

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



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>                                                                                                 | <b>1</b>  |
| 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>                                                                 | <b>11</b> |
| 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>                  | <b>57</b>  |
| 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 Schwerfeld und die Massenverteilung der Erde? | 110        |
| 3.8      | Schwerfeldbeobachtung mittels Satelliten                                                                                        | 124        |
| 3.9      | Die Weltvermesser vom Bayerischen Wald – Das Geodätische Observatorium Wettzell                                                 | 132        |
| <br>     |                                                                                                                                 |            |
| <b>4</b> | <b>Unser Planet im Fokus – Phänomene des globalen Wandels</b>                                                                   | <b>143</b> |
| 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        |
| <br>     |                                                                                                                                 |            |
| <b>5</b> | <b>Gesellschaftliche Relevanz der hochgenauen Vermessung unseres Planeten aus dem Weltraum</b>                                  | <b>211</b> |
| 5.1      | Einführung                                                                                                                      | 211        |
| 5.2      | Mobile Welt – Navigationssysteme in der modernen Gesellschaft                                                                   | 213        |

|                              |                                                               |     |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3                          | Vernetzte Welt – Die ganzheitliche Betrachtung des Erdsystems | 226 |
| 5.4                          | Bedrohte Welt – Alarmierende Signale des Klimawandels         | 242 |
| <b>Epilog</b>                |                                                               | 261 |
| <b>Literaturempfehlungen</b> |                                                               | 267 |
| <b>Stichwortverzeichnis</b>  |                                                               | 271 |

# Über die Autoren

**Detlef Angermann** (\*1958) ist promovierter Geodät und leitet den Bereich Referenzsysteme am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut der TU München. Seine Forschungsarbeiten fokussieren sich auf die Analyse geodätischer Weltraumbeobachtungen zur Realisierung von Referenzsystemen und zur Bestimmung von Erdsystemparametern. Er ist Direktor des Büros für Produkte und Standards des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems der Internationalen Assoziation für Geodäsie.

Kontakt: [www.dgfi.tum.de](http://www.dgfi.tum.de)

**Roland Pail** (\*1972) ist Professor für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der TU München. Seine Forschungsaktivitäten umfassen Themen der physikalischen und numerischen Geodäsie, mit den Schwerpunkten globale und regionale Modellierung des Schwerefeldes der Erde, Satellitenmissionen zur Erdbeobachtung und Anwendungen in Komponenten des Erdsystems (Ozeane, Wasserkreislauf, Eismassen, Geophysik).

Kontakt: <https://www.lrg.tum.de/iapg/mitarbeiter/pail/>

**Florian Seitz** (\*1976) ist Professor für Geodätische Geodynamik und leitet das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut der TU München. Seine Forschungsinteressen sind die Kombination geodätischer Weltraumbeobachtungsverfahren, geodätische Referenzsysteme und Erdrotation, die Bestimmung zeitlicher Veränderungen der Meeresoberfläche und die Erforschung von dynamischen Prozessen und Wechselwirkungen im System Erde.

Kontakt: [www.dgfi.tum.de](http://www.dgfi.tum.de)

**Urs Hugentobler** (\*1959) ist Professor für Satellitengeodäsie und leitet die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München, welche zusammen mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie das Geodätische Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald betreibt. Seine Forschungsthemen fokussieren auf die hochgenaue Positionierung mittels der globalen Navigationssatellitensysteme sowie der präzisen Modellierung der Satellitenbahnen.

Kontakt: <https://www.lrg.tum.de/iapg/mitarbeiter/hugentobler/>

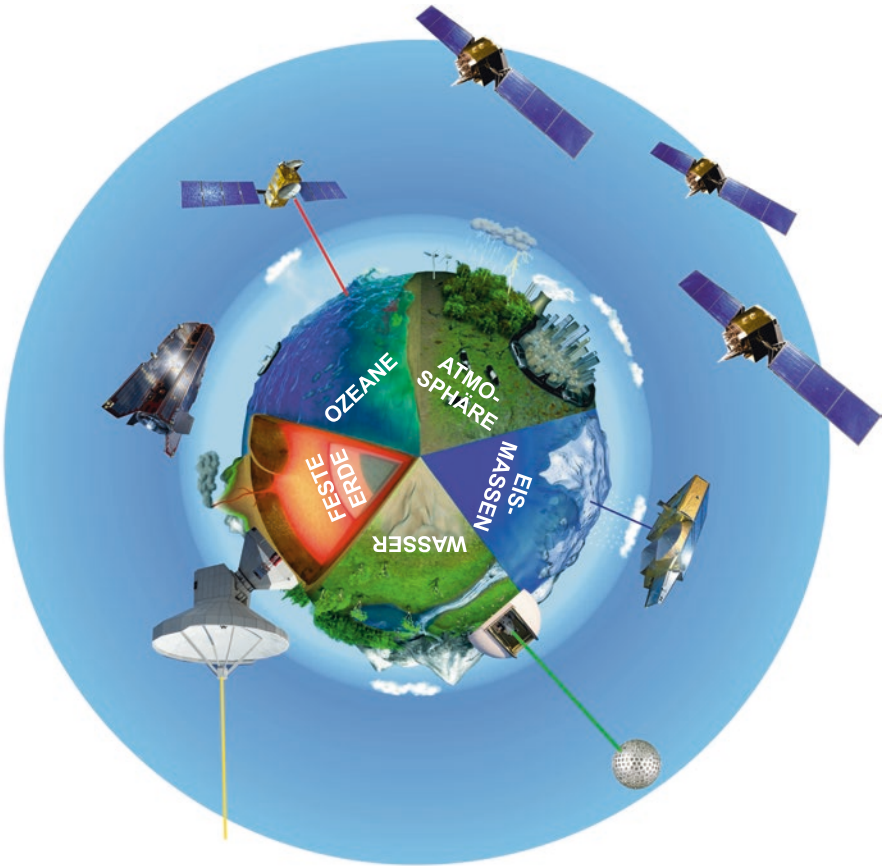
# 1

## Einführung

### 1.1 Die Erde – Ein dynamischer Planet

Wir leben auf einem hochgradig dynamischen Planeten, auf und in dem laufend Veränderungsprozesse stattfinden. Viele dieser Veränderungen sind mit dem unmittelbaren Lebensraum von uns Menschen verknüpft, und einige davon stellen subtile Indikatoren für potenzielle Klimaveränderungen dar.

Abb. 1.1 zeigt die wichtigsten Komponenten des Erdsystems sowie diverse geodynamische Prozesse, die im Inneren, an der Oberfläche oder im Außenraum der Erde stattfinden. Im Bereich des Erdinneren laufen Veränderungsvorgänge auf sehr langen Zeitskalen von Millionen von Jahren ab, zum Beispiel konvektive Bewegungen im Erdmantel, die letztlich Prozesse in der Lithosphäre wie die Plattentektonik antreiben und somit für Gebirgsbildung, Erdbeben und Vulkanismus verantwortlich sind. In den Ozeanen finden große Wärme- und Energietransporte über die Ozeanströmungen statt. Hier werden große Mengen von der Sonne eingestrahlter Energie von den Äquatorregionen in Richtung der Pole verlagert. Im Bereich des Wasserkreislaufs spiegeln sich sowohl jahreszeitliche periodische Vorgänge wider, aber auch Trends in Niederschlag, Verdunstung und Abfluss, die letztlich zu veränderlichen Wasserspeichermengen in einer bestimmten Region führen. Neben dem flüssigen Wasser gibt es ebenfalls langzeitliche Variationen wie säkulare Abschmelzvorgänge sowohl großer Eisschilde (Grönland, Antarktis) als auch kleinerer Inlandgletscher. All diese Teilsysteme sind untereinander, aber auch mit der Atmosphäre sehr eng gekoppelt. Diese enge Interaktion



**Abb. 1.1** Komponenten des Systems Erde und geodätische Beobachtungsverfahren

macht auch das Verständnis dieses komplexen Systems Erde so schwierig, denn jede Änderung in einem Teilsystem kann in einem anderen Teilsystem massive Konsequenzen auslösen. Wenn man also an einem Faden in dem einen Teilsystem zieht, dann ist es nicht unwahrscheinlich, dass der Pullover in der benachbarten Teilkomponente aufgetrennt wird.

Aus der Sicht des Systemverständnisses und der Modellierung ergeben sich daraus aber auch wichtige Randbedingungen in der Form sogenannter Erhaltungsgrößen. Wenn zwei oder mehrere Teilsysteme miteinander kommunizieren wie Gefäße, die durch Rohre verbunden sind, so muss in einem Gefäß genauso viel Wassermasse ankommen wie aus dem anderen abfließt. Ähnliches wie für die (Wasser-)Masse gilt auch für Energie und, etwas abstrakter, den Drehimpuls. Von besonderer Bedeutung für uns ist natürlich auch die Interaktion der einzelnen Teilsysteme und letztlich des

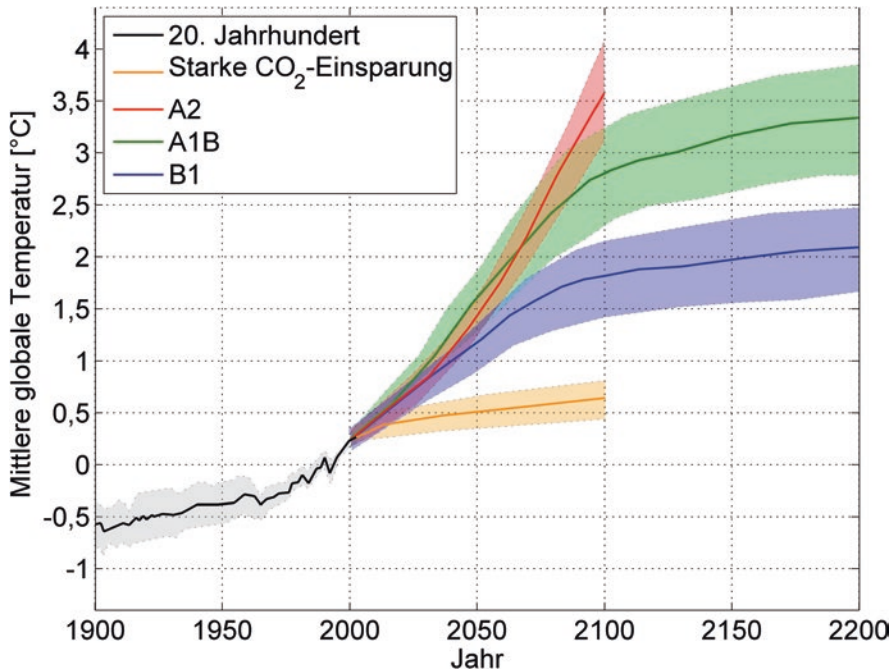
Gesamtsystems Erde mit der auf ihr lebenden Biosphäre, von der wir als Menschen ein zentraler Bestandteil sind.

## 1.2 Erdsystem, Klimawandel und Gesellschaft

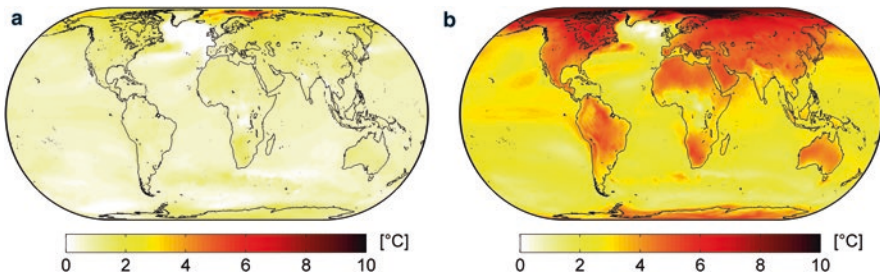
In diesem Wechselspiel sind Veränderungsvorgänge in den Teilsystemen auch Indikatoren für ein sich veränderndes Weltklima. Hier spielt zunehmend folgende Frage eine zentrale Rolle: Welche der beobachtbaren Veränderungsprozesse sind Teil eines natürlichen Zyklus und welche werden vom Menschen verursacht oder zumindest beeinflusst?

Ein Beispiel für Trends im System Erde ist die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur der Erde. Seit Beginn der industriellen Revolution zu Beginn des vorigen Jahrhunderts ist die globale mittlere Oberflächen-temperatur um mehr als ein Grad Celsius gestiegen, und der Kohlendioxid-gehalt der Atmosphäre hat sich in diesem Zeitraum um nahezu 50 Prozent erhöht. Mithilfe von rechen-technisch höchst aufwendigen Klimamodellen, welche auf den weltweit größten wissenschaftlichen Rechnersystemen betrieben werden, können auch Prognosen für die Zukunft erstellt werden. Abb. 1.2 zeigt den Verlauf globaler Mitteltemperaturen der vergangenen 120 Jahre sowie Vorhersagen für die globale Temperaturentwicklung für das nächste Jahrhundert. Je nach angenommenem Szenario, insbesondere welche Gegenmaßnahmen in den nächsten Jahren politisch auf globaler Ebene eingeleitet werden, wird eine Temperaturzunahme von ca. 1,5 bis 4,5 Grad Celsius als globaler Mittelwert vorhergesagt. Das aus den Medien bekannte „Zwei-Grad-Celsius-Ziel“ zu erreichen (gemäß Pariser Klimavertrag von 2015 wird sogar eine Begrenzung auf 1,5 Grad Celsius eingefordert), auf das man sich auf den vergangenen Weltklimakonferenzen nach hartem Ringen geeinigt hat, erscheint aus der Sicht des bisher Erreichten als äußerst fragwürdig oder zumindest als sehr ambitioniert.

Dazu kommt, dass sich aufgrund der Komplexität des Erdsystems und des unterschiedlichen Verhaltens von Festland und Ozean hinsichtlich Temperaturveränderungen regional sehr große Unterschiede ergeben. Die Kontinente erwärmen sich viel leichter und schneller als die Ozeane. Abb. 1.3 demonstriert die unregelmäßige geografische Verteilung der vorhergesagten Temperaturzunahme. Dazu wurden vorhergesagte Temperaturen für die Jahre 2081 bis 2100 gemittelt und einer Mitteltemperatur für den Zeitraum 1986 bis 2005 gegenübergestellt. Dargestellt ist die regionale Temperaturentwicklung für ein optimistisches Klimaszenario (Abb. 1.3a), bei dem von einer massiven Reduktion der Emissionen von Kohlendioxid



**Abb. 1.2** Prognose zur Temperaturentwicklung bis 2100 (nach IPCC, 2007, modifiziert). Die Kurven B1, A1B und A2 beziehen sich auf verschiedene Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen



**Abb. 1.3** Geografische Verteilung der Temperaturveränderungen in den Jahren 2081 bis 2100 verglichen mit den Jahren 1986 bis 2005 für ein (a) optimistisches und ein (b) pessimistisches Klimaszenario (nach IPCC, 2014, modifiziert)

(CO<sub>2</sub>) ausgegangen wird, und ein pessimistisches Szenario (Abb. 1.3b), dem ein weiterer Anstieg von Treibhausgasen zugrunde gelegt wurde. Offensichtlich sind die polnahen Regionen der Nordhemisphäre besonders stark betroffen, während andere Gebiete – insbesondere Ozeanflächen – sich nur geringer erwärmen werden. Da die Ozeanflächen, die ca. 70 Prozent der

Erdoberfläche einnehmen und deshalb stark in die Mittelwertbildung eingehen, bedeutet eine globale mittlere Temperaturzunahme von zwei Grad Celsius, dass es innerhalb eines Jahrhunderts in den Kontinentalregionen um vier bis fünf Grad Celsius, und in Polgebieten sogar um sechs bis sieben Grad Celsius wärmer werden wird.

Aufgrund dieser Temperaturveränderungen kommt es zu einer Reihe weiterer zeitlicher Variationen im System Erde. So können heute Abschmelzvorgänge der großen Eisschilde wie Grönland und Antarktis nachgewiesen werden (Abschn. 4.5). Damit gekoppelt ist ein Anstieg des globalen Meeresspiegels. Dieser ist im vergangenen Jahrhundert um ca. 20 Zentimeter angestiegen (Abschn. 4.4).

Das Verständnis für die Veränderungsprozesse unseres Systems Erde ist allerdings nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, denn diese haben auch einen sozioökonomischen Impact. Naturkatastrophen wie zum Beispiel Erdbeben, Vulkanausbrüche, Überflutungen, Erdrutsche, Stürme fordern jährlich nicht nur mehrere Zehntausend Menschenleben, sondern verursachen aufgrund der großen Sachschäden auch hohe Kosten. Außerdem ist die Erde ein endlicher Planet mit beschränkten Ressourcen von Rohstoffen, fossiler Energie, Trink- und Brauchwasserverfügbarkeit und bewirtschaftbaren Böden. Dem gegenüber steht eine stetig wachsende Weltbevölkerung. Im Jahr 2050 wird mit einer Weltbevölkerung von 8,5 Milliarden Menschen gerechnet. Die Endlichkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen kann zu Völkerwanderungen, politischen und militärischen Konflikten führen.

Aufgrund der dynamischen Prozesse des Systems Erde entstehen auch globale Risiken. Neben klassischen Risiken durch Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanismus oder Orkane haben auch langsame Prozesse wie etwa der Anstieg des Meeresspiegels ein enormes Bedrohungspotenzial. Der damit verbundene Verlust von Lebensräumen kann größere Migrationsbewegungen und gesellschaftliche Konflikte zur Folge haben.

## 1.3 Geodynamische Prozesse – Sehr ungleich schnell

Die Perioden geodynamischer Prozesse sind dabei sehr unterschiedlich. Plattentektonische Prozesse (Abschn. 4.2) laufen in Millionen von Jahren ab und führen zu Bewegungen lithosphärischer Platten im Schneckentempo von einigen Zentimetern pro Jahr. Vergleichbar mit einem Flitzbogen, der über lange Zeiträume gespannt und schlagartig losgelassen wird, werden

die durch Plattentektonik aufgestauten Spannungen in der Form von Erdbeben in oft nur wenigen Sekunden abrupt abgebaut (Abschn. 4.2). Dabei entstehen seismische Wellen, die mit einer Geschwindigkeit von mehreren Kilometern pro Sekunde durch den Erdkörper laufen.

Veränderungen in den Wassermassen unserer Erde spielen sich ebenfalls auf völlig unterschiedlichen Zeitskalen ab. Während wir einen globalen Meeresspiegelanstieg von gut drei Millimetern im Jahr beobachten (Abschn. 4.4), haben Tsunamis Ausbreitungsgeschwindigkeiten von mehreren Hundert Metern pro Sekunde (Abschn. 4.3).

Was bedeutet es dann aber, wenn wir solche Veränderungsvorgänge beobachten wollen? Aus den angeführten Extrembeispielen hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Skalen können wir schon Anforderungen für Beobachtungssysteme zur Messung dieser Phänomene ableiten. Einerseits ist es das Ziel, äußerst kleine Veränderungsprozesse zu erfassen, die sehr langsam ablaufen. Das bedeutet, dass wir mit extrem hoher Genauigkeit beobachten müssen, um etwa Plattenbewegungsgeschwindigkeiten von wenigen Zentimetern pro Jahr oder Meeresspiegeländerungen von wenigen Millimetern pro Jahr zu erfassen. Hier suchen wir also nach einer sehr kleinen Nadel in einem sehr großen Heuhaufen. Am anderen Ende der Zeitskala sind Beobachtungen fast in Echtzeit erforderlich, wenn wir diese zum Beispiel für Frühwarnsysteme nutzen wollen.

Wir müssen also hoch genau messen können, und das möglichst permanent und möglichst weltumspannend. Genau dort kommt die Geodäsie ins Spiel ...

## 1.4 Globale Vermessung der Erde

Die Disziplin der Geodäsie beschäftigt sich mit der fortlaufenden Ausmessung der zeitlich veränderlichen Geometrie von Land- und Meeresoberfläche, des Schwerfeldes der Erde sowie ihrer Rotation und Orientierung im Weltraum. Neben den klassischen vermessungstechnischen Aufgaben liefert sie damit auch fundamentale Beiträge für die Erfassung von Prozessen im System Erde in Raum und Zeit und der Analyse der Dynamik zwischen den Systemelementen mit sehr hoher Genauigkeit. Daher ist die Geodäsie in der Lage, auch sehr kleine und langsam ablaufende Veränderungsprozesse direkt zu beobachten.

Der Begriff der Geodäsie beziehungsweise Vermessung wird heute noch immer gerne mit dem Bild des gummibestiefelten Beamten assoziiert, der sich im Außendienst bei Wind und fast jedem Wetter durch den Matsch

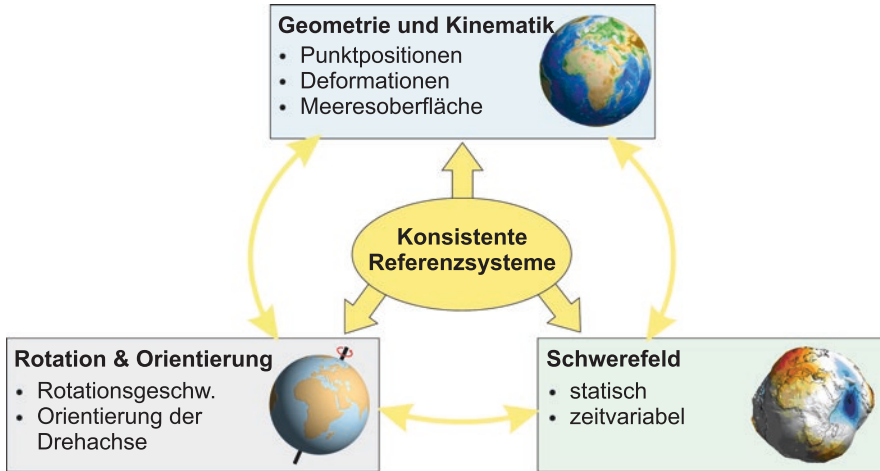
quält, um Grundstücksgrenzen und Fahrbahntrassen einzumessen oder nachzuprüfen, ob der böse Nachbar sich womöglich sogar ein Stück Grundstück „abgezweigt“ hat. Spätestens seit Beginn der Satellitenära, aber eigentlich schon viel früher mit der technischen Entwicklung von neuen Messmethoden und -sensoren, hat sich dieses Bild jedoch gewandelt und sich das Anwendungsspektrum des Geodäten enorm erweitert. Heute vermisst er beispielsweise genauso hochpräzise Autoteile in der industriellen Fertigung, entwickelt detaillierte Modelle von Gebäuden bis zu ganzen Städten im Computer, noch bevor der erste Spatenstich gesetzt ist, kümmert sich um digitale Karten, liefert die mathematischen Werkzeuge für Fahrzeugnavigationssysteme und vermisst eben auch unseren dynamischen Planeten in globalem Maßstab. Neben der reinen Datenerfassung als ersten Teil der Nahrungskette beschäftigt sich die Geodäsie auch mit der Analyse der Daten, deren Visualisierung, bis hin zur Königsliga, der Ableitung von Modellen und Produkten und deren Interpretation.

In diesem Sinne soll dieses Buch bitte nicht als Gesamtüberblick über das geodätische Portfolio missverstanden werden, sondern es setzt seinen Fokus vielmehr auf die Aspekte der globalen Erd(-ver-)messung und die Methoden der Satellitengeodäsie. Denn erst Satelliten ermöglichen es, in kurzen Zeiträumen weltumspannend Beobachtungen anzustellen, um damit die Veränderungen unseres dynamischen Planeten mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Wie Abb. 1.1 bereits erahnen lässt, besteht ein interdisziplinärer Austausch mit vielen anderen geowissenschaftlichen Disziplinen, etwa Geophysik, Ozeanografie, Glaziologie, Atmosphärenphysik, Klimaforschung, Erdsystemforschung und Astronomie.

Die moderne Geodäsie trägt mit drei Grundpfeilern zur geodätischen Erdsystemforschung bei. Diese sind in Abb. 1.4 dargestellt. Zugehörige Messverfahren werden in Abb. 1.1 symbolisch angedeutet und in Kap. 3 ausführlich besprochen.

## Geometrie und Kinematik

Die Geodäsie legt die geometrische Form von Teilen der Erdoberfläche bis hin zur Erde als Ganzes in Formelementen oder geometrischen Objekten fest. Dies umfasst Punktkoordinaten von Stationen an der Erdoberfläche, deren Veränderungen sowie flächenhafte Deformationen der festen Erde. Da aber mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche aus Ozeanen besteht, kümmern wir uns auch um die geometrischen Veränderungen der Meeresoberfläche.



**Abb. 1.4** Die drei Grundpfeiler der Geodäsie

## Orientierung und Rotation

Die Geodäsie bestimmt die Rotation unseres Planeten und seine Orientierung im Weltraum. Sie legt die Lage der Rotationsachse der Erde relativ zum Fixsternhimmel fest und bestimmt deren variable Rotationsgeschwindigkeit. Dies ist beispielsweise notwendig, um die Bahn eines Satelliten mit einer beliebigen Position auf der Erdoberfläche zu verknüpfen, damit unser Navigationssystem auch den richtigen Standort anzeigt (Abschn. 4.7).

## Schwerefeld

Die Geodäsie ermittelt das durch die unregelmäßige Massenverteilung im Erdinneren und an der Oberfläche erzeugte Gravitationsfeld im Außenraum der Erde sowie dessen zeitliche Veränderungen, die mit Massentransportprozessen im Erdsystem im Zusammenhang stehen (Abschn. 3.7).

Von besonderer Bedeutung sind dabei hochgenaue Referenzsysteme (Abschn. 3.2). Wenn wir ganz kleine Veränderungen wie zum Beispiel ein paar Millimeter Meeresspiegeländerung erfassen wollen, brauchen wir auch einen Referenzzustand, sozusagen eine Nullfläche, der noch genauer bekannt sein muss, damit wir die richtigen Aussagen treffen können. Konsistente Referenzsysteme sind insbesondere wichtig, wenn wir Äpfel mit Birnen

– in unserem Fall geometrische und gravimetrische Beobachtungen – in gemeinsamen Modellen verknüpfen und das Modellverhalten dann richtig interpretieren wollen.

Lieber Leser! Wie geht es nun weiter? In Teil 2 dieses Buches wird die historische Entwicklung der Geodäsie bis hin zur Satellitenära dargestellt. Teil 3 beschäftigt sich ausführlich mit den globalen Beobachtungsverfahren der modernen Geodäsie. Teil 4 beschreibt und diskutiert exemplarisch wichtige Veränderungsprozesse im Erdsystem, wobei viele davon sensitive Indikatoren für den Klimawandel darstellen. Schließlich stellen wir diese Anwendungen und Ergebnisse in Teil 5 in einen gesellschaftlichen Kontext und diskutieren die Relevanz geodätischer Beobachtungstechniken, Erkenntnisse und Produkte für die Frau und den Mann auf der Straße. Viel Spaß beim Weiterschmökern!



# 2

## Die Vermessung der Erde im Wandel der Zeit

### 2.1 Einführung

Das Jahr 1957 markiert einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklungsgeschichte der Geodäsie: Mit dem Start des ersten künstlichen Satelliten wird die Vermessung der Erde geradezu revolutioniert. Mithilfe von Satellitenmessungen kann nun erstmals die Erde als Ganzes mit hoher Genauigkeit vermessen werden und somit lassen sich mit den künstlichen Messobjekten am Himmel auch verschiedene Kontinente problemlos verbinden, was zuvor mittels terrestrischer (erdgebundener) Messungen unvorstellbar war. Durch die rasanten Entwicklungen der Satellitenmessverfahren und Computertechnologie sowie die Genauigkeitssteigerungen in der Zeitmessung hat sich das Anwendungsspektrum der Geodäsie in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich erweitert bis hin zur hochgenauen Erfassung von Auswirkungen geodynamischer Prozesse oder den Folgen des Klimawandels.

Wie aber hat es vor dem Satellitenzeitalter ausgesehen? Ohne die künstlichen Messobjekte im Weltraum ist eine globale Vermessung der Erde nicht möglich. Die erdgebundenen Messverfahren erfordern eine direkte Sichtverbindung zwischen den Messpunkten, sodass die riesigen Ozeane messtechnisch unüberwindbar sind. Die Vermessung größerer Gebiete, etwa die Landesvermessung im 19. Jahrhundert, ist mit enormen messtechnischen Anstrengungen verbunden. Auch die Theorie der Kontinentaldrift des berühmten Geowissenschaftlers Alfred Wegener aus dem Jahr 1912 kann damals nicht durch Messungen bestätigt werden. Die schon bekannten Ver-

fahren der astronomischen Ortsbestimmung liefern nur Genauigkeiten von einigen Metern, was bei Weitem nicht reicht, um die Bewegungen der Erdplatten von wenigen Zentimetern pro Jahr nachzuweisen.

Wegener begründet seine Theorie damit, dass die Ostküste Südamerikas genau an die Westküste Afrikas passt, als ob sie früher zusammengehangen hätten. Diese Erkenntnis geht auf die erste Karte eines Ur-Kontinents zurück, die der französische Naturforscher Antonio Snider-Pellegrini 1858 veröffentlicht hat. Wegener findet zudem heraus, dass einige geologische Formationen an der Küste Südamerikas auf dem afrikanischen Kontinent ihre Fortsetzung finden. Auch Paläontologen entdecken an beiden Küsten Fossilien gleicher Tier- und Pflanzenarten. Aus diesen Entdeckungen erwächst Wegeners Idee, dass die Landmassen früher in dem Superkontinent Pangäa vereint waren und dann im Laufe von Millionen Jahren auseinandergedriftet sind. Als er seine Theorie von den driftenden Kontinenten auf geologischen Tagungen vorstellt, lachen ihn seine Fachkollegen aus und verspotten ihn als „Märchenerzähler“. Hauptkritikpunkte sind, dass er nicht erklären kann, welche Kräfte die Drift der Kontinente erzeugen, und außerdem ist damals niemand in der Lage, das Auseinanderdriften der Kontinente durch geeignete Messungen nachzuweisen. Wegener ist mit seiner Theorie der Zeit um einige Jahrzehnte voraus, und so ist ihm der gebührende Ruhm für seine bahnbrechende Erkenntnis bis zu seinem Tod nicht vergönnt. Er stirbt 1930 bei einer Grönlandexpedition kurz nach seinem 50. Geburtstag und erlebt deshalb den späteren Siegeszug seiner Hypothese leider nicht mehr mit. Erst in den 1950er- und 1960er-Jahren werden die Ideen Wegeners als Theorie der Plattentektonik wiederbelebt, und in den 1990er-Jahren gelingt erstmals der Nachweis der Erdplattenbewegungen mit modernen geodätischen Beobachtungsverfahren (Abschn. 4.2).

Aber nicht nur der Eintritt in das Raumzeitalter hat einen enormen Wandel ausgelöst. Bereits zuvor ist die Entwicklungsgeschichte der Erdvermessung im Laufe der Jahrtausende äußerst spannend verlaufen. Neben den gesellschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen hat sich auch die Vorstellung von der Gestalt der Erde und ihrer Position im Weltraum gravierend geändert. Im Altertum glauben die Menschen noch fest an eine scheibenförmige Erde, in der Antike weisen die Griechen deren Kugelform nach und im 17. Jahrhundert streiten sich Franzosen und Engländer um die Frage, ob die Erde an den Polen abgeplattet ist. Selbst heute gibt es übrigens noch Verfechter der Scheibenform. Auch die Frage nach dem richtigen Weltsystem sorgt im 16. und 17. Jahrhundert für heftige Streitigkeiten.

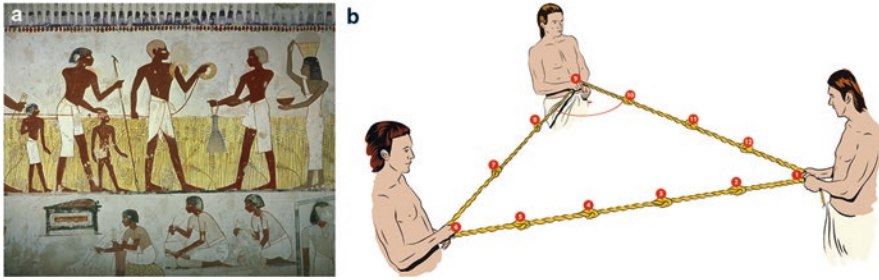
In den nachfolgenden Kapiteln wollen wir Sie nun mitnehmen auf eine Zeitreise von den ersten Vermessungen früherer Hochkulturen bis in das heutige Satellitenzeitalter. Sie werden erfahren, wie sich die Geodäsie im Laufe der Zeit gewandelt hat und welche große Bedeutung frühere Entdeckungen auch heute noch für die modernen geodätischen Beobachtungsverfahren und die Erdvermessung haben.

## **2.2 Die Ursprünge der Vermessung**

Wann, wo und wie ist die Vermessung entstanden und wie hat sie sich entwickelt? Das Ende der letzten Eiszeit vor etwa 11.000 Jahren und der damit einhergehende Anstieg der Temperaturen leiten eine Veränderung der Lebensweise der Menschen ein. Im Zuge der sogenannten neolithischen Revolution vollzieht sich der Übergang von der Jäger- und Sammlerkultur zur Sesshaftigkeit, verbunden mit dem Bau von Siedlungen, der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen und der Viehzucht. Die Anfänge der Vermessung beginnen etwa um 8000 v. Chr., als die Menschen anfangen, sesshaft zu werden. Für die Aufteilung der Felder und die Zuordnung der anbaufähigen Fläche unter den Dorfbewohnern sind bereits Feldmesser nötig.

Im 4. Jahrtausend v. Chr. entstehen die ersten Hochkulturen an Flüssen und in klimatisch begünstigten Regionen der Erde wie das ägyptische Reich am Nil und Mesopotamien in den fruchtbaren Ebenen zwischen Euphrat und Tigris im Südosten des heutigen Irak. Zu den großen gesellschaftlichen Aufgaben dieser Hochkulturen gehört die Anlage und Wartung von Bewässerungssystemen, der Bau von Siedlungen und Tempelanlagen sowie die Aufteilung der nutzbaren landwirtschaftlichen Flächen. Für die Lösung dieser Aufgaben sind praktische Kenntnisse in der Baukunst, Mathematik und Vermessungstechnik unerlässlich.

Der Nil spielt eine beherrschende Rolle im Leben der altägyptischen Gesellschaft, und seine alljährlichen Überschwemmungen halten durch die Schlammablagerungen weite Teile des Landes fruchtbar. Aufwändige Bewässerungsanlagen leiten das Nilwasser auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen und liefern die Grundlage für ergiebige Ernten. Die jährlichen Nilüberschwemmungen erfordern umfangreiche vermessungstechnische Arbeiten, um die Besitzverhältnisse und die alten Grundstücksgrenzen für die Aufteilung der Felder wieder herzustellen. Ägyptische Grabdarstellungen dokumentieren, wie die Messung mit einem Mess-Seil aus Hanf erfolgt, das durch Knoten in gleiche Längeneinheiten unterteilt

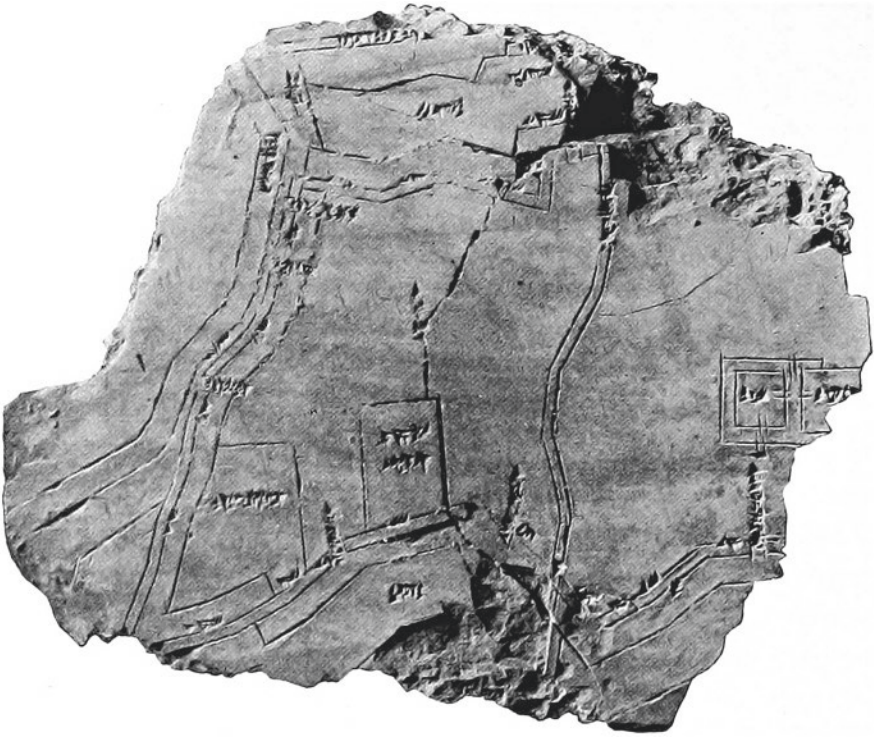


**Abb. 2.1** Altägyptische Vermessung: **a** Wandmalerei ägyptischer Seilspanner aus dem Grab des Mennah, **b** Mess-Seil aus Hanf mit Knoteneinteilung (Verhältnis 3:4:5, Ägyptisches Dreieck). (© Erich Lessing/akg-images/picture alliance), (© lukaves/Getty Images/iStock)

ist (Abb. 2.1). Die Ägypter nutzen bereits geometrische Kenntnisse für das Absetzen von rechten Winkeln. Verwendet wird dafür entweder ein Winkelhaken oder eine Messschnur mithilfe des 3:4:5 Verhältnisses (Ägyptisches Dreieck). Insofern ist der berühmte Lehrsatz des Pythagoras bereits bei den alten Ägyptern bekannt. Mit diesen Werkzeugen, Setzwaage und Lot gelingt den Ägyptern die exakte Vermessung beim Bau der berühmten Pyramiden. Nicht nur in der Lagemessung, sondern auch in der Höhenmessung erzielen sie bereits erstaunliche Genauigkeiten, beispielsweise bei der Bestimmung der Fluthöhen des Nils mit ihren sogenannten Nilmessern.

Auch die Sumerer, die ältesten Bewohner des fruchtbaren Zweistromlandes zwischen den Flüssen Euphrat und Tigris, errichten ein ausgeklügeltes Bewässerungssystem für ihre landwirtschaftlich genutzten Flächen. Sie betreiben schon im 3. Jahrtausend v. Chr. eine produktive Landwirtschaft und erfinden die ersten Töpferscheiben, das erste überlieferte Schriftsystem und die ersten Rechtssysteme. Die Fertigkeiten in der Feldmessung entwickeln sich wie in Ägypten aus den praktischen Bedürfnissen der Gesellschaft wie der Feldvermessung, dem Bau von Siedlungen und Bewässerungsanlagen. Ein Dokument für die Vermessungsarbeiten der Sumerer ist der bei Ausgrabungen gefundene Stadtplan von Nippur, dem Zentrum der sumerischen Kultur am Euphrat (Abb. 2.2).

In dieser Zeit der ersten Hochkulturen glaubt die Menschheit, dass die Erde eine Scheibe sei. So stellen sich zum Beispiel die alten Ägypter vor, dass die Menschen in der Mitte dieser Scheibe leben und der Fluss Nil diese in zwei große Teile trennt. Nach ihrer Vorstellung von den drei Ebenen leben die Menschen auf der Scheibe in der Oberwelt, unterhalb davon befinden sich die Verstorbenen in der Unterwelt und darüber liegt der himmlische Ort der Götter.



**Abb. 2.2** Stadtplan von Nippur auf einer alten Tontafel. (© Hermann Vollrat Hilprech, Foto von 1903, Wikimedia Commons, gemeinfrei)

## 2.3 Das antike Griechenland – Von der Scheibe zur kugelförmigen Erde

Die griechische Naturphilosophie markiert im 6. Jahrhundert v. Chr. den Beginn der europäischen Wissenschaft. Die Astronomie und die Geometrie werden die tragenden Säulen der sich allmählich entwickelnden Geodäsie. Griechische Gelehrte stellen sich die Frage nach der Figur und Größe unseres Planeten. Der Naturphilosoph Thales von Milet, ein großer Astronom und Mathematiker der damaligen Zeit, sucht nach dem Ursprung der Erde und deren Verhältnis zum Meer. Er vertritt die Ansicht, dass das Wasser der Ursprung von allem sei und dass die Erde auf dem Ozean schwimme. So halten auch die Gelehrten im antiken Griechenland die Erde für eine flache Kreisscheibe, die vom Ozean umspült ist.

Als Erster vertritt der griechische Philosoph Pythagoras die Vorstellung von der Erde als Kugel, was anhand verschiedenster Beobachtungen untermauert

wird. Ein Argument stützt sich auf Beobachtungen auf dem Ozean: Wenn die Erde tatsächlich flach wäre, so müsste ein Schiff auch in größerer Entfernung in ganzer Höhe vom Segel bis zum Rumpf erkennbar sein. Dies ist aber nicht der Fall, denn in der Ferne sehen wir zunächst nur die Segel des Schiffes. Den Rumpf erblicken wir erst später, wenn das Schiff schon näher an das Ufer herangekommen ist. Umgekehrt bemerken die Seefahrer auch, dass aus der Ferne nur die Hügel und Baumwipfel einer Insel sichtbar sind und erst beim Herannahen der blendend weiße Strand in das Blickfeld gerät. Die Griechen haben noch ein weiteres Argument für die Kugelgestalt der Erde: Der Sonnenhöchststand verändert sich, wenn man weiter nach Norden oder Süden reist. Dies kann nur der Fall sein, wenn man sich auf einer gekrümmten Linie bewegt, wodurch die Scheibenform der Erde eindeutig widerlegt ist. Aristoteles liefert noch ein drittes Argument: Bei der Beobachtung einer Mondfinsternis hat er bemerkt, dass die Erde immer einen runden Schatten auf den Mond wirft, wenn die Erde zwischen Sonne und Mond tritt. Dies kann aber nur so sein, wenn die Erde eine Kugel und keine flache Scheibe ist. Wäre sie eine Scheibe, könnte der Schatten nur rund sein, wenn sich die Sonne zum Zeitpunkt der Finsternis direkt unter dem Mittelpunkt der Erdscheibe befände, ansonsten wäre der Schatten immer länglich und hätte die Form einer Ellipse.

Nachdem die Kugelform der Erde außer Zweifel steht, stellen sich die Griechen naturgemäß die Frage nach der Größe unseres Heimatplaneten. Im 3. Jahrhundert v. Chr. hat der griechische Gelehrte Eratosthenes, der Leiter der königlichen Bibliothek von Alexandria, eine geniale Idee für die Bestimmung des Erdumfangs. In der nachfolgenden Box ist seine Methode erläutert. Es ist geradezu sensationell, dass Eratosthenes mit seiner recht groben Abschätzung und den eingeschränkten messtechnischen Möglichkeiten der damaligen Zeit bereits sehr nahe an dem heutigen Wert für den Erdumfang am Äquator von 40.075 Kilometern liegt.

Mit dem nunmehr bekannten Umfang unseres Planeten wollen wir auf das Beispiel mit dem Schiff zurückkommen. Nach dem berühmten Lehrsatz des Pythagoras lässt sich leicht berechnen, welchen Einfluss die Erdkrümmung auf die Sichtbarkeit eines Schiffes in einer bestimmten Entfernung hat. Für die nachfolgende Abschätzung rechnen wir mit einem gerundeten Wert für den Erdradius von 6370 Kilometern und wir gehen davon aus, dass sich der Beobachter in Ufernähe befindet (auf Meeresniveau). So ergibt sich beispielsweise in einer Entfernung von zehn Kilometern ein Einfluss der Erdkrümmung von nahezu acht Metern. In einer solchen Entfernung wäre also ein kleineres Schiff mit einer Höhe von weniger als acht Metern überhaupt nicht sichtbar, da es quasi von der Erdkrümmung „verschluckt“ würde. Verdoppeln wir die Entfernung des Schiffes auf 20 Kilometer vom Ufer, so ist der Einfluss der Erdkrümmung bereits

etwa viermal so groß. Ein Schiff müsste dann also über 32 Meter hoch sein, damit es nicht vollständig unterhalb der gekrümmten Wasseroberfläche verschwindet. Von einem erhöhten Standpunkt aus wäre der Rumpf des Schiffes auch noch in größerer Entfernung vom Ufer aus sichtbar.

### Erste Bestimmung des Erdumfangs von Eratosthenes

Den Griechen ist bekannt, dass in der Stadt Syene (heutiges Assuan) am 21. Juni zur Sommersonnenwende die Sonnenstrahlen zur Mittagszeit genau senkrecht in einen Brunnen einfallen und somit zum Mittelpunkt der Erde gerichtet sind. Es wird auch beobachtet, dass in der nördlich gelegenen Stadt Alexandria die Sonne zur gleichen Zeit nicht ganz so hoch steht, vielmehr wirft ein großer Obelisk einen Schatten, dessen Winkel man aus der Schattenlänge und der Höhe des Obelisken leicht berechnen kann. Es ergibt sich ein Wert von  $7,2^\circ$ , also genau der fünfzigste Teil eines Kreises. Entsprechend der schematischen Darstellung in der nachfolgenden Abbildung ist dieser Winkel identisch mit dem Zentriwinkel im Mittelpunkt des Kreises. Folglich entspricht der Abstand zwischen Alexandria und Syene dem fünfzigsten Teil des Erdumfangs. Eine Kamelkarawane benötigt 50 Tage für die Strecke zwischen beiden Städten und legt dabei täglich etwa 100 Stadien (antikes Längenmaß) zurück, sodass Eratosthenes die Entfernung auf etwa 5000 Stadien schätzt. Ein Stadion entspricht ungefähr 160 Metern, somit beträgt die Entfernung rund 800 Kilometer. Multipliziert man diese Streckenlänge mit dem Faktor 50, so ergibt sich nach dieser geometrisch einfachen und zugleich genialen Methode ein Erdumfang von etwa 40.000 Kilometern.

