mehr als ein Wechsel der Perspektive – Der schwierige Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltsystem	24
2.6	Die Physik des Universums – Von Newton zu Einstein	30
2.7	Ist die Erde rund wie eine Kugel? – Der erbitterte Streit um die Figur der Erde	34
2.8	Maß für Maß mit Dreiecken – Die erste landesweite Vermessung Deutschlands	41
2.9	Die Geodäsie auf dem Weg zu einer internationalen Wissenschaft	45
2.10	Erster Satellitenstart 1957 – Der Beginn einer neuen Ära	51

<b>3</b>	<b>Die Geodäsie im 21. Jahrhundert – Globale Referenzsysteme und moderne geodätische Beobachtungsverfahren</b>	57
3.1	Einführung	57
3.2	Wir brauchen einen globalen Bezug – Die zentrale Bedeutung hochgenauer Referenzsysteme	58
3.3	Sekundenschnelle und millimetergenaue Positionierung – Das Potenzial globaler Satellitennavigationssysteme	71
3.4	Botschaften vom Rande des Universums – Vermessung der Erde mittels Signalen entfernter Galaxien	83
3.5	Messobjekte am Himmel – Laserentfernungsmessungen zu Satelliten und zum Mond	92
3.6	Die Vermessung des Meeresspiegels und der Eisbedeckungen aus dem Weltraum	101
3.7	Newtons Gravitationsgesetz – Welche Informationen liefern uns Satelliten über das Schwerefeld und die Massenverteilung der Erde?	110
3.8	Schwerefeldbeobachtung mittels Satelliten	124
3.9	Die Weltvermesser vom Bayerischen Wald – Das Geodätische Observatorium Wettzell	132
<b>4</b>	<b>Unser Planet im Fokus – Phänomene des globalen Wandels</b>	143
4.1	Einführung	143
4.2	Und sie bewegt sich doch – Dynamische Prozesse des festen Erdkörpers	144
4.3	Tsunamis – Die unvorstellbare Kraft des Wassers	156
4.4	Wie verändert sich der Meeresspiegel?	163
4.5	Wie groß ist der Eisschwund in Grönland und der Antarktis?	172
4.6	Hydrogeodäsie – Wie können wir die Spur des Wassers verfolgen?	183
4.7	Die Rotation der Erde – Unser Taumeln im Weltraum und unsere jährliche Reise um die Sonne	199
<b>5</b>	<b>Gesellschaftliche Relevanz der hochgenauen Vermessung unseres Planeten aus dem Weltraum</b>	211
5.1	Einführung	211
5.2	Mobile Welt – Navigationssysteme in der modernen Gesellschaft	213