

Friedrich Robert Helmert

**13. Symposium
zur Vermessungsgeschichte
13.02.2017**

Herausgegeben von Erich Weiß



FÖRDERKREIS VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.

Friedrich Robert Helmert

- zum 100. Todestag

13. Symposium zur Vermessungsgeschichte in Dortmund
am 13.02.2017 im Museum für Kunst und Kulturgeschichte

Herausgegeben von Erich Weiß

Veranstalter: Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.

2017

BAND 42

Schriftenreihe des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum, Jahrgabe 2017

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: Erich Weiß
Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.

LAYOUT UND SATZ: Jörg Halberstadt

DRUCK: Koffler DruckManagement GmbH
TechnologieZentrumDortmund

Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung vorbehalten.

Soweit die Autoren die klassische Rechtschreibung bevorzugen, wurden die Texte nicht auf die reformierte Rechtschreibung umgestellt.

Friedrich Robert Helmert

- zum 100. Todestag

13. Symposium zur Vermessungsgeschichte in Dortmund
am 13.02.2017 im Museum für Kunst und Kulturgeschichte

Herausgegeben von Erich Weiß

Veranstalter: Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.

2017

INHALTSVERZEICHNIS

Zum Geleit	5
Friedrich Robert Helmert 1843 – 1917 Ausschnitte aus seinem Lebensweg und seinem internationalen Wirken	6
Über die Ausgleichung bei „Überschüssigen Messungen und zufälligen Beobachtungen“ Auf den Spuren von Friedrich Robert Helmert	30
Die Figur der Erde – zu Zeiten Friedrich Robert Helmerts und heute Von der Kugelgestalt der Erde zum dynamischen Erdsystem-Modell	46
Instrumente und Geräte für geodätische Arbeiten und Forschungen am Geodätischen Institut Potsdam unter dem Direktorat von Friedrich Robert Helmerts Ausschnitte aus seinem Lebensweg und seinem internationalen Wirken	76
Geodätische Forschung – 100 Jahre nach Friedrich Robert Helmert Geistiger Vater der modernen Geodäsie	100
Vitae der Referenten	123
Schriftenreihe Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e. V.	126

Zum Geleit

Friedrich Robert Helmert - zum 100. Todestag

Am 31. Juli 1843 wurde Friedrich Robert Helmert in der alten sächsischen Bergbaustadt Freiberg geboren; er starb am 15. Juni 1917 in Potsdam an den Folgen eines Schlaganfalls. Helmert prägte zur Wende des 19./20. Jahrhunderts die Entwicklungen der Geodäsie als Wissenschaft wie kaum ein anderer; er definierte die Geodäsie als Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche.

Helmert studierte von 1859 bis 1863 am Dresdener Polytechnikum Ingenieurwissenschaften, war danach dort Assistent beim Professor der Geodäsie August Nagel und ergänzte 1866/67 sein Studium an der Philosophischen Fakultät der Universität Leipzig mit der Promotion (Diss.: Studien über rationale Vermessungen im Gebiet der höheren Geodäsie).

Im Jahre 1872 erschien Helmerts erstes größeres Werk über „Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Anwendungen auf die Geodäsie und die Theorie der Messinstrumente“. Damals war die Ausgleichsrechnung noch keineswegs allgemein in der Praxis akzeptiert. Helmert wurde im gleichen Jahr zum Professor der Geodäsie am neuen Aachener Polytechnikum ernannt.

In den Jahren 1880 und 1884 erschien sein grundlegendes Werk „Die mathematischen und die physikalischen Theorien der höheren Geodäsie“ in 2 Bänden, wobei seine von der Geodätischen Praxis geleiteten mathematischen Theorien durchaus kontroverse Diskussionen auslösten; seine physikalischen Theorien fanden allseits Akzeptanz, konnten aber erst Jahrzehnte später mittels feldtauglicher Messinstrumente überprüft werden.

Dieses wissenschaftliche Schaffen führte Helmert schließlich 1886 zum Direktorat des Geodätischen Instituts Potsdam, welches er damals zu einem Weltzentrum der Geodäsie ausbaute.

Fünf verschiedene Episoden seines Lebens und Schaffens werden aus dem eingangs genannten Anlass in den nachfolgenden Beiträgen namhafter Lehrer und Forscher der Geodätischen Wissenschaft vorgestellt. Dafür gebührt ihnen der Dank des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum Dortmund e.V., der Veranstalter des 13. Symposiums zur Vermessungsgeschichte war; dieser Dank gilt in gleicher Weise allen interessierten Teilnehmern dieser Veranstaltung.

Erich Weiß, Dortmund im Februar 2017

Friedrich Robert Helmert 1843 – 1917

Ausschnitte aus seinem Lebensweg und seinem internationalen Wirken

Christoph Reigber

1. Einleitung

Wenn wir uns heute hier im Dortmunder Museum für Kunst und Kulturgeschichte zu einer Veranstaltung unter dem Titel Friedrich Robert Helmert - zum 100. Todestag im Rahmen des Symposienzyklus zur Vermessungsgeschichte treffen, so bringen wir hiermit unsere Bewunderung und Verehrung gegenüber einem herausragenden Gelehrten, Forscher und akademischen Lehrer der Geodäsie zum Ausdruck, der mit seinem außerordentlich schöpferischen, gedanklichen und organisatorischen Schaffen die Entwicklung der praktischen und theoretischen Grundlagen der Geodäsie in der Zeitenwende vom 19. in das 20. Jahrhundert maßgeblich beeinflusst hat und auch heute noch in das Wertebild, das die Geodäsie für die modernen Geowissenschaften hat, hineinwirkt.

Friedrich Robert Helmert lebte, studierte und wirkte in einer Zeitperiode, die sowohl realpolitisch, als auch sozial-, wirtschafts- und wissenschaftspolitisch durch große Umbrüche und Neuerungen gekennzeichnet war. Europa und insbesondere die deutschen Einzelstaaten waren nach dem Wiener Kongress neu sortiert worden. Die Erfindung von Dampfmaschinen, Eisenbahnen, die aufkommende Elektrotechnik und Telegraphie, und insbesondere der schnelle Ausbau des Eisenbahnnetzes, waren die entscheidenden Impulse für die rasante Industrialisierung Deutschlands. Die Industrialisierung veränderte die Struktur der Gesellschaft mit allen damit einhergehenden sozialen Problemen, aber auch positiven Entwicklungen. Wissen, akademische Bildung und Forschung wurden als wichtige Voraussetzungen für eine gesicherte Existenz, sozialen Aufstieg und gesellschaftliche Anerkennung gewertet. Die Gründung einer Vielzahl von Polytechnischen Schulen, den späteren Technischen Hochschulen, lieferte die akademischen Ausbildungsstätten für die Heranbildung des dringend benötigten Nachwuchses für die Ingenieur- und Naturwissenschaften.



Abb. 1.1: Friedrich Robert Helmert, 1913, im Jahr seines 70. Geburtstages

Es war Alexander von Humboldt (1769-1859), der in der ersten Hälfte des 19. Jahrhundert die Naturwissenschaften in das Blickfeld der breiteren Öffentlichkeit rückte. Er war es auch, der dem jungen Hauptmann Johann Jacob Baeyer (1794-1885), dem späteren Begründer der Mitteleuropäischen Gradmessung und Präsidenten des Zentralbüros der Europäischen Gradmessung, 1828 vorschlug, ihn auf seiner geplanten Expedition nach Zentralasien zu begleiten, um (Pieper, 1996) ...als vortrefflicher Geodät topographische Aufnahmen, Orts- und Höhenbestimmungen auszuführen.

Die geodätischen Erdmessungsaktivitäten waren Anfang bis Mitte des 19. Jahrhunderts weitestgehend ausgerichtet auf die zunehmend genauere Bestimmung der geometrischen Figur der Erde aus den Ergebnissen der Gradmessungsarbeiten in Europa. Wie im Beitrag von K.H. Ilk zur Figur der Erde näher ausgeführt, waren mit den Figurparametern große Halbachse und Abplattung, bestimmt mittels Ausgleichungsverfahren aus verschiedenen verfügbaren Gradmessungen, zur Studienzeit Helmerts etwa 15 verschiedene bestanschließende Referenzellipsoide abgeleitet worden, mit denen für eine Reihe von Staaten das jeweils eigene geodätische Datum für die staatlichen Aufgaben der Landesvermessung und Kartenherstellung festgelegt wurde. Größere Bedeutung als geodätisches Datum für eine Reihe europäischer Landesvermessungen bzw. der Nordamerikanischen Vermessungen haben hierbei die Referenzellipsoide von Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) und Alexander Ross Clarke (1828-1914) gewonnen.

Den Wandel von der durch wenige Parameter beschreibbaren geometrischen Erdfigur zur physikalisch definierten Erdfigur leiteten 1828 Carl Friedrich Gauß (1777-1855) und 1837 Friedrich Wilhelm Bessel in ihren Schriften ein, in denen sie der wahren Erdfigur jene Fläche zuschrieben, die überall zur Lotrichtung senkrecht steht (Gauß, 1828) und deren überwiegender Teil die Weltmeere darstellen (Bessel, 1837). Damit war die Verbindung von Oberfläche der Erde und Schwerefeld als Niveaufläche des Schwerefeldes eingeführt. Es war schließlich George Gabriel Stokes (1819-1903), der 1849 die Formel zur Berechnung von Störpotential und Geoidundulationen lieferte.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts waren es Johann Benedict Listing (1872), der den Begriff geoidische Fläche für die unter den Kontinenten fortgesetzte Niveaufläche im Meeresniveau einführte und schließlich der große Dresdener Mathematiker, Astronom und Geodät Ernst Heinrich Bruns (1848-1919), der während seiner Berliner Zeit im Geodätischen Institut in seiner großartigen, grundlegenden Abhandlung zur Figur der Erde (Bruns, 1878) die Bestimmung der Kräftefunktion der Erde in den Vordergrund stellte und eine bis heute gültige Beschreibung der mathematischen Eigenschaften des Schwerepotentials und seiner Ableitungen lieferte.

Friedrich Robert Helmert war es schließlich vorbehalten, mit seinem umfassenden Wissen über die gesamte geodätische und astronomische Literatur seiner Zeit, mit seinem herausragenden schriftstellerischen Talent, das auf seiner Gabe zur einfachen, aber dennoch präzisen Beschreibung auch komplizierter Sachverhalte und Theorien und der von ihm gepflegten Verbindung von Theorie und Praxis basiert, als noch junger Wissenschaftler eine Reihe von Abhandlungen zu verfassen, die in die geodätische Weltliteratur eingegangen sind. Als international hoch anerkannter Forscher und Koordinator nationaler und internationaler Programme hat er die Geodäsie und Nachbardisziplinen in Deutschland und Europa entscheidend beeinflusst und befördert.

Leben und Wirken von Friedrich Robert Helmert hat sich im Wesentlichen in drei aufeinander folgenden Zeitabschnitten vollzogen: In der Jugend- und Studienzeit (1843-1869), der Zeit als Hochschullehrer und Forscher an der Technischen Hochschule Aachen (1870-1886) und der Zeit als Direktor des Königlich Preussischen Geodätischen Instituts in Berlin und Potsdam, sowie als Direktor des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung (1887-1917).

F.R. Helmerts Leben, sein Schaffen und seine Bedeutung für die geodätische Wissenschaft und Praxis ist von berufenem Mund in einer großen Anzahl von Nachrufen zu seinem Tod (Eggert, 1917, Schweydar, 1917, Krüger, 1917), in Würdigungen zu seinem 50. Todestag

(Peschel, 1967) und anlässlich der Helmert- Gedächtnisfeier im Rahmen der 100 Jahrfeier der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (Löschner und Wolf, 1970), in Schriften anlässlich der Wiederkehr seines 100. Geburtstages (Berroth, 1943), seines 150. Geburtstages (Wolf, 1993, Rummel, 1993, Harnisch und Harnisch, 1993) und in Torge, 2007 beschrieben und gewürdigt worden.

Dem Verfasser des vorliegenden Beitrags, der das Privileg hatte, fast 13 Jahre lang im Hauptgebäude des ehemaligen Geodätischen Instituts, dem heutigen Helmert Haus A17 des Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ Potsdam, vom Originalschreibtisch Helmer aus, die Geschicke der geodätischen Abteilung dieses Helmholtz-Zentrums in Potsdam zu leiten, sei es gestattet, die ersten beiden Lebensabschnitte verkürzt zu betrachten und den Schwerpunkt der Ausführungen auf Helmer Wirken während seiner Zeit als Direktor des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Internationale Erdmessung zu legen.

2. F.R. Helmer frühe Lebens- und Ausbildungszeit, 1843-1869

Friedrich Robert Helmer kam am 31 Juli 1843 als jüngster Sohn von Johann Friedrich Helmer und seiner Ehefrau Christiane Friederike, geborene Linke, in der Universitätsstadt Freiberg, im ehem. Königreich Sachsen, zur Welt. Sohn Friedrich Robert war das 2. Kind seiner Mutter und das 17. Kind seines Vaters, beide seit 1840 in 2. Ehe verheiratet (Berroth, 1953). Seine früheste Jugend verlebte F.R. Helmer mit mehreren Geschwistern in Freiberg, in der Nonnengasse 17. Gedenktafeln, die aus Anlass seines 70. und 100. Geburtstages und des 50. Todestages (Peschel, 1967) an seinem Geburtshaus Nonnengasse 17 angebracht wurden, erinnern an den berühmten Sohn der Universitätsstadt Freiberg, den späteren Professor der Geodäsie und Direktor des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts in Potsdam.

Vater Johann Friedrich Helmer (1791-1861), der als Kassierer für verschiedene Stiftungen, mit einem sicherlich bescheidenen Salär , eine mehrköpfige Familie zu versorgen hatte, erkannte früh die guten geistigen Anlagen seines Sohnes Friedrich Robert, und ermöglichte ihm bis Ostern 1857 den Besuch der Bürgerschule in Freiberg. Wie Helmer in seinem 1869 bei der Aachener Polytechnischen Schule eingereichten handgeschriebenen Lebenslauf schrieb (Berroth, 1953), konnte er anschließend mit 13 Jahren für zwei Jahre die renommierte Annenschule in Dresden besuchen, auf Grund der Fürsorge durch einen Bruder, der Konrektor dieser Schule zu diesem Zeitpunkt war.

Nach gut bestandenem Reifeexamen wechselte F.R. Helmer Ostern 1859, im jugendlichen Alter von sechzehn Jahren, auf die Königlich Sächsische Polytechnische Schule in Dresden, eine der Bergakademie Freiberg gleichrangige Bildungsstätte, aus der die spätere Technische Hochschule Dresden hervorging. Mit Überspringen der untersten Klasse erhielt Helmer hier eine umfassende Ausbildung in den theoretischen und praktischen Aspekten der in der damaligen Zeit aktuellen Ingenieurwissenschaften, zu denen insbesondere der Eisenbahnbau und das Bauwesen zählten. Seine weitere Entwicklung geprägt hat hier insbesondere der an dem Polytechnikum seit 1858 als ordentlicher Professor der Geodäsie tätige Christian August Nagel (1821-1903), der den Studenten Helmer außer in die vermessungstechnischen Grundlagen auch in seine eigene Arbeitswelt einführte, indem er ihn an Feldarbeiten bei der Triangulation des Erzgebirgischen Kohlebasins und der Sächsischen Gradmessung beteiligte. Dies mündete einige Jahre später ein in gemeinsame



Abb. 2.1: Geburtshaus F.R. Helmerts, Freiberg, Nommengasse 17

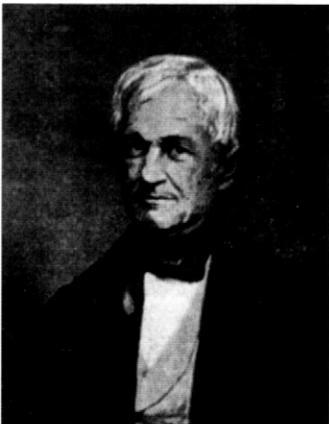


Abb. 2.2: Vater Johann Friedrich Helmert, (1791-1861)



Abb. 2.3: Friedrich Robert Helmert, 1869, zu Beginn seiner beruflichen Laufbahn

Aktivitäten bei der Beobachtung und Bearbeitung der mustergültigen Sächsischen Triangulation. Helmert war zweifelsohne ein außerordentlich begabter, ehrgeiziger und erfolgreicher Student, denn der Abschluss seines kaum dreijährigen Studiums an dem ingenieurwissenschaftlichen Polytechnikum im Juli 1863 erfuhr mit der Überreichung einer Silbermedaille und einem Reisestipendium eine hohe Anerkennung.

Im Spätherbst 1863 begann Helmert seine ihm von Prof. Nagel angebotene Assistententätigkeit an der Sächsischen Landestriangulation. Die dreijährige gemeinsame Arbeit mit seinem verehrten Lehrer an dieser in Ausführung und Auswertung vorbildlichen Landestriangulation hat Helmert entscheidend geprägt. Die anzustrebende Verbindung von Theorie und Praxis, wie sie von Nagel propagiert und vorgelebt wurde, hat Helmerts weitere Denk- und Arbeitsweise, die sich durch sein gesamtes späteres Wirken zieht, entscheidend beeinflusst. Es war im Einverständnis mit seinem Mentor Nagel, dass Helmert ab Oktober 1866 begann, sein bisheriges aus ingenieurtechnischen Studien und gemeinsamer Arbeit zu Problemen der Landesvermessung gewonnenes Wissen durch den Besuch von Vorlesungen zur Mathematik, Astronomie und Physik an der Universität Leipzig zu vertiefen. Bereits nach zweisemestrigem Studium verteidigte Helmert an der dortigen philosophischen Fakultät am 12. Mai 1868 seine Dissertation zum Thema „Studien über rationale Vermessungen im Gebiet der höheren Geodäsie“, eine vielbeachtete Arbeit zur ökonomischen Ausführung von Messaufgaben unterschiedlichster Art. Die Entwicklungen, in dieser den Praktiker aber auch den Theoretiker bezeugenden Arbeit, basieren auf theoretischen Entwicklungen zu mittlerem Punktfehler und Fehlerellipse auf der Basis der Gaußschen Fehlertheorie. Mit der Erlangung der Würde eines Dr. phil. hatte der erst 24 jährige Helmert zielstrebig und sehr erfolgreich seinen Ausbildungsweg beendet.

Bereits im Juni 1868 richtete Helmert ein Anstellungsschreiben an Generalleutnant Johann Jacob Baeyer, den Direktor des Zentralbüros der Europäischen Gradmessungskommission, in dem er unter anderem mitteilt, dass es (Buschmann, 1993a)...sein lebhafter Wunsch sei, an dem zu begründenden geodätischen Institut ankommen zu können, wo es der interessanten Arbeiten in Menge geben wird. Auf Helmerts Nachfrage teilt ihm Baeyer in einem Schreiben vom

22.12.1868 mit, dass die Organisation eines geodätischen Instituts noch nicht entschieden sei, er Helmert im Zentralbüro keine feste Anstellung anbieten und keine selbständigen Arbeiten in Aussicht stellen könne. Daraufhin schickte Helmert am 12. Januar 1869 eine freundliche Rücknahme seiner Bewerbung, mit dem besonderen Hinweis auf die für ihn wichtige selbständige Tätigkeit (Buschmann, 1993a).

Stattdessen trat er am 1. Februar 1869, nachdem er vorher eine ihm angebotene Stelle als Observator in Leyden ausgeschlagen hatte, die Stelle eines Observators an der gut ausgestatteten Sternwarte Hamburg an, die ihm die Möglichkeit bot, seine bisherigen Kenntnisse der Astronomie zu vertiefen. Hier führte er in den beobachtungstechnisch geeigneten Monaten der Jahre 1869 und 1870 Aufnahmen des Sternhaufens im Sternbild des Sobieskischen Schildes aus und beschäftigte sich in seiner Hamburger Zeit, aber auch noch Jahre später, mit der strengen Ausgleichung der gewonnenen Beobachtungen. Mit einer Reihe von späteren Veröffentlichungen in den Astronomischen Nachrichten machte sich Helmert auch in der Astronomie einen Namen. Eine späte Würdigung erfuhr dies durch die Internationale Astronomische Union durch die Benennung eines Kraters des Erdmondes (Position $7^{\circ}36'$ Süd und $87^{\circ}36'$ Ost) nach Friedrich Robert Helmert.

3. F.R. Helmerts Jahre als Hochschullehrer und Forscher in Aachen, 1870-1886

Nach einem Jahr Observatorentätigkeit an der Sternwarte Hamburg erhielt Helmert, erst 27jährig, am 13. Januar 1870 eine Berufung als ordentlicher Lehrer für das Fachgebiet Praktische Geometrie und Geodäsie an der neu gegründeten Rheinisch Westfälischen Polytechnischen Schule in Aachen, der späteren Technischen Hochschule Aachen. Mit Eröffnung der Schule am 1. Oktober 1870 wechselte Helmert von Hamburg nach Aachen zur Übernahme seines Lehramtes. Während der nun folgenden, fast 15 Jahre dauernden Lehrtätigkeit an der Technischen Hochschule Aachen, legte der begnadete Hochschullehrer und aufstrebende Wissenschaftler F.R. Helmert die Grundlagen seines späteren internationalen Rufes als Großmeister der Geodäsie.

Neben dem zeitaufwendigen Erstaufbau des Studienbetriebes zum Vorlesungszyklus Praktische Geometrie, Ausgleichsrechnung, Höhere Geodäsie und gelegentlicher Unterstützung seines Lehrers Prof. Nagel bei den Arbeiten zur Sächsischen Landesvermessung, widmete sich Helmert bereits in den ersten Jahren in Aachen, wohl auch in Vorbereitung seiner Vorlesungen zur praktischen Geometrie und Ausgleichsrechnung, einer kritischen Bewertung der zu der damaligen Zeit vorliegenden Abhandlungen zur Ausgleichsrechnung, wie die von Gauß, Gerling, Bauernfeind und seiner eigenen Dissertationsschrift. Seine Arbeiten mündeten bereits 1872 in die Veröffentlichung seines ersten großen Lehrbuches Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Anwendungen auf die Geodäsie, die Physik und die Theorie der Messinstrumente (Helmert, 1872). Dieses vielzitierte, und von Prof. H. Wolf in seiner Schrift von 1970 (Wolf, 1970) so treffend in seiner Aktualität



Abb. 3.1: Titelseite des 1. gr. Werkes Helmerts aus der Aachener Zeit

bis in unsere Zeit charakterisierte Standardwerk der Ausgleichsrechnung führte wegen der für Helmert typischen klaren und ausführlichen Abhandlung der mathematischen Grundlagen, gepaart mit zahlreichen praktischen Beispielen aus Geometrie, Geodäsie und Physik, zum Durchbruch der bis dahin noch durchaus umstrittenen Ausgleichsrechnung für Anwendungen in der Vermessungspraxis, aber auch im erweiterten Kreis der Ingenieurwissenschaften, der Physik und Astronomie.

Dieses sich weit verbreitende Werk der Ausgleichsrechnung, das Helmert als Theoretiker und Praktiker auch international bekannt machte, aber auch seine in den frühen Aachener Jahren entstandenen Abhandlungen zu praktischen Ingenieursproblemen und seine persönliche Ausstrahlung als Lehrender, waren sicher mitbestimmend dafür, dass F.R. Helmert zum 31. Dezember 1872, im jugendlichen Alter von 29 Jahren, als ordentlicher Professor an die Hochschule Aachen berufen wurde.

In den ersten Jahren als Inhaber des Lehrstuhls für Ingenieurpraxis und Höhere Geodäsie widmete sich der Ingenieur und Praktiker Helmert, neben der Vorlesungstätigkeit, dem eingehenden Studium grundlegender Problemstellungen des Ingenieur- und Vermessungswesens der damaligen Zeit. Er veröffentlichte eine Reihe von Arbeiten in der Zeitschrift des Hannoverschen Architekten- und Ingenieurvereins und in der ab 1872 erstmals erschienenen Zeitschrift für Vermessungswesen des Deutschen Geometer Vereins. Als eine bis in die Neuzeit immer wieder zitierte Arbeit zu dieser Thematik ist die im Jahr 1872 erschienene Schrift Die Übergangskurven für Eisenbahngleise mit Rechenbeispielen und Tafeln für den praktischen Gebrauch zu nennen.

1875 trat Helmert, einem Wunsch des Deutschen Geometer Vereins entsprechend, neben Prof. Jordan als Mitherausgeber in die Schriftleitung der Zeitschrift für Vermessungswesen ZfV ein, eine Funktion, die er überaus aktiv mit vielen eigenen Beiträgen bis in das Jahr 1883 ausübte. Seine Verdienste wurden 1884 mit der Ehrenmitgliedschaft im Geometer Verein gewürdigt. Wenn man die Hefte der einzelnen ZfV Jahrgänge in diesem Zeitabschnitt durchblättert, ist man bewundernd erstaunt über die Fülle und Breite an Themen, mit denen sich Helmert beschäftigt und zu denen er publiziert hat, ebenso wie über die große Anzahl an Besprechungen und Rezensionen, die er zu Arbeiten anderer Autoren bzw. Bucherscheinungen verfasst hat. Es finden sich in den ersten Jahrgängen Abhandlungen zum Beispiel zur Theorie der Libellenachse, zur Ausgleichung von Richtungsbeobachtungen, Berichte über neuerschienene Schriften, Literaturzusammenstellungen, aber im Laufe der Jahre auch zunehmend Arbeiten zu Themen der höheren Geodäsie. Helmersts Beiträge aus dem Jahrgang 1877 zu diesem Themenkreis sind z.B. Die Beweiskraft der Gradmessungen für die Existenz der näherungsweise rotationsförmigen Gestalt des Geoids, zum Theorem von Clairaut und zum Fundamentalsatz der geodätischen Linie auf dem Rotationsellipsoid. All diese Studien zu geodätischen Teilproblemen waren Bausteine zu einem von Helmert geplanten großen Gesamtwerk der systematischen Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen der Landesvermessung und Erdmessung, ausgehend von den eingangs angesprochenen, die damalige Zeit prägenden Arbeiten von Gauß, Bessel, Baeyer, Hansen und Bruns.

Mit seinen ab 1877 begonnenen Ausarbeitungen hatte sich Helmert dem großen Ziel verschrieben, ein Gesamtwerk zu schaffen, das sowohl eine erschöpfende systematische Zusammenstellung aller bis zum Zeitpunkt der Bearbeitung gefundenen grundlegenden Theorien, aber auch ergänzende und neue eigene Untersuchungen, Entwicklungen und Theorien umfassen sollte. Formell ist er beim Verfassen des Gesamtwerkes entsprechend

seiner eigenen Vorstellung von einer präzisen, nach einheitlichen Gesichtspunkten und auf allgemeines Verständnis ausgerichteten Darstellungsart vorgegangen, ergänzt durch Zahlenbeispiele zu mathematischen Entwicklungen und praktischen Beispielen zur Theorie der Erdfigur. Um gutes allgemeines Verständnis zu erreichen, hat sich Helmert dabei bei manchen Ableitungen und eigenen Entwicklungen Beschränkungen auferlegt, denn wie er im Vorwort zu Band 1 seines Werkes formuliert (Helmert, 1880): ...auch wenn es mathematisch interessant ist, in jedem Fall das Gültigkeitsgesetz eines Satzes in vollem Umfange zu erkennen, so verliert doch diese Kenntnis jede Bedeutung für die geodätische Anwendung.

Das Ergebnis der kritischen Gesamtbearbeitung und theoretischen Durchdringung des vorhandenen Wissens und Beobachtungsmaterials, das Helmert in akribischer Detailarbeit und durchdrungen von eigenen Entwicklungen und Überlegungen zu zukünftigen Arbeits- und Forschungsrichtungen in seiner Aachener Zeit bis 1883 zusammengeführt hatte, fand seinen literarischen Niederschlag in dem grandiosen zweibändigen Werk Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie. Beide Bände sind bei der B.G.Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1880 und 1884 erschienen, 1962 neu aufgelegt worden, und können noch heute als Paperback erworben, oder als Scans im Internet gelesen werden.

In den Mathematischen Theorien behandelt Helmert ausführlich alle für Landesvermessung und Erdmessung wichtigen Berechnungsverfahren für die Kugel und das schwach abgeplattete Rotationsellipsoid. Den Bezug zur Geodäsie auf der physischen Erdoberfläche liefert er über die Theorie der Lotabweichungen in der Helmerischen Definition. Die theoretischen Grundlagen für die Bearbeitung geodätisch – astronomischer Messungen, die in der späteren Zeit für die praktischen Arbeiten zur Lotabweichungsausgleichung im Zentralbüro der Internationalen Erdmessung so große Bedeutung erlangen sollten, finden sich bereits in diesem Band 1.

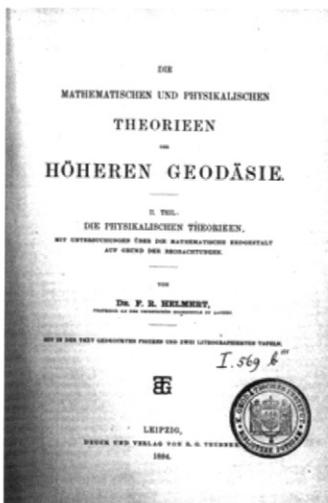


Abb. 3.2: Titelseite Teil 2, Physikalische Theorien des Helmerischen Hauptwerkes

Der Band 2 mit den Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie liefert eine umfassende und systematische Zusammenführung der Theorie des Schwerefeldes mit der Theorie zu Figur und Dynamik des Erdkörpers, ergänzt durch aus Beobachtungen gewonnene praktische Ergebnisse für die Erdgestalt. Aus dem gesamten Spektrum der in diesem großartigen Werk behandelten theoretischen Grundlagen der physikalischen Geodäsie, auf die umfassend in der Darstellung von M. Harnisch und G. Harnisch, 1993 zu Helmerischen Arbeiten zur physikalischen Geodäsie eingegangen wird, seien nur herausgegriffen

- die Helmert Projektion und damit zusammenhängend die Helmerische Definition der Lotabweichung als Differenz von Lotrichtung und Ellipsoidnormale im Oberflächenpunkt,
- Helmerischen Beitrag zur Theorie des geometrischen Nivellements, speziell der orthometrischen Höhenkorrektur zur Berechnung des physikalisch definierten metrischen Höhenwertes zwischen Geoid

bis in unsere Zeit charakterisierte Standardwerk der Ausgleichsrechnung führte wegen der für Helmert typischen klaren und ausführlichen Abhandlung der mathematischen Grundlagen, gepaart mit zahlreichen praktischen Beispielen aus Geometrie, Geodäsie und Physik, zum Durchbruch der bis dahin noch durchaus umstrittenen Ausgleichsrechnung für Anwendungen in der Vermessungspraxis, aber auch im erweiterten Kreis der Ingenieurwissenschaften, der Physik und Astronomie.

Dieses sich weit verbreitende Werk der Ausgleichsrechnung, das Helmert als Theoretiker und Praktiker auch international bekannt machte, aber auch seine in den frühen Aachener Jahren entstandenen Abhandlungen zu praktischen Ingenieursproblemen und seine persönliche Ausstrahlung als Lehrender, waren sicher mitbestimmend dafür, dass F.R. Helmert zum 31. Dezember 1872, im jugendlichen Alter von 29 Jahren, als ordentlicher Professor an die Hochschule Aachen berufen wurde.

In den ersten Jahren als Inhaber des Lehrstuhls für Ingenieurpraxis und Höhere Geodäsie widmete sich der Ingenieur und Praktiker Helmert, neben der Vorlesungstätigkeit, dem eingehenden Studium grundlegender Problemstellungen des Ingenieur- und Vermessungswesens der damaligen Zeit. Er veröffentlichte eine Reihe von Arbeiten in der Zeitschrift des Hannoverschen Architekten- und Ingenieurvereins und in der ab 1872 erstmals erschienenen Zeitschrift für Vermessungswesen des Deutschen Geometer Vereins. Als eine bis in die Neuzeit immer wieder zitierte Arbeit zu dieser Thematik ist die im Jahr 1872 erschienene Schrift Die Übergangskurven für Eisenbahngleise mit Rechenbeispielen und Tafeln für den praktischen Gebrauch zu nennen.

1875 trat Helmert, einem Wunsch des Deutschen Geometer Vereins entsprechend, neben Prof. Jordan als Mitherausgeber in die Schriftleitung der Zeitschrift für Vermessungswesen ZfV ein, eine Funktion, die er überaus aktiv mit vielen eigenen Beiträgen bis in das Jahr 1883 ausübte. Seine Verdienste wurden 1884 mit der Ehrenmitgliedschaft im Geometer Verein gewürdigt. Wenn man die Hefte der einzelnen ZfV Jahrgänge in diesem Zeitabschnitt durchblättert, ist man bewundernd erstaunt über die Fülle und Breite an Themen, mit denen sich Helmert beschäftigt und zu denen er publiziert hat, ebenso wie über die große Anzahl an Besprechungen und Rezensionen, die er zu Arbeiten anderer Autoren bzw. Bucherscheinungen verfasst hat. Es finden sich in den ersten Jahrgängen Abhandlungen zum Beispiel zur Theorie der Libellenachse, zur Ausgleichung von Richtungsbeobachtungen, Berichte über neuerschienene Schriften, Literaturzusammenstellungen, aber im Laufe der Jahre auch zunehmend Arbeiten zu Themen der höheren Geodäsie. Helmersts Beiträge aus dem Jahrgang 1877 zu diesem Themenkreis sind z.B. Die Beweiskraft der Gradmessungen für die Existenz der näherungsweise rotationsförmigen Gestalt des Geoids, zum Theorem von Clairaut und zum Fundamentalsatz der geodätischen Linie auf dem Rotationsellipsoid. All diese Studien zu geodätischen Teilproblemen waren Bausteine zu einem von Helmert geplanten großen Gesamtwerk der systematischen Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen der Landesvermessung und Erdmessung, ausgehend von den eingangs angesprochenen, die damalige Zeit prägenden Arbeiten von Gauß, Bessel, Baeyer, Hansen und Bruns.

Mit seinen ab 1877 begonnenen Ausarbeitungen hatte sich Helmert dem großen Ziel verschrieben, ein Gesamtwerk zu schaffen, das sowohl eine erschöpfende systematische Zusammenstellung aller bis zum Zeitpunkt der Bearbeitung gefundenen grundlegenden Theorien, aber auch ergänzende und neue eigene Untersuchungen, Entwicklungen und Theorien umfassen sollte. Formell ist er beim Verfassen des Gesamtwerkes entsprechend

seiner eigenen Vorstellung von einer präzisen, nach einheitlichen Gesichtspunkten und auf allgemeines Verständnis ausgerichteten Darstellungsart vorgegangen, ergänzt durch Zahlenbeispiele zu mathematischen Entwicklungen und praktischen Beispielen zur Theorie der Erdfigur. Um gutes allgemeines Verständnis zu erreichen, hat sich Helmert dabei bei manchen Ableitungen und eigenen Entwicklungen Beschränkungen auferlegt, denn wie er im Vorwort zu Band 1 seines Werkes formuliert (Helmert, 1880): ...auch wenn es mathematisch interessant ist, in jedem Fall das Gültigkeitsgesetz eines Satzes in vollem Umfange zu erkennen, so verliert doch diese Kenntnis jede Bedeutung für die geodätische Anwendung.

Das Ergebnis der kritischen Gesamtbearbeitung und theoretischen Durchdringung des vorhandenen Wissens und Beobachtungsmaterials, das Helmert in akribischer Detailarbeit und durchdrungen von eigenen Entwicklungen und Überlegungen zu zukünftigen Arbeits- und Forschungsrichtungen in seiner Aachener Zeit bis 1883 zusammengeführt hatte, fand seinen literarischen Niederschlag in dem grandiosen zweibändigen Werk Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie. Beide Bände sind bei der B.G.Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1880 und 1884 erschienen, 1962 neu aufgelegt worden, und können noch heute als Paperback erworben, oder als Scans im Internet gelesen werden.

In den Mathematischen Theorien behandelt Helmert ausführlich alle für Landesvermessung und Erdmessung wichtigen Berechnungsverfahren für die Kugel und das schwach abgeplattete Rotationsellipsoid. Den Bezug zur Geodäsie auf der physischen Erdoberfläche liefert er über die Theorie der Lotabweichungen in der Helmerischen Definition. Die theoretischen Grundlagen für die Bearbeitung geodätisch – astronomischer Messungen, die in der späteren Zeit für die praktischen Arbeiten zur Lotabweichungsausgleichung im Zentralbüro der Internationalen Erdmessung so große Bedeutung erlangen sollten, finden sich bereits in diesem Band 1.

Der Band 2 mit den Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie liefert eine umfassende und systematische Zusammenführung der Theorie des Schwerfeldes mit der Theorie zu Figur und Dynamik des Erdkörpers, ergänzt durch aus Beobachtungen gewonnene praktische Ergebnisse für die Erdgestalt. Aus dem gesamten Spektrum der in diesem großartigen Werk behandelten theoretischen Grundlagen der physikalischen Geodäsie, auf die umfassend in der Darstellung von M. Harnisch und G. Harnisch, 1993 zu Helmerischen Arbeiten zur physikalischen Geodäsie eingegangen wird, seien nur herausgegriffen

- die Helmert Projektion und damit zusammenhängend die Helmerische Definition der Lotabweichung als Differenz von Lotrichtung und Ellipsoidnormale im Oberflächenpunkt,
- Helmerischen Beitrag zur Theorie des geometrischen Nivellements, speziell der orthometrischen Höhenkorrektur zur Berechnung des physikalisch definierten metrischen Höhenwertes zwischen Geoid



Abb. 3.2: Titelseite Teil 2, Physikalische Theorien des Helmerischen Hauptwerkes

und Oberflächenpunkt entlang der gekrümmten Lotlinie – die Helmert-Höhe,
• und seine Kondensationsmethoden zur Reduktion von Schwerebeobachtungen auf ein gemeinsames Schwereniveau,

die in engem Zusammenhang stehen mit späteren Arbeiten Helmerts und seiner Mitarbeiter zu Lotabweichungsberechnungen, dem Anschluss europäischer Pegelstationen, Untersuchungen zur Isostasie und zu Fragestellungen der Geotektonik und die bis heute unter seinem Namen in Gebrauch sind. Im Beitrag Prof. Ilks wird Ausführlicheres dazu berichtet. In rastloser Forschungsarbeit, mit bewundernswertem Geschick zur kritischen und ergänzenden Bearbeitung des bis 1880 vorliegenden theoretischen Wissens, hatte Helmert in noch jungen Jahren und in einer intellektuellen Glanzleistung mit den Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie ein Werk geschaffen, das nicht nur im Deutschen Reich, sondern auch international höchste Anerkennung fand und Helmerts Ruf als führenden Geodäten seiner Zeit begründete.

4. F.R.Helmerts Jahre als Institutsdirektor, Forscher und Wissenschaftsorganisator in Berlin und Potsdam, 1887 - 1917

Bereits 1877 wurde F.R. Helmert auf Vorschlag der Preußischen Akademie der Wissenschaften in den Wissenschaftlichen Beirat des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts berufen, das auf intensives Betreiben des Präsidenten des Zentralbüros der Europäischen Gradmessung, Generalleutnant J.J. Baeyer und nach eingehenden Verhandlungen mit den preußischen Behörden am 1. Januar 1870 in Berlin gegründet worden war. Aufgabe des neugegründeten Instituts war die Übernahme der Aufgaben und Funktionen, die die in der Europäischen Gradmessung vereinigten Mitgliedsstaaten, in Form der Permanenten Kommission, dem Zentralbüro als ausführendem Organ zugewiesen hatten. Ziel des auf Anregung Baeyers vom Kultusministerium eingerichteten Beirats war es, über Akademiemitglieder im Beirat eine enge Anbindung des Geodätischen Instituts an die Preußische Akademie der Wissenschaften zu erreichen und damit befruchtende Beiträge für die wissenschaftlichen Arbeiten und die internationale Bedeutung des Instituts abzusichern. In den ersten für drei Jahre berufenen Beirat von 1877 wurden auf Vorschlag der Akademie der Kieler Astronom Peter, der Berliner Astronom Auwers, der Berliner Mathematiker Kronecker, der Gründer der Firma Siemens W. Siemens, der Aachener Geodät Helmert und auf Vorschlag von Generalleutnant Bayer der damals im Geodätischen Institut tätige H. Bruns sowie Bayer selbst berufen. Im zweiten Beirat von 1880 ersetzte der Mathematiker Weierstraß den zwischenzeitlich verstorbenen Astronomen Peter und auf Vorschlag Bayers der Physiker Helmholtz den Astronomen, Mathematiker und Geodäten H. Bruns, der 1881 nach Leipzig berufen worden war.

Der Wissenschaftliche Beirat des Geodätischen Instituts wurde einmal jährlich zu einer Plenarsitzung einberufen. Ein außerordentlicher Tagesordnungspunkt von fast allen Sitzungen zu Lebzeiten Baeyers war, neben den Beratungen zu den Gradmessungsarbeiten, die Diskussion zu Notwendigkeit und Lokation eines passenden Dienstgebäudes, um physikalische Arbeiten in der natürlichen Umgebung gut durchführen zu können. Wie in einem Bericht Bayers an die Preußische Akademie vom Januar 1880 formuliert (Pieper, 1996) sei das Centralbureau resp. Geodätische Institut in höchst dürftiger Weise in drei verschiedenen Miets- Etablissements untergebracht. Über diesen Punkt, und wegen der erbitterten Fehde General Baeyers mit der Preußischen Landesvermessung kam es zu Spannungen zwischen Baeyer und einzelnen Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirats.

Bereits 1878 schlugen Helmert, Bruns und alle übrigen Beiratsmitglieder bis auf Baeyer das Gelände auf dem Telegraphenberg bei Potsdam als geeignetes Gelände für den Bau des Geodätischen Instituts vor. Baeyer lehnte diesen Vorschlag wegen der schlechten Verkehrsanbindung Potsdams ab. Auch die in weiteren Verhandlungen in den Jahresitzungen 1880 bis 1884 vorgebrachten Überlegungen zum Bau eines Institutsgebäudes auf dem Telegraphenberg scheiterten am Widerstand des hochbetagten Institutsdirektors Generalleutnant J.J. Baeyer (Lerbs, 1970).

Durch die Arbeit im Wissenschaftlichen Beirat seit 1877 war Helmert mit den unter der Leitung Bayers durchgeführten Arbeiten des Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Europäischen Gradmessung bestens vertraut. Seinen Ruf als exzellenter Wissenschaftler hatte er durch seine auch international stark beachteten Veröffentlichungen und Standardwerke zur höheren Geodäsie aus der Aachener Zeit begründet. Als der hochverdiente erste Direktor des Preußischen Geodätischen Instituts und Präsident der Europäischen Gradmessung am 10. September 1885 im 91. Lebensjahr in Berlin verstarb, war es kein anderer als der Aachener Professor F.R. Helmert, der in Frage kam, das Werk Bayers weiterzuführen und weiterzuentwickeln.

Helmert wurde am 1. Januar 1886 zunächst zum kommissarischen Leiter, und am 22. April 1887 endgültig zum Direktor des Geodätischen Instituts in Berlin ernannt. Mit dieser Ernennung war gleichzeitig die Berufung als ordentlicher Professor auf den neu eingerichteten Lehrstuhl für höhere Geodäsie in der philosophischen Fakultät der Universität Berlin verbunden, die eine Woche vorher erfolgt war. Nach siebzehn Jahren überaus erfolgreicher Tätigkeit als Hochschullehrer und Forscher in Aachen übersiedelte Helmert 1887 nach Berlin.

4.1 Neufestlegung von Organisation und Forschungsarbeiten

Nach der Übernahme des Direktorats des Geodätischen Instituts standen für Helmert eine Reihe zu lösender Organisationsfragen an, die sowohl das Geodätische Institut als auch die bisher im Rahmen der Europäischen Gradmessung durchgeführten Aktivitäten betrafen. Das bezog sich einmal auf das unter der Leitung Bayers festgelegte Arbeitsfeld des Geodätischen Instituts und die ungelöste Dienstgebäudefrage, zum anderen die allein durch die Autorität Bayers zusammengehaltene Organisation der Europäischen Gradmessung und die dem Zentralbüro zugeordneten Aufgaben, die über die vergangenen zwanzig Jahre die Preußische Regierung allein finanziell getragen hatte.

Die sich abzeichnende Ausweitung der Gradmessungsarbeiten, das Interesse einer Reihe außereuropäischer Staaten, sich an dem europäischen Unternehmen zu beteiligen, und die bisherige nicht befriedigende Organisationsform veranlassten Helmert, seinem Hang zu klarer Organisation und Systematik folgend, Anfang 1886 einen Vorschlag zur Reorganisation, Umbenennung und klar strukturierter Aufgabenverteilung innerhalb der Gradmessungsorganisation auszuarbeiten. Der Vorschlag beinhaltete zusätzlich, das Zentralbüro der neuen Organisation wie bisher an das Staatsinstitut Königlich Preußisches Geodätisches Institut anzubinden und die Arbeiten des Zentralbüros durch eine mitgliederfinanzierte Dotierung zu unterstützen.

Diesen Vorschlag unterbreitete die Preußische Regierung den an der Gradmessung beteiligten Staaten zur Beschlussfassung auf der am 27. Oktober 1886 in Berlin abgehaltenen Allgemeinen Konferenz unter kommissarischer Leitung des Direktors der Berliner

Sternwarte, Wilhelm Foerster. Alle Teilnehmerstaaten der Europäischen Gradmessung stimmten dem unterbreiteten Vorschlag zu (Frankreich etwas später) und beschlossen:

- Umbenennung der Organisation in Internationale Erdmessung. 1889 waren ihr 26 Staaten beigetreten, unter ihnen Japan, USA, Chile, Mexiko, Argentinien, Griechenland.
- Erhalt der Permanenten Kommission und ihrer Befugnisse, mit Erweiterung auf 11 ständige Mitglieder.
- Einbindung des Zentralbüros in das Preußische Geodätische Institut in der Weise, dass der Direktor des Geodätischen Instituts zugleich als Direktor der Internationalen Erdmessung fungiert.
- Bereitstellung einer Dotierung von 16 Tausend Mark pro Jahr, zunächst für die Dauer von 10 Jahren.

In ihrer ersten Sitzung im Oktober 1887 in Nizza legte die neu zusammengesetzte Permanente Kommission eine den neuen Verhältnissen angepasste, klar strukturierte Regelung für die dem Zentralbüro obliegenden Funktionen vor, die dem Wunsch Helmerts nach klarer Festlegung von Zuständigkeiten und Aufgaben des von ihm geleiteten Zentralbüros sicher sehr entgegen kam.

Im Einzelnen wurde festgelegt (Helmert, 1890): Das Zentralbüro

- ist ausführendes Organ der Permanenten Kommission. Sein Direktor ist ständiges Mitglied der Permanenten Kommission und hat dieser jährlich einen Bericht über die Tätigkeiten des Zentralbüros und einen Arbeitsplan für das Folgejahr vorzulegen,
- ist zuständig für die Mittelverwaltung der Dotationsgelder, mit Vorlage der Jahresabschlüsse gegenüber der Permanenten Kommission,
- Verwaltet und verwahrt das Archiv, die Bibliothek und sonstige Sammlungen der Internationalen Erdmessung,
- unterstützt den Ständigen Sekretär der Permanenten Kommission und von der Kommission ernannte Spezialberichtersteller bei ihren Arbeiten,
- sammelt alle Daten, die notwendig sind, um systematisch Bericht über den Stand der Arbeiten der Internationalen Erdmessung erstellen zu können,
- ist zuständig für Verhandlungen und die Koordination von Aktivitäten zur Ausführung astronomischer und geodätischer Messungen,
- hat die Aufgabe, sich auf höchstem Kenntnisstand zu wissenschaftlichen Fragestellungen der Erdmessung zu halten und sowohl die theoretische wie praktische Fortentwicklung der geodätischen Wissenschaft im Auge zu behalten.

Gleich nach seinem Dienstantritt hatte Helmert im Frühjahr 1886 unter Mitwirkung der bisherigen Sektionsvorsteher des Geodätischen Instituts eine Übersicht über alle bisherigen Arbeiten und Publikationen des Instituts zur allgemeinen Orientierung zusammengestellt und davon ausgehend in allgemeiner Form einen Arbeitsplan für die nächsten zehn Jahre beschrieben und zum Teil mit Kostenabschätzungen versehen.

Wie in Helmert, 1886 beschrieben, waren die bisherigen Arbeiten des Instituts stark ausgerichtet auf die Realisierung der Struveschen Längengradmessung entlang des Parallelkreises in 52° nördlicher Breite von Irland bis zum Ural und der von Generalleutnant J.J. Bayer entworfenen Mitteleuropäischen Gradmessung, einer Verbindung von Längen-

und Breitenbestimmungen in durch Dreiecksketten verbundenen astronomischen Punkten entlang eines Nord-Süd Streifens von Kristiania/Upsala bis Palermo und einer West-Ost Verbindung von Bonn und Turin bis Königsberg und Krakau.



Abb. 4.1: Titelseite zum Allgemeinen Arbeitsplan des Geodätischen Instituts von 1886

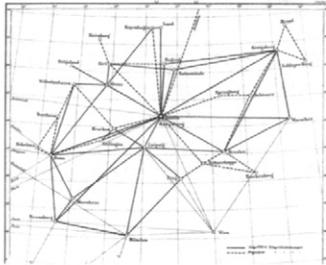


Abb. 4.2: Astro-geodätisches Netz 1. Ordnung der Internationalen Erdmessung, Mitteleuropa, Planung 1886

und Azimut geplant. Neben Ergänzungsmessungen im Bereich des Harzes und des Riesengebirges waren eine Reihe von Längenverbindungen mit Stationen außerhalb Deutschlands geplant, so die Verbindung mit dem nordischen, dem österreichischen und belgischen Netz (Abb. 4.2).

Die Bearbeitung großer Lotabweichungssysteme unter Einbeziehung der Laplace Gleichung hatte Helmert in Band I seines Hauptwerkes (Helmert, 1880) vorgegeben.

Die wünschenswerte Ausführung von absoluten und relativen Schweremessungen, die Durchführung von Basislinienvergleichen und Nivellementsanschlüssen und die zügige Auswertung vorhandener und zukünftiger Beobachtungsreihen machte Helmert abhängig von notwendigen Vorstudien, Versuchsmessungen und geeigneten Räumlichkeiten, die nur in einem geeigneten neuen Dienstgebäude zu realisieren seien. Mit diesen Aktivitäten würde es, wie es Helmert ausdrückt, an wissenschaftlich lohnender Arbeit für 12-14 Personen auf einen Zeitraum von mehr als einem Decennium nicht fehlen.

Helmert hatte seine, im Anhang zur Übersicht der Arbeiten des Königlich Geodätischen

Helmert schrieb eingangs in seinem Zehnjahresplan, dass für ihn die Bearbeitung des preußischen Anteils an der europäischen Gradmessung, das heißt die astrogeodätische Bestimmung des Geoides in Mitteleuropa höchste Priorität habe, und zwar aus zwei Gründen: Einmal konnte nur so das mit astronomischen Beobachtungen vertraute Fachpersonal im Institut gehalten werden und zum anderen bildeten für ihn die zu erwartenden Ergebnisse der astrogeodätischen Geoidbestimmung den Ausgangspunkt für, wie er schreibt,... weiterhin anzustellende besonders interessante Forschungen über Massenverteilungen in der Erdkruste (Helmert, 1886). Der umsichtige Organisator und neuen Fragestellungen zur Dynamik des Erdkörpers zugewandte Forscher Helmert führte hier einen Teil seiner in den Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie zum Ausdruck gebrachten Ideen für zukünftige Arbeiten in das Arbeitsprogramm des Geodätischen Instituts ein.

Helmert schlug zur Lösung der Aufgabe die Ermittlung von Lotabweichungen in einem Netz von etwa 70 Punkten vor, mit dem Punkt Rauenberg bei Berlin als Zentralpunkt, über den auch die astronomische Orientierung des preußischen Landesdreiecknetzes festgelegt war. Mit Rauenberg sollten 21 weitere Stationen das Netz 1. Ordnung bilden, auf denen neben astronomischen Breiten- und Azimut-Messungen auch telegraphische Längen-Bestimmungen durchzuführen waren. Für den Rest der 70 Punkte, den Punkten 2.Ordnung, war nur die Beobachtung von Breite

Instituts unter Generalleutnant Bayer, beschriebenen Planungen für ein auf wissenschaftliche Fragestellungen ausgerichtetes Arbeitsprogramm, bereits in die Verhandlungen Ende 1885 zur Wiederbesetzung der Leitungsstelle im Institut eingebracht, und auch verhandelt, dass das Geodätische Institut in Zukunft von den bisher für die Königliche Landesaufnahme durchgeführten umfänglichen Triangulations- und Nivellementsmessungen befreit wird, und solche nur zur Erfüllung von wissenschaftlichen Aufgaben des Instituts und der Internationalen Erdmessung zu erbringen habe.

Der von Helmert mit der preußischen Regierung verhandelte veränderte Aufgabenbereich wurde im neuen Statut des Geodätischen Instituts vom 15. Januar 1887 festgeschrieben. Das Institut unterstand danach weiterhin direkt dem Ministerium für Unterrichts- und Medicinal- Angelegenheiten. Begutachtendes Organ war die Königliche Akademie der Wissenschaften (mit Auflösung des bisherigen Wissenschaftlichen Beirats), an die auch die Jahresberichte des Institutsdirektors zu gehen hatten, zur eventuellen Kommentierung und Weiterleitung der Berichte an den Minister.

Als auszuführende Arbeiten waren im Statut namentlich angesprochen (Helmert, 1890):

- Astronomische Bestimmung der Lotrichtung an möglichst vielen Punkten des Landesnetzes und Verbindungspunkten zu Nachbarnetzen.
- Astronomische Orientierungsbestimmungen an möglichst vielen Netzpunkten.
- Zenitdistanzmessungen zwischen geeigneten Netzpunkten.
- Messung der Schwereintensität in möglichst vielen Punkten.
- Untersuchungen zu Lage und Veränderungen des Meeresspiegels an den Küsten des Landes.
- Grundlinienmessungen, Triangulations- und Nivellementsmessungen für rein experimentelle Zwecke sowie für Aufgaben der Internationalen Erdmessung.
- Untersuchungen zu Hilfsmitteln und Methoden.
- Theoretische, rechnerische und experimentelle Untersuchungen.



Abb. 4.3: Titelblatt des Statuts des Geodätischen Instituts von 1887

Mit den Regelungen der Übereinkunft der Allgemeinen Konferenz von 1886 und dem im neuen Statut von 1887 aufgelisteten Aufgabenspektrum des Geodätischen Instituts hatte Helmert als Direktor des Geodätischen Instituts und als Direktor des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung, der gleichzeitig einen Sitz in der Permanenten Kommission innehatte, sowie zusätzlich als neugewähltes ordentliches Mitglied der Preußischen Eichkommission, weitestgehende Möglichkeiten, die Arbeiten des Instituts mit den Zielen und Aufgaben der Internationalen Erdmessung zu verzahnen. Damit war ein Betätigungsfeld abgesteckt, in dem Helmert seine, von allen Zeitzeugen beschriebene, beeindruckend hohe organisatorische und wissenschaftliche Qualifikation voll entfalten konnte. Die von Helmert angestrebte und in seinen Arbeiten vorgezeichnete verstärkte geowissenschaftliche Ausrichtung der geodätischen Forschung, die Prüfung geodätischer Meß- und Beobachtungsgeräte und die Entwicklung von Eich- und Prüfverfahren, so-

wie die Koordination und Durchführung von weltweiten Beobachtungen der Schwere und Polhöenschwankungen bestimmten von nun an das Arbeitsfeld des Geodätischen Instituts Potsdam und der Internationalen Erdmessung.

Mit einem Mitarbeiterstab von vier Sektionsvorstehern, namentlich den Professoren Albrecht, Börsch, Fischer und Löw und neun Wissenschaftlern und Technikern aus der Baeyer'schen Zeit des Instituts machte sich Helmert sofort nach der Amtsübernahme an die Detailplanung und systematische Bearbeitung von im Arbeitsplan des Instituts vorgesehenen einzelnen Programmpunkten und die Erfüllung von Verpflichtungen des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung gegenüber der Permanenten Kommission. Auf die ins Auge gefassten Arbeitsschwerpunkte hatte Helmert bereits in den Berliner Jahren mehrere Mitarbeiter sektionsübergreifend, entsprechend ihrer Befähigung und Neigung, eingesetzt. Dieser sektionsübergreifende schwerpunktmäßige Einsatz der Mitarbeiter hat sich offensichtlich bewährt, denn ab der Jahresberichte 1885/86 tritt der Sektionsvorsteher nur als Dienstrang auf. Er hatte keinen festen Mitarbeiterstab mehr sondern erhielt die für Lösung einer Aufgabe jeweils erforderliche Anzahl von Wissenschaftlern (Lerbs, 1970).

Bereits im Frühjahr 1886 hatte Helmert mit fünf Mitarbeitern umfangreiche Lotabweichungsberechnungen nach einem vereinfachten Verfahren eingeleitet und Ergebnisse, benutzte Formeln und Hilfstafeln in einer vielbeachteten Veröffentlichung „Lot-ittabweichungen, Heft I“ der Allgemeinen Konferenz in Berlin im Oktober 1886 vor-gelegt. Zwei weitere Berichte mit ergänzenden Lotabweichungsberechnungen in Zentral- und Westeuropa wurden auf den Sitzungen der Permanenten Kommission in Nizza (1887) und Salzburg (1888) präsentiert. Damit lag erstmals ein zusammenhängendes System von Lotabweichungsberechnungen vor, das von Algerien bis zu den Shetland Inseln und von Ostpreußen bis Irland reichte. Die aus der Baeyer'schen Ära vorliegenden Lotabweichungsbeobachtungen im Bereich des Harzes wurden durch astro-geodätische Messungen auf zwei Ost – West Profilen nördlich und südlich des Brockens im Zeitraum 1886/87 ergänzt, und in einer ersten zusammenfassenden Auswertung wurden daraus die Lotabweichungen und Geoidundulationen im Bereich des Harzes und im Meridian des Brockens von 47° Breite bis $55^{\circ}30'$ Breite abgeleitet (Krüger, 1888).

Über weitere von Prof. Albrecht durchgeführte Bestimmungen von Längenunterschieden im astronomisch – geodätischen Netz 1. Ordnung, trigonometrische Nivellements-messungen von Fischer und Galle zum Anschluss der Insel Wangerooge an das Festland, und zu Schwerebeobachtungen mit Pendeln wurde berichtet in den nun jährlich von Helmert herausgegebenen Tätigkeitsberichten des Instituts an den Minister, die unter dem Titel Jahresbericht des Direktors des Königlichen Geodätischen Instituts für die Zeit von.... bis.....veröffentlicht wurden und in den Jahresberichten des Zentralbüros an die Permanente Kommission, die unter dem Titel Bericht über die Tätigkeit des Centralbureaus der Internationalen Erdmessung im Jahre YY nebst dem Arbeitsplan für YY+1 erschienen. Alle Berichte, die bis zum Tod Helmer's erstellt wurden, und die alle im Original bzw. elektronisch im Bibliotheksarchiv des Wissenschaftsparks Albert Einstein auf dem Telegraphenberg zu finden sind, geben einen detaillierten Einblick in alle vom Geodätischen Institut und Zentralbüro der Internationalen Erdmessung während der Amtszeit Helmer's durchgeführten Arbeiten, Planungen und wissenschaftlichen Ergebnisse.

4.2 Neubau des Geodätischen Instituts auf dem Telegraphenberg

Es war Helmert schon bei den Verhandlungen zum zukünftigen Arbeitsplan des Instituts

klar, dass es ohne eine seit 1876 in Diskussion befindliche Realisierung eines geeigneten Dienstgebäudes außerhalb Berlins zu gravierenden Problemen bei der Umsetzung des Arbeitsplanes und den Verpflichtungen gegenüber der Internationalen Erdmessung kommen würde. In der gemeinsamen Schrift der beteiligten Direktoren der Observatorien auf dem Telegraphenberg bei Potsdam drückt es Helmert, 1890 folgendermaßen aus.

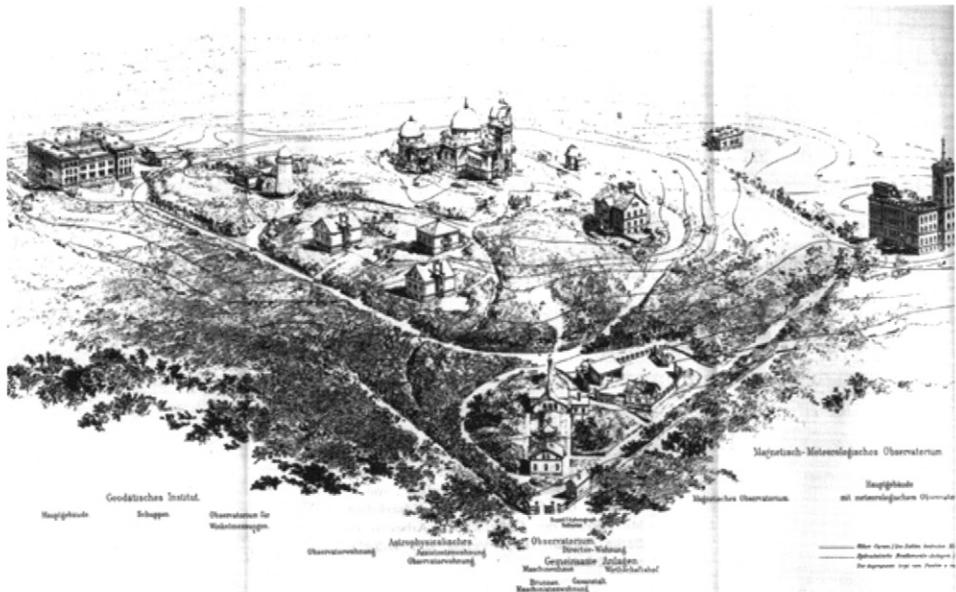
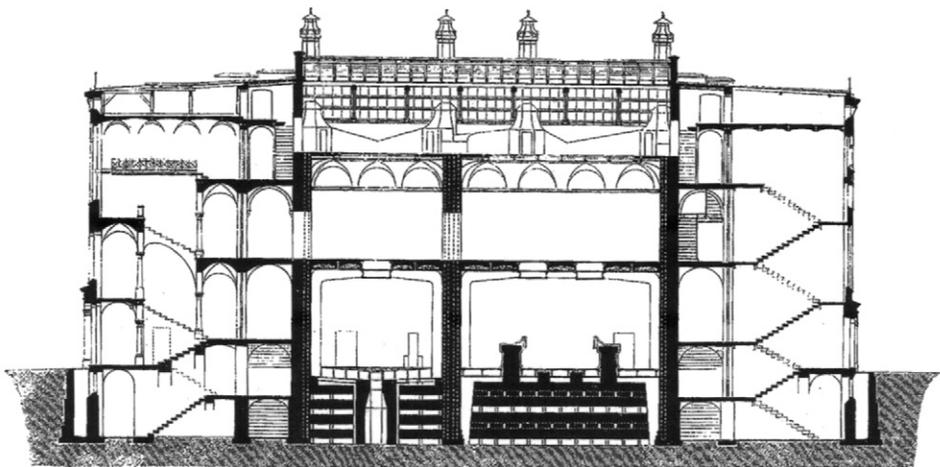


Abb. 4.4: Die Königlichen Observatorien auf dem Telegraphenberg bei Potsdam um 1892

Die eigenartigen Aufgaben des Instituts verlangen als Ort des Dienstgebäudes ein Terrain in rauchfreier Luft mit möglichst weiten Fernsichten, fern von dem den Erdboden weithin erschütternden Lärm des Verkehrs. Wohl schon im Zusammenhang mit seinen Verhandlungen konnte Helmert mit ministerieller Unterstützung erreichen, dass bereits im Frühjahr 1886 auf dem Terrain des Telegraphenberges bei Potsdam, auf dem schon das Astrophysikalische Observatorium seit 1879 seine Tätigkeit aufgenommen hatte und der Bau des Meteorologischen Instituts geplant war, ein Gelände südöstlich des astro-physikalischen Hauptgebäudes für den Bau des geodätischen Institutsgebäudes bereitgestellt wurde. Nach Ausarbeitung der Bauskizzen durch den Architekten des Astrophysikalischen Instituts, Geheimrat P. Spieker wurde im September 1886 eine Gutachterkommission eingerichtet, der so bekannte Persönlichkeiten wie Oberst Schreiber von der Landesaufnahme, die Akademiemitglieder Auwers und Foerster und Helmert selbst angehörten. Ende 1886 wurden die Bauskizzen der Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung und der Preußischen Akademie der Wissenschaften zur Billigung vorgelegt. Nachdem die Bauskizzen dort und im Finanzministerium Zustimmung fanden, wurden Detailpläne zu Bau und Kosten erarbeitet. Schließlich gab in einer im Januar 1888 angesetzten Sitzung der Baukommission auch der damalige Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Geheimrat von Helmholtz (Namensgeber der jetzigen Helmholtz Gemeinschaft deutscher Großforschungszentren), sein positives Votum zum Bauvorhaben ab. Danach wurde dem Bau auf der Märzsession 1888 des Preußischen Landtages zugestimmt und für die Finanzierung in drei Margen ein Gesamtbetrag von etwa

750 000 Mark in den Haushalt eingestellt. Die sich als Folge der schnellen ökonomischen Entwicklung im neu gegründeten Deutschen Reich einsetzende intensive Förderung von Handel, Gewerbe, aber auch von Wissenschaft und Kunst war sicherlich mitbestimmend dafür, dass diese doch grosse Summe für den Bau eines der internationalen geodätischen Forschung gewidmeten Dienstgebäudes bereitgestellt wurde.

Innerhalb von drei Jahren wurde das Geodätische Institut mit Hauptgebäude und benachbarten Observatorien für Winkelmessungen, ausgerüstet mit vielen baulichen und technischen Raffinessen, erbaut und im April 1892 seiner Bestimmung übergeben. Mit dem Bau des im klassizistischen Stil gehaltenen Hauptgebäude und den benachbarten Observatoriumsanlagen hatte Helmert (und sein Baumeister Spieker) für sich, seine Mitarbeiter und späteren Gastwissenschaftler ideale Unterbringungs- und Arbeitsbedingungen geschaffen. Dies betraf einmal die großzügige Anzahl und Größe an Büroräumen in den einzelnen Stockwerken des Gebäudes, gemessen an einem Gesamtpersonalbestand von im Mittel 13 ständigen Wissenschaftlern im Zeitraum 1892-1917, die Abgrenzung einer Direktorenwohnung im 1. Stock, in der Helmert mit seiner Ehefrau und Nichte Marie-Rosalie geb. Helmert (1864-1922) und seinem 1896 geborenen Sohn Robert Helmert (1896-1964) bis zu seinem Tod gelebt hat, zum anderen die weitsichtig und großzügig ausgestatteten Labor- und Messräume, die Archiv- und Beratungsräume, und eine von der Internationalen Erdmessung erbetene Gedenkhalle für berühmte Geodäten.



Ostwestlicher Durchschnitt des Hauptgebäudes.

Abb. 4.5: Ost-West Schnitt des Geodätischen Institutsgebäudes

Entscheidenden Einfluss auf die weiteren Arbeiten des Instituts und des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung hatten die nachfolgenden, nach modernsten Gesichtspunkten der Zeit um 1890 ausgerüsteten Messanlagen (Montag, Reigber, 1996):

- zwei Messräume im Innern des Gebäudes für Untersuchungen an Maßstäben, Basisapparaten und Pendelapparaten, die unabhängig vom Gebäude auf großen Pfeilern gegründet waren und eine Temperatursteuerung durch ein doppeltes Wandsystem und dazwischen liegender Gasheizung möglich machten,

- zwei große Instrumentensäule auf der Nordseite des Gebäudes mit mehreren unabhängig gegründeten Pfeilern für Instrumentenaufstellungen,
- mehrere Pfeiler auf dem Dach, gegründet auf den Überwölbungen der Treppenhäuser,
- ein gesonderter Turm (ab 1917 Helmerturm genannt) von 15 m Höhe mit einer Drehkuppel für präzise Winkel- und Azimutmessungen, aufgebaut als massiver Steinpfeiler mit einer äußeren, unabhängig angebrachten eisernen Ummantelung, die Treppenaufgang, Beobachterplattform und Drehkuppel trägt,
- zwei Meridianhäuschen und ein Häuschen für astronomische Beobachtungen im 1. Vertikal, mit Öffnungsschlitz in E-W-Richtung,
- eine horizontale Nivellementsschleife von 900 m Länge und 10 Pfeilern, die auch mit einer hydrostatischen Messanlage verbunden war, um mögliche Schollenkippen zu studieren,
- ein 26 m tiefer Seitenstollen im 40 m tiefen Brunnenschacht für Horizontalpendelmessungen und
- eine 240 m lange Basislinie mit unterirdischen Zwischenvermarkungen im Abstand von 80 m für Präzisionslängenmessungen.



Abb. 4.6: Großer Instrumentensaal



Abb. 4.7: Observatorium für Winkelmessung, 1894

Mit diesen vielseitigen nach modernsten Gesichtspunkten ausgerüsteten Mess- und Kalibrierungsanlagen, die ab 1901 mit der Aufstellung von Seismographen im neubauten Erdbebenhaus auf der Südseite des geodätischen Hauptgebäudes und der Abmarkung eines 1911 beantragten Schutzringes von 600 m Radius um die wissenschaftlichen Institute auf dem Telegraphenberg wichtige Ergänzungen fanden, nahm das Geodätische Institut eine internationale Spitzenstellung ein. Es wurde nicht nur vielfach besucht und gerühmt, wie das Fremdenbuch und die Jahresberichte des Instituts zeigen, sondern diente auch als Vorbild für den Aufbau ähnlicher Einrichtungen in anderen Ländern.

4.3 Wegbereiter internationaler Zusammenarbeit

Die idealen räumlichen und beobachtungstechnischen Bedingungen auf dem Telegraphenberg, aber insbesondere auch die überragende Autorität Helmerts, beruhend auf seinem herausragenden fachlichen Wissen, seinem richtungsweisenden Forscherdrang und seiner kooperativen Wesensart und das eher kleine Team von hochqualifizierten

Abteilungsvorstehern, Observatoren und wissenschaftlichen Hilfskräften waren es, die das Königlich Preußische Geodätische Institut in Potsdam in der Folge zu einer international führenden Einrichtung der geodätischen Forschung und eine richtungsweisende Zentralstelle für die internationale Zusammenarbeit bei Fragestellungen der Erdmessung und benachbarter geophysikalischer Wissenschaften machte.



Abb. 4.6: Hauptgebäude des Geodätischen Instituts, 1894

Helmert hatte nach Fertigstellung der Einrichtungen in der Zeit von 1891 bis 1906 neun junge Wissenschaftler für die Mitarbeit im Institut eingestellt, wie sich nachträglich gezeigt hat, in sehr guter Einschätzung ihrer späteren Fähigkeiten. Dies belegen die Namen der später selbst sehr bekannt gewordenen Mitarbeiter Kühnen, Schumann, Hecker, Wanach, Furtwängler, Foerster G., Meißner, Flotow und Schweydar. Unter den neuen personellen, technischen und finanziellen Gegebenheiten konnten nun Forschungsprojekte und Beobachtungsprogramme aufgegriffen werden, die bisher aus technischen oder personellen Gründen

nicht bearbeitet werden konnten oder sich erst im Laufe der Arbeiten im Institut bzw. des Zentralinstituts der Internationalen Erdmessung als lohnende Forschungsziele ergaben.

Im Zuge dieser Neuausrichtung kam es zu einer Reihe von Schwerpunktaktivitäten im Institut und im Zentralbüro (Helmert, 1891), von denen drei wegen ihrer nachhaltigen Wirkung bis in die Dienste der heutigen Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) herausgestellt werden sollen. Es waren dies

- das verstärkte Ausrichten auf Schweremessungen zur Aufklärung des Widerspruchs in der Bestimmung der Erdabplattung aus Gradmessungen (1/293) und älteren Schwere-messungen (1/299) und letztlich die Etablierung des Potsdamer Schwerebezugssystems,
- die Verifizierung von erstmals beobachteten Polschwankungen und nachfolgende Ein-richtung des Internationalen Breitendienstes,
- die Ausführung von Pegel-Anschlussnivelements zur Überprüfung der Mittelwasser der Randmeere Europas und rezenter Krustenbewegungen und des isostatischen Ausgleichs.

Es war nur folgerichtig, dass sich Helmert mit so gewonnenen Daten und Ergebnissen verstärkt seinen Forschungen zu geowissenschaftlichen Fragestellungen, wie der Massenkompensation in der Erdkruste oder Elastizitätseigenschaften und Dynamik des Erdkörpers zugewandt hatte.

Anlass für die erwähnte verstärkte Hinwendung zu Schweremessungen war die Tatsache, dass seit 1887 ein vom österreichischen Oberstleutnant Robert von Sterneck (1839-1910) konzipierter relativ handlicher und recht genauer Pendelapparat genutzt werden konnte, mit dem v. Sterneck in den Alpen und Böhmen eine Reihe von Relativmessungen ausgeführt hatte. Helmert unterzog diese Messungen, seinem Arbeitsstil folgend, einer kritischen Überprüfung und eingehenden Interpretation, die auf eine nicht vollständige Kompensation der Gebirgsmassen durch Massendefizite in der Lithosphäre hindeuteten. Ergebnisse dieser Untersuchungen veröffentlichte Helmert in der Schrift Die Schwerkraft im Hochgebirge, insbesondere in den Tiroler Alpen.

1892 war Helmert beteiligt an den Anschlussmessungen des Geodätischen Instituts an

den von Robert v. Sterneck und Theodor v. Oppolzer bestimmten absoluten Schwerewert in Wien. Nach Beschaffung von einigen Pendelgeräten Sterneckscher Art und eines Reversionspendels kam es bei Helmert und im Institut über einen längeren Zeitraum zu eingehenden Untersuchungen von Fehlerquellen und möglichen Konstruktionsänderungen, deren Umsetzung zu einer konkurrenzlosen Genauigkeit der vom Geodätischen Institut ausgeführten Schweremessungen führte. Helmert forcierte die Bestimmung des Absolutwertes der Schwere für Potsdam und lieferte in der 1898 veröffentlichten Schrift Beiträge zur Theorie des Reversionspendels die theoretischen Grundlagen dazu. Der von F. Kühnen und Ph. Furtwängler im Zeitraum bis 1904 im Pendelsaal des Geodätischen Instituts bestimmte Absolutwert der Schwere wurde 1909 auf der Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung in London als absolutes Schwereniveau für ein international zu benutzendes Schwerereferenzsystem vorgeschlagen und angenommen. Das Potsdamer Schweresystem wurde erst 1971 auf der IUGG Generalversammlung in Moskau durch das International Gravity Standardisation Network (IGSN71) ersetzt und findet in einigen Ländern noch heute Verwendung.

Alle vom Geodätischen Institut im Auftrag des Zentralbüros in der Zeit ab 1900 mit geeigneten transportablen Pendelgeräten ausgeführte Relativmessungen auf dem Festland, Inselstationen und auf Seereisen nach Südamerika (O. Hecker), in den indischen Ozean und Pazifik wurden von Helmert für Berechnungen zur Erdfigur und Massenverteilung im Erdkörper, sowie in seiner letzten Arbeit (Helmert, 1915) zur Dreiaxsigkeit der Erdfigur herangezogen.

Auch die Geschichte der Beobachtung der Polbewegung begann während des Direktorats von Helmert. 1888 hatte Küstner im Berliner Observatorium eine Breitenschwankung von $0,20''$ festgestellt, worauf W. Foerster auf der September Konferenz der Permanenten Kommission in Salzburg vorschlug, an vier Stationen mit gleicher geographischer Breite die Polhöhen zu bestimmen. Helmert griff den Vorschlag sofort auf und veranlasste aus Kostengründen erst einmal parallele Beobachtungen einer Jahresreihe 1888/89 an den Observatorien Berlin, Potsdam, Prag und Straßburg. Er berichtete im Oktober 1889 auf der 9. Allgemeinen Konferenz in Paris über erste übereinstimmende Breitenvariationen von mehreren Zehntelbogensekunden auf diesen Stationen. Zur endgültigen Absicherung des Phänomens organisierte Helmert mit Mittelunterstützung der Internationalen Erdmessung eine Expedition nach Honolulu zur Durchführung von Polhöhenmessungen parallel mit Berlin. Auf der Oktoberkonferenz 1891 in Florenz berichtete Helmert vom Beginn der Beobachtungen auf Hawaii, und auf der 10. Allgemeinen Konferenz in Brüssel im September 1892 stellte Helmert die Ergebnisse der obigen vier Observatorien und von Honolulu vor. Damit gab es keinen Zweifel mehr an der Existenz der Polbewegung. Nach Vorbereitung durch eine Spezialkommission und dem Bericht von Helmert und Albrecht zur Vorbereitung eines Internationalen Breitendienstes auf der 12. Allgemeinen Konferenz in Stuttgart, wurden 1899 von den vier Stationen Carloforte (Italien), Mizusawa (Japan), sowie Gaitherburg und Ukiah (USA) und wenig später von Cincinnati (USA) und Bucharä (später verlegt nach Kitab Usbekistan)) systematische Beobachtungen begonnen. An das Zentralbüro in Potsdam wurden allmonatlich die Beobachtungsbücher zur Auswertung geschickt. Von den Autoren Albrecht und Wanach wurden die Auswertungen der Beobachtungen publiziert, das letztmal als Zentralbüro im Jahr 1916.

Der 1. Weltkrieg isolierte das Geodätische Institut von internationaler Forschungstätigkeit. Das Zentralbüro der Internationalen Erdmessung musste 1916 seine Tätigkeit einstellen.

Die Beobachtungen und Auswertungen der zeitlichen Variationen des Erdrotationsvektors gingen aber trotz aller durch die Weltkriegswirren bedingten Einschränkungen im Internationalen Zeit- und Breitendienst der 1920 gegründeten Sektion Geodäsie und späteren Assoziation für Geodäsie der IUGG bis 1987 weiter, im Wesentlichen auf der Basis von visuellen astronomischen Beobachtungen und koordinierter Zeitmessungen, und werden seit 1988 im International Earth Rotation (2003, and Reference Systems) Service IERS unter ausschließlicher Nutzung von modernen Raumverfahren – SLR, LLR, GNSS, Doris und VLBI - , mit höchster Präzision und zeitlicher Auflösung weitergeführt. Nach 85 Jahren ist das Zentralbüro des IERS wieder in Deutschland beheimatet, diesmal beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie BKG in Frankfurt am Main.

In der momentanen Diskussion zum globalen Meeresspiegelanstieg spielen Auswertungen von Pegelstationen, die in der Zeit der Europäischen Gradmessung und Internationalen Erdmessung installiert und betrieben wurden, für die Ermittlung von Langzeittrends noch immer eine wichtige Rolle. Bereits auf der 1. Allgemeinen Konferenz der Mitteleuropäischen Gradmessung war empfohlen worden (Baeyer, 1862)... die mittlere Höhe der verschiedenen Meere in einer möglichst großen Anzahl von Häfen und wo es angeht, mittels registrierender Apparate zu bestimmen. Bayer ließ daraufhin eine selbstregistrierende Pegelstation bauen und 1870 in Swinemünde installieren. Es folgten weitere Mareographen auf Helgoland (1880), und in Wismar und Warnemünde (1884) und Travemünde (1885). Die Wasserstandsreihen dieser Pegelstationen dienten ursprünglich nur zur Bestimmung des Mittelwassers an der Nord- und Ostsee (Seibt, 1885), wurden aber von Helmert, der Zielsetzung des Institutsstatus entsprechend, mehr und mehr zur Analyse verschiedener Störeffekte und auch zu ersten Versuchen zur Ableitung rezenter Niveauverschiebungen zwischen Küste und Meer genutzt. Denn Helmert hatte in den Physikalischen Theorien bereits die fennoskandische Hebung und eustatische Meeresspiegeländerungen angesprochen und sah sehr klar die Bedeutung von Untersuchungen zu rezenten Niveauverschiebungen für die geophysikalisch – geologischen Fragestellungen zum Erdaufbau (Helmert, 1891).

Vorrangiger war aber der von der Permanenten Kommission an das Zentralbüro der Internationalen Erdmessung erteilte Auftrag, die Mittelwasser zwischen Ostsee, Nordsee, Atlantik, Mittelmeer und Adria durch Bearbeitung von alten und neuen Nivellements in Mitteleuropa zu vergleichen. Das Ergebnis der Überarbeitungen von Mareographenaufzeichnungen und Nivellementsanschlüssen zeigte, dass die Mittelwasser der europäischen Randmeere nicht Teile einer einzigen mittleren Niveaufläche sind, sondern Abweichungen von mehreren Dezimetern davon aufwiesen. Wegen bestehender Unsicherheiten bei der Reduktion von Pegelbeobachtungen und möglichen Fehlern bei einzelnen nationalen Nivellements wurde auf die Definition und Festlegung eines europäischen Datums verzichtet. Im Rahmen der Präzisionsnivellements zwischen den Teilnehmerländern der Gradmessung war der Normal- Höhenpunkt Preußens an der Berliner Sternwarte bereits 1880 an den Amsterdamer Pegel angeschlossen worden, und damit der erste Schritt für die Einführung eines einheitlichen Höhensystems in Deutschland getan.

Eine Reihe der von der Internationalen Erdmessung betreuten Pegelstationen ist in den Folgejahrzehnten mit immer weiter verbesserter Sensorik ausgerüstet, und mit Wiederholungsnivellements kontrolliert worden. Die Analyse der Pegelaufzeichnungen ist im internationalen Rahmen seit 1933 Aufgabe des Permanent Service for Mean Sea Level

(PSMSL), heute in enger Zusammenarbeit mit dem GNSS Service, beides Dienste der IAG (Drewes., 2012)

Am 31. Januar 1900 wurde Helmert auf Vorschlag von Herman Carl Vogel, Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums auf dem Telegraphenberg, zum ordentlichen Mitglied der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften ernannt. In seiner Antrittsrede hatte Helmert ein komprimiertes Bild der Entwicklungen in der Geodäsie und ihrer Verbindungen zu benachbarten geowissenschaftlichen Fragestellungen aufgezeigt, und hat in den folgenden Plenar- oder Klassensitzungen der Akademie bis zum Jahr 1915 sehr aktiv mit alljährlichen Vorträgen zu Erkenntnissen aus seinen eigenen Arbeiten und den Arbeiten seiner Mitarbeiter gewirkt. Alle neunzehn Vorträge und die Antrittsrede Helmerts sind in der vom IFAG 1993 herausgegebenen schönen Schrift Friedrich Robert Helmert-Akademievorträge nachzulesen.

Als hochangesehener Universalgeodät, Repräsentant der Internationalen Erdmessung und nun auch ordentliches Mitglied der Physikalisch – Mathematischen Klasse der Preußischen Akademie der Wissenschaft waren Helmersts Ratschläge, Bewertungen und Stellungnahmen zu geowissenschaftlichen und organisatorischen Angelegenheiten bei Vorhaben der Akademie und der Regierung zunehmend gefragt. Helmert erfüllte nicht nur diese Verpflichtungen sehr verantwortungsvoll und gewissenhaft, sondern nutzte auch sein Recht als ordentliches Akademiemitglied, neue Mitglieder vorzuschlagen oder die Vorschläge anderer Akademiemitglieder durch seine Mitunterzeichnung zu unterstützen. So schlug er als neue korrespondierende Mitglieder der Königlich Preußischen Akademie 1907 den englischen Astronomen und Physiker Sir George Howard Darwin, 1909 den ungarischen Physiker Baron Lorand von Eötvös und 1911 den deutschen Geophysiker Emil Wiechert vor, ohne Frage mit dem Ziel, die Vertretung der Geowissenschaften in der Akademie zu verstärken.

Helmert war 1901 Mitglied der deutschen Delegation auf dem 1. Kongress der 1899 gegründeten Internationalen Assoziation der Akademien in Paris und im September des gleichen Jahres Delegierter des Königreiches Preußen während der 1. Internationalen Konferenz der auf Betreiben G. Gerlands 1899 ins Leben gerufenen Internationalen Seismologischen Gesellschaft. In die Konferenz der Gesellschaft am 1. September 1899 in Straßburg, brachte Helmert seine Erfahrungen aus der Internationalen Erdmessung mit einem Beitrag Pflichten der Zentralstelle ein (Kozak, 2001).

Helmert hatte 1907, nach dem Tod des bisherigen Kommissionsleiters Wilhelm von Bezold, die Leitung der internationalen Kommission eines Unternehmens übernommen, das die magnetische Vermessung eines Breitenkreises zum Ziel hatte, um die Gaußsche Theorie des Erdmagnetismus zu überprüfen. Und schließlich war Helmert 1913 Mitglied einer Akademiekommission, die eingesetzt worden war, den umstrittenen Anteil der Akademieteiligung an der Gründung eines Internationalen Instituts für Vulkanismus zu prüfen.

Auch wenn den beiden letzten Unternehmungen zu Lebzeiten Helmersts ein Erfolg nicht beschieden war, so sind doch auch hier bei der späteren Gründung der IUGG Assoziationen für Vulkanologie (IAVCEI), der Assoziation für Geomagnetismus und Aeronomie (IAGA) und in noch stärkerem Maße natürlich bei der Gründung der Assoziation für Seismologie (IASPEI) die Spuren von Helmersts Wirken erkennbar.

Ein letztes Mal war das ordentliche Akademiemitglied Helmert, zusammen mit den ordentlichen Mitgliedern Max Planck und Albert Einstein, 1916 tätig in einer Gutachterkommission, die sich mit der Findung eines geeigneten Kandidaten auf die nach dem Tod von Karl Schwarzschild vakante Direktorenstelle des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam zu beschäftigen hatte.

5. Schlussbemerkungen

Helmert hat in der Zeit seines Wirkens in reichstem Maße ehrenvolle Anerkennungen und Auszeichnungen von der preußischen Regierung, von ausländischen Staaten, Akademien und wissenschaftlichen Vereinigungen erhalten. Neben der bereits erwähnten, im Jahr 1900 erfolgten Zuwahl als ordentliches Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften, waren es sicher die 1902 erfolgte Verleihung der Ehrendoktorwürde zum Dr.-Ing der Technischen Hochschule Aachen, die Verleihung der großen goldenen Medaille für Wissenschaft im Jahre 1912, und seine Zuwahl als korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, der Leopoldina, der Academia die Lincei, der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, der Königlich Niederländischen Akademie der Wissenschaften und der Russischen Akademie der Wissenschaften, die Helmert aufrichtige Genugtuung bereitet haben.

Mit einer außergewöhnlichen intellektuellen, schriftstellerischen und organisatorischen Schaffenskraft hat Helmert in seinem langen, arbeitsreichen und in höchstem Maße erfolgreichen Wirken als Forscher und Lehrender ein Lebenswerk geschaffen, das in den Dezennien um die Wende in das 20. Jahrhundert die theoretischen, wie auch die instrumentellen und beobachtungstechnischen Entwicklungen der Geodäsie dieser Zeit bestimmt oder zumindest intensiv gefördert hat.

Helmert hat mit der Allgemeingültigkeit seiner theoretischen Entwicklungen zur Behandlung der für ihn im Wesentlichen physikalischen Geodäsie und mit seiner klaren Programmatik in Ausrichtung und Ausführung der anstehenden Aufgaben, die erstmalig weltweite, wissenschaftlich begründete, geodätische Zusammenarbeit in Form der Internationalen Erdmessung, und mit ihr das Geodätische Institut Potsdam als Zentralbüro in eine Periode höchster Blüte und weltweiter Anerkennung geführt.

Es muss Helmert zutiefst getroffen haben, dass mit dem heraufziehenden Ausbruch des 1. Weltkrieges die Brücken einer mit großem Engagement aufgebauten internationalen Zusammenarbeit zusammenbrachen und mehr und mehr wissenschaftliche Mitarbeiter und auch sein Sohn zum Kriegsdienst einberufen wurden. Die für 1915 in St. Petersburg geplante Allgemeine Konferenz der Internationalen Erdmessung konnte nicht mehr stattfinden, und das im Jahr 1916 auslaufende Finanzabkommen der an der Internationalen Erdmessung beteiligten Staaten lief ohne Weiterführung aus. Damit war dem Geodätischen Institut offiziell die Leitung des Zentralbüros entzogen und die Internationale Erdmessung hörte auf zu existieren.

Gesundheitlich stark geschwächt, erlitt F.R. Helmert im August 1916 einen Schlaganfall, an dessen Folgen er am 15. Juni 1917 verstarb. Der im In- und Ausland hochverehrte Großmeister der Geodäsie, der Geheime Oberregierungsrat Prof. Dr. Friedrich Robert Helmert, fand seine letzte Ruhestätte auf dem Alten Friedhof in Potsdam.

Der Tod Helmersts und die Auswirkungen der beiden Weltkriege haben seine Wirkungsstätte, das Geodätische Institut Potsdam, und dessen Einbindung in die internationale geodätische

Zusammenarbeit nachhaltig erschüttert. Es dauerte fast fünf Jahre bis Helmersts Nachfolge geregelt war, trotz Mithilfe angesehener Akademiemitglieder wie Einstein, Eötvös und andere Gelehrte in der Findungskommission.

Helmerts weitestgehend zeitloses wissenschaftliches Werk, die Ausgereiftheit seiner Konzeptionen und seine auf die interdisziplinäre Problembearbeitung ausgerichteten Ziele haben die spätere Entwicklung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik und die wissenschaftliche Arbeit der nächsten Generationen von Geodäten nachhaltig beeinflusst. Sie sind noch heute, im Zeitalter der Satellitengeodäsie, Richtschnur und Ansporn bei der Entwicklung neuer Konzepte der globalen geodätischen Zusammenarbeit und der Bearbeitung hochkomplexer Problemstellungen zum dynamischen System Erde, die, wie es Helmert schon sah, nur interdisziplinär bearbeitet werden können.

Helmerts Geist und Name lebt weiter mit seinen Werken, die heute im Nachdruck oder elektronisch einzusehen sind, in Verfahrensbegriffen der physikalischen Geodäsie und Ausgleichsrechnung, auf Schiffen, Gebäuden, Gedenktafeln, Straßenbezeichnungen und Auszeichnungen. Helmersts Konzeptionen, die Strahlkraft seines Namens, und das Erbe der historischen Gebäude auf dem Telegraphenberg, waren mitbestimmend bei der Konzeption zur Gründung der Großforschungseinrichtung GeoForschungsZentrum GFZ Potsdam, und der Einbindung der Geodäsie in den Verbund verschiedenster geowissenschaftlicher Abteilungen des GFZ zur Erforschung des Systems Erde in seinen unterschiedlichsten Facetten. Von dem Ort, der zu Zeiten Helmersts geprägt war von Initiativen zu internationaler Zusammenarbeit, internationalem Wissenschaftlerausaustausch und Führungstätigkeit in internationalen Diensten, gehen heute wieder kraftvolle Initiativen zur Weiterentwicklung der internationalen Zusammenarbeit, multidisziplinären Geoforschung und Förderung des geowissenschaftlichen Nachwuchses aus.

Quellen

- Baeyer, J. J., Zur Entstehungsgeschichte der europäischen Gradmessung, Berlin, 1862
- Berthold, A., Das Lebenswerk des überragenden Meisters der Erdmessung F. R. Helmert, Zeitschrift f. Geophysik, S. 87ff, 1943
- Berthold, A., Beitrag zur Biographie und Genealogie von Friedrich Robert Helmert, ZfV Nr. 7, 1953
- Buschmann, E., F. R. Helmerts Bewerbung bei J.J. Bayer, AVN 10, 1993a
- Buschmann, E., Ein Jahrhundert Geodäsie in Potsdam, AVN 7, 1993b
- Drewes, H., Current Activities of the International Association of Geodesy (IAG) as Successor Organisation of the Mitteleuropäische Gradmessung, ZfV 137, Jg 3, 2012
- Eggert, O., Friedrich Robert Helmert, Nachruf, ZfV, Jg. 46, S. 281ff, 1917
- Harnisch, M. & Harnisch, G., Helmerts Arbeiten zur physikalischen Geodäsie, in: Friedrich Robert Helmert Akademie – Vorträge, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, Nachr. Aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft 109, 1993
- Helmert, F. R. (1880): Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Teil I, Die Mathematischen Theorien der Höheren Geodäsie, Zweite Auflage, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (Nachdruck), 1962
- Helmert, F. R. (1884): Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Teil II, Die Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Zweite Auflage, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (Nachdruck), 1962
- Helmert, F. R. (1993), Friedrich Robert Helmert Akademie – Vorträge Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, Nachr. Aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft 109, 1993
- Helmert, F. R., Übersicht der Arbeiten des Kgl. Geodätischen Instituts unter Generallieutenant z. D. Dr. Baeyer, nebst einem allgemeinen Arbeitsplane des Institutes für das nächste Decennium. Publ. Kgl. Preuß. G. I. Berlin 1886.
- Helmert, F. R., Die Schwerkraft im Hochgebirge, insbesondere in den Tyroler Alpen in geodätischer und geologischer Beziehung, Veröff. Kgl. Preuß. G. I. und Centralbureau der Internat. Erdmessung, Berlin 1890.
- Helmert, F. R. Beiträge zur Theorie des Reversionspendels. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. u. Centralbureau der Internat. Erdmessung. Potsdam 1898.
- Helmert, F. R., Albrecht, Th., Bericht über die Vorbereitungen für den internationalen Polhöhendienst. Verh. der vom 3. bis 12. Oct. 1898 in Stuttgart abgehaltenen 12. Allg. Conf. der Internat. Erdmessung. Berlin 1899.
- Helmert F. R.(1890), Das Königliche Geodätische Institut, in: Die Königlichen Observatorien für Astrophysik, Meteorologie und Geodäsie bei Potsdam. Aus amtlichem Anlass herausgegeben von den beteiligten Directoren. Berlin Mayer & Müller, 1890, Nachdruck ZIPE 1989
- Helmert F. R., Das Königlich Preussische Geodätische Institut und die gegenwärtigen Aufgaben der Erdmessung, Vortrag auf der 17. Hauptversammlung des Deutschen Geometervereins in Berlin am 2. Juni 1891. In: ZfV 20, S. 474ff, 1891
- Helmert, F. R., Pflichten der Centralstelle. Verh. der vom 11. bis 13.4.1901 zu Strassburg abgehaltenen 1. Internat. Seismol. Conf. Leipzig 1902.
- Helmert, F. R., Die Schwerkraft und die Massenverteilung der Erde. Enzyklopädie der math. Wissenschaften in 7 Bänden, Band VI, Geodäsie, Teilband 1/7, Leipzig 1910.
- Helmert, F. R., Neue Formeln für den Verlauf der Schwerkraft im Meeresniveau beim Festlande. Sitzungsber. Kgl. Preuß. Akad. Wiss. zu Berlin 1915.
- Kozak, J., 100-Year Anniversary of the First International Seismological Conference, Studia geoph. et geod. 45, 2001.
- Krüger, L., Friedrich Robert Helmert, Nachruf, Astr. Nachrichten, Bd. 204, Nr. 4894, 1917
- Lerbs, L., Über die Entwicklung des Geodätischen Instituts Potsdam von der Gründung 1870 bis zur Eingliederung in das Zentralinstitut für Physik der Erde 1969. Diss. bei der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Zentralinstitut für Physik der Erde, 1970.

- Löschner, F., Helmert's Entwicklung und Bedeutung als Lehrer der Praktischen Geometrie, in: DGK, Reihe E, Nr. 12, 1970
- Montag, H. & Reigber, Ch., Zur Geschichte der Geodäsie im Berliner Raum, in: Beiträge zum J.J. Baeyer-Symposium, DGK, Reihe E, Heft 25, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1996
- Peschel, H., Gedenkrede zu Helmerts 50. Todestag am 15. Juni 1967 in Freiberg, Vermessungstechnik, 15.Jg., Heft9, 1967
- Pieper, H.: Johann Jacob Bayer, in: Beiträge zum J.J. Baeyer-Symposium, DGK, Reihe E, Heft 25, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1996
- Rummel, R., Erdmessung heute aus der Sicht Helmerts, ZfV 118.Jg., Heft 12, 1993
- Schweydar, W., Friedrich Robert Helmert, Nachruf, Die Naturwissenschaften, Heft 42, S. 646ff, 1917
- Torge W., Geschichte der Geodäsie in Deutschland, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2007
- Wilderotter, H. (Hrsg), Ein Turm für Albert Einstein, L&H Verlag GmbH, Hamburg, ISBN 3-928119-98-2, 2005
- Wolf, H., Die wissenschaftliche Ausstrahlung Helmert's in die Gegenwart, in: DGK, Reihe E, Nr. 12, 1970
- Wolf, H., Friedrich Robert Helmert – sein Leben und Wirken, ZfV 118.Jg., Heft 12, 1993

Dieser Beitrag wurde auch veröffentlicht unter:

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

W. Freeden, R. Rummel (Hrsg.), Handbuch der Geodäsie,

Springer Reference Naturwissenschaften, DOI 10.1007/978-3662-46900-2-90-1

Über die Ausgleichung bei „Überschüssigen Messungen und zufälligen Beobachtungen“

auf den Spuren von Friedrich Robert Helmert

Wolf-Dieter Schuh

Auch 100 Jahre nach dem Tod Helmerts wirken viele seiner Ideen in der Geodäsie aber auch speziell in der Ausgleichungsrechnung weiter, sodass ständig in Vorlesungen und Vorträgen auf seine Erkenntnisse Bezug genommen wird. *Gauß-Helmert Modell*, *Helmertsche Blockzerlegungsverfahren*, *Varianzkomponentenschätzung nach Helmert* sind hier nur einige Begriffe die direkt mit seinem Namen verbunden sind und für jeden Geodäten ein Begriff sind. Aber auch nicht direkt mit seinem Namen verbundene Entdeckungen Helmerts bestimmen die geodätischen Praxis. Umfangreiche Untersuchungen über den Rückschluss auf Beobachtungsunsicherheiten (wahre Fehler) aus den Ergebnissen einer Ausgleichungen wurde von Helmert durchgeführt und prägten viele seiner Veröffentlichungen. Oft nur beiläufige Bemerkungen zu anderen Artikeln beinhalten oft revolutionäre Gedanken. So führt er in der Rubrik der *Kleineren Mitteilungen* in der *Zeitschrift für Mathematik und Physik (Schlömilch)* im Jahre 1875 aus, dass die Quadratsumme der wahren Beobachtungsfehler einer Gamma-Verteilung folgt, wenn die wahren Beobachtungsfehler der Gauß(Normal)-Verteilung gehorchen (Helmert, 1875a). Erst in der oft zitierten Publikation (Helmert, 1876a) erfolgt dann eine ausführlich Darstellung dieser Zusammenhänge und eine Erweiterung auf die Quadratsumme der Verbesserungen nach einem direkten Ausgleich. Eine Erkenntnis, die heute in jedem Globaltest zur Überprüfung der Modellannahmen Anwendung findet.

Beim Studium des Lebenslaufes von Helmert (siehe z.B. Eggert, 1917; Krüger, 1917; Wolf, 1967, 1993) und der sehr umfangreiche Publikationsliste von Helmert (Höpfner, 2013) kann man schon erahnen, dass es sehr schwer ist eine umfassende Würdigung der Arbeiten von Helmert anzustreben. Meine Aufgabe ist es besonders das Wirken Helmerts bezüglich der Ausgleichungsrechnung aufzuzeigen. Aber auch hier kann ich in diesem Rahmen nur punktuell auf bestimmte Themengruppen eingehen und eine entsprechende Einordnung versuchen.

Wenn man die großen Lehrbücher aber auch den Werdegang von Helmert vor Augen hat, ist man geneigt, sein Schaffen in unterschiedliche Perioden und Schwerpunkte zu gliedern. Bei genauerem Studium seiner Publikationen ist aber sehr auffallend, dass er immer wieder neue Schwerpunkte in der Ausgleichungsrechnung gelegt hat. Vielfach aus praktischen Anwendungen getrieben, wurden von ihm ständig die Theorie der Ausgleichungsrechnung weiterentwickelt¹. Bemerkenswert erscheint mir, dass Helmert auch immer der rechnentechnische Umsetzung besonderes Augenmerk widmete. Vielleicht zeigt eine Passage aus seiner Antrittsrede anlässlich der Aufnahme als ordentliches Mitglied in die *Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin* die persönliche Sicht von Helmert zu den Herausforderungen der Ausgleichungsrechnung besonders auf:

„Jedem, der nur ein wenig den Inhalt der Geodäsie kennt, wird die vielfältige Anwendung der Ausgleichungsrechnung und der Theorie der Beobachtungsfehler gerade in diesem Gebiet des Wissens und Könnens auffallen. [...] Dabei zeigt sich,

¹siehe Appendix A

dass selbst rein mathematisch recht einfache Aufgaben der Geodäsie durch die Genauigkeitsfragen, die bei der Anwendung auf Messungsergebnisse hinzutreten, an theoretischem Interesse gewinnen.

[...]

Die grosse Aufgabe der rechnerischen Behandlung [...] ist mit einem ganz strengen Verfahren, das jede einzelne Messung voll ausnutzen will, nicht durchzukommen; ebenso müssen kleine theoretische Ungenauigkeiten zugelassen werden, falls nachgewiesen wird, dass sie das Ergebniss nicht entstellen.

[...]

Wenn nun die rechnerischen Vereinfachungen vielleicht den Nutzeffect der Beobachtungen nicht unerheblich herabdrückt, so steht diesem Nachtheil der Vortheil gegenüber, in absehbarer Zeit umfassende Ergebnisse für die Figur der Erde erzielen zu können.“

(Helmert, 1900, p. 699-700)

Viele dieser Gedanken haben auch heute Aktualität. Die Bedeutung der Genauigkeitsfragen tritt speziell bei der Kombination unterschiedlichster Messungen und Modelle bei integrierten Systemen in den Vordergrund.

In der Zusammenarbeit der Geodäten mit anderen Ingenieur- oder Geowissenschaften werden heute heterogene Datenquellen mit unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung in komplexe Erdsystemmodelle integriert um ein besseres Verständnis für die Prozesse im 'System Erde' zu entwickeln. Ein wesentlicher Aspekt neben den Beobachtungswerten selbst, spielen dabei die Unsicherheitsaussagen in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Varianz/Kovarianzinformationen. Ohne das Vorliegen dieser Informationen ist die Verknüpfung aller Informationen kaum objektivierbar. Die durch die Ausgleichsrechnung im Umgang mit Messunsicherheiten geschulten Geodäten können hier eine zentrale Rolle einnehmen.

Eine Sorge und Herausforderung die Helmert immer wieder - so auch in der oben zitierten Antrittsrede - anspricht, bildet die rechentechnische Umsetzung der Theorie bei praktischen Aufgabenstellungen. Natürlich könnte man meinen, dass diese Aufgabe durch die Möglichkeiten der modernen Rechenanlagen heute nachrangig ist. Die rasante Entwicklung der Rechenanlagen steht aber eine ebenso rasante Entwicklung der Messtechnik gegenüber. Moderne Sensoren liefern extrem viele Messungen innerhalb kürzester Zeit. Dedizierte Satellitenmissionen vermessen das Erdschwerefeld aber auch Oberflächenänderungen sowohl über dem Ozean als auch über Land mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Aus der Satellitenmission GOCE resultieren beispielsweise 400 Millionen Messungen (400.000.000), die eine räumliche Auflösung des Schwerefeldes mit 80 km Gitterabstand erlauben. Somit sind hunderttausend Parameter gleichzeitig zu lösen. Man erkennt, dass bei diesen Größenordnungen auch moderne Hochleistungsrechner bald an ihre Grenzen stoßen. Somit haben die bei Helmert schon sehr ausgeprägten Ansätze zur rechenökonomischen Umsetzung der Aufgabenstellungen auch heute nicht an Bedeutung verloren. Das Helmerzsche Blockzerlegungsverfahren (Helmert, 1907, Kap.8,§6), die Überführung auf dekorrelierte Messungen („äquivalente Beobachtungen“ — wie sie Helmert bezeichnete (Helmert, 1872, §21)) mit anschließender Addition von Normalgleichungen gehören heute zum täglichen Brot um die Berechnungen rationell zu gestalten. Der pragmatische Weg der „Rechnungen zu vereinfachen“ - wie ihn Helmert erwähnt - wird zwar auch heute vielfach gewählt. Allerdings bieten moderne Verfahren der Numerischen Mathema-

tik und des Hochleistungsrechnen enormes Potential auch aufwendige Modelle rechentechnisch streng zu bewältigen.

Da es innerhalb dieses Aufsatzes unmöglich ist, dass umfangreiche Wirken von Helmert in der Ausgleichsrechnung vollständig zu durchleuchten will ich im Folgenden drei Schwerpunkte setzen. Für die Benennung dieser Schwerpunkte wähle ich speziell die Überschriften nach Helmer's Ausgleichsbuch (Helmert, 1872). Zunächst werde ich im ersten Abschnitt eine Übersicht der verschiedenen Formen der Ausgleichsaufgaben nach Helmert geben. Dann werde ich auf gleichwertige und vollständig äquivalente Beobachtungsreihen ein gehen und im Abschnitt 3 dann Maße für die Genauigkeit von Beobachtungsreihen diskutieren. Eine Zusammenfassung steht dann am Ende des Artikels. Ich habe versucht ein möglichst vollständiges Literaturverzeichnis der Arbeiten von Helmert im Bereich der Ausgleichsrechnung und Statistik anzufertigen. Wo speziell auch die Verlinkungen zu im Internet verfügbaren Quellen zu finden sind.

1. Übersicht der verschiedenen Formen der Ausgleichsaufgaben

Viele grundlegenden Überlegungen bezüglich der Ausgleichsrechnung legte Helmert bereits in seinem ersten Buch (Helmert, 1872) nieder, welches im Jahre 1907 wesentlich erweitert und in zweiter Auflage gedruckt wurde (Helmert, 1907). Die dritte Auflagen aus dem Jahre 1924 ist ein Nachdruck der zweiten Auflage mit Berichtigungen und ergänzt um ein Berechnungsbeispiel von (Helmert, 1924). Krüger (1917) führte dazu in einer Anzeige zu Helmer's Tod in den *Astronomischen Nachrichten* folgendes aus: „dieses ... erste größere Werk *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate* ... ist durch seinen strengen Aufbau und die Vielseitigkeiten seiner Anwendung den früheren Schriften über diesen Gegenstand überlegen“. Helmert gibt dabei in §5 eine Klassifikation der verschiedenen Formen der Ausgleichsaufgaben. In der ersten Auflage des Buches (Helmert, 1872) untergliedert er die Verfahren in die Ausgleichung

- I der direkten Beobachtungen,
- II der vermittelnden Beobachtungen,
- III der bedingten Beobachtungen,
- IV der vermittelnden Beobachtungen mit Bedingungsgleichungen und in die
- V Allgemeine Aufgabe.

In der zweiten Auflage des Buches (Helmert, 1907) benennt Helmert den Fall V dann an Stelle von „Allgemeine Aufgabe“ als „Bedingte Beobachtungen mit Unbekannten“. Neben dem an Helmert angelehnte Bezeichnung „Allgemeinfall der Ausgleichsrechnung“ (Meissl, 1976) wird dieses Modell heute in der Literatur oft auch als „Gemischtes Modell“ (Koch, 1997) und in Würdigung der Verdienste von Helmert als „Gauß-Helmert Modell“ (Wolf, 1978) bezeichnet.

Diese von Helmert durchgeführte Strukturierung der Ausgleichsmodelle werden auch heute vielfach verwendet. Neue Namen wie *Total Least Squares* (Golub und van Loan, 1980) oder „*Error-in-Variables Model*“ (Kendall, 1951) sind zwar vielfach in Mode gekommen, aber nach Ansicht des Autors bringen diese Modelle keine über die „Allgemeine Aufgabe“ hinausgehenden Erkenntnisse. Die Unterschied zwischen „Kalman-Filter“ und sequentieller „Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen“ ist ebenfalls nicht einfach zu begründen. Vielfach findet bei diesen Modellen eine bestimmte Spezialisierung statt, die rechenökonomisch

genutzt werden kann. Somit bilden sie oftmals nur einen Sonderfall der allgemeinen Problemstellung. Speziell will ich in diesem Zusammenhang aufzeigen, wie neue Erweiterungen des Gauß-Helmert Modell immer wieder diskutiert werden, die eigentlich in der Formulierung von (Helmert, 1872, §5 bzw. §26) schon enthalten waren.

Helmert (1872, §5) formuliert die *Allgemeine Aufgabe* — hier in Matrizenschreibweise — in folgender Form:

$$B^T(\ell + v) + Ax = b \quad \text{mit} \quad \arg \min_{v,x} (v^T \Sigma^{-1} v) \quad (1)$$

B	...	Bedingungsgleichungen	$B \in \mathbb{R}^{p \times n}$
A	...	Designmatrix	$A \in \mathbb{R}^{p \times m}$
ℓ	...	Beobachtungen	$\ell \in \mathbb{R}^n$
v	...	Verbesserungen	$v \in \mathbb{R}^n$
x	...	Parameter	$v \in \mathbb{R}^m$
b	...	Konstantenvektor	$b \in \mathbb{R}^p$

Helmert stellt folgende Forderung an die Anzahl der Beobachtungen n , der Bedingungen p und der Parameter m

$$n > p - m > 0. \quad (2)$$

In den letzten Jahren wird vielfach die Forderung, dass die Bedingungsmatrix B vollen Spaltenrang haben muss

$$\text{Rang}(B) \stackrel{!}{=} p, \quad (3)$$

zusätzlich vorausgesetzt. Diese Forderung ist bei Helmert nicht vorhanden und bildet somit eine Einschränkung der *Allgemeinen Aufgabe* (Gauß-Helmert Modell). (Wolf, 1968, p. 105) bezeichnet diese Form als „*Quasivermittelnde Ausgleichung*“ und zeigt auch auf, dass die neue Forderung dazu benutzt werden kann, um die Beobachtungen zu transformieren und somit die Berechnung auf einen Vermittelnden Ausgleich mit korrelierten Beobachtungen rückgeführt werden kann (Meissl, 1976). Durch die zusätzliche Forderung (3) wird gewährleistet, dass die Kovarianzmatrix der korrelierten Beobachtungen regulär ist und somit eine eindeutige Inverse existiert.

Die heute oft verwendete Form des „*Gauß-Helmert Modells mit zusätzlichen Restriktion*“² ist somit eigentlich in der Formulierung von Helmert in der „*Allgemeinen Aufgabe*“ schon enthalten und bedürfte somit keines speziellen Augenmerkes.

2. Gleichwertige und vollständig äquivalente Beobachtungsreihen

Spezielles Augenmerk wendete Helmert auf um Beziehungen zwischen den verschiedenen Modellen der Ausgleichsrechnung herbeizuführend. Neben den theoretischen Erkenntnissen sind diese Modellübergänge speziell für die rationelle Berechnung von Bedeutung. Geschickt gelingt es Helmert durch Einführung der „*äquivalenten Beobachtungen*“ diese Übergänge auch

²Restriktionen bedeuten Bedingungen zwischen der Parametern die streng erfüllt sein müssen

rechentchnisch effizient umzusetzen. Vielfach verwendet er anstelle der aus den Normalgleichungen $Nx = n$ festgelegten Parameter x unkorrelierte Ersatzparameter die er als *äquivalenten Beobachtungen* bezeichnet. Er erkennt, dass die durch das Gaußsche Eliminationsverfahren³ auf Stufenform gebrachten Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{12} & n_{22} & n_{23} \\ n_{13} & n_{23} & n_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Gaußsches Eliminationsverfahren}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_{12}}{n_{11}} & \frac{n_{13}}{n_{11}} \\ & 1 & \frac{\bar{n}_{23}}{\bar{n}_{22}} \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n_1}{n_{11}} \\ \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_{22}} \\ \frac{\bar{n}_3}{\bar{n}_{33}} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

den unmittelbar Zugang auf die Ersatzparameter z ermöglicht, die voneinander unabhängig (unkorreliert) sind. Die Gewichte der Ersatzparameter z lassen sich dabei unmittelbar aus der Gaußschen Elimination mit $[n_{11}, \bar{n}_{22}, \bar{n}_{33}]$ ablesen (Helmert, 1872, p. 166).

Diese Erkenntnis ermöglicht ihm, sowohl korrelierte Parameter als auch korrelierte Beobachtungen zu dekorrelieren. Durch die neuen Sensortechnologien sind heutzutage korrelierte Beobachtungsreihen gang und gäbe. Die Dekorrelation von langen Beobachtungsreihen mit tausenden bis hunderttausenden Messungen, aber auch die Echtzeitauswertung von Sensordaten für Navigationszwecke stellen, auch für die heute benutzten Rechenanlagen große Herausforderungen. Effiziente und maßgeschneiderte Dekorrelationsstrategien stehen daher im Zentrum der aktuellen Forschung. Durch die Entwicklung von speziellen Filtertechniken bzw. die Beschreibung der Zeitreihen durch Stochastische Prozesse wird versucht die Komplexität der Berechnungen zu verringern und effiziente aber auch echtzeitfähige Lösungen zu erarbeiten. Hier kommen einem wieder unmittelbar die Worte von Helmer's Antrittsrede in den Sinn

„Hier ist mit einem ganz strengen Verfahren, das jede einzelne Messung voll ausnutzen will, nicht durchzukommen; ebenso müssen kleine theoretische Ungenauigkeiten zugelassen werden, falls nachgewiesen wird, dass sie das Ergebnis nicht entstellen.“

(Helmert, 1900, p. 700)

Ein enger Zusammenhang ist zwischen der Dekorrelation von Beobachtungen und der vollständigen Dekorrelation oder Datenhomogenisierung zu sehen, wo unabhängige Beobachtungen mit gleichen Gewichten (meist Eins) zum Einsatz kommen. Es ist zunächst ein Leichtes Beobachtungsgleichungen für unkorrelierte Messungen mit ungleichen Gewichten so zu modifizieren, dass gleiche Gewichte verwendet werden können. Schon (Helmert, 1872, p. 60) zeigt auf, dass die Multiplikation der gesamten Beobachtungsgleichung mit der Wurzel aus dem Gewicht diese Aufgabe erfüllt und zeichnet damit einen Weg vor, der erst im Jahre 1924 unter dem Namen Cholesky-Verfahren⁴ Eingang in die Standardverfahren der Numerischen Mathematik gefunden hat.

³Verwendete Notation zum Gaußsches Eliminationsverfahren:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_1 \\ n_{12} & n_{22} & n_{23} & n_2 \\ n_{13} & n_{23} & n_{33} & n_3 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|c} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_1 \\ & \bar{n}_{22} & \bar{n}_{23} & \bar{n}_2 \\ & \bar{n}_{23} & \bar{n}_{33} & \bar{n}_3 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|c} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_1 \\ & \bar{n}_{22} & \bar{n}_{23} & \bar{n}_2 \\ & & \bar{n}_{33} & \bar{n}_3 \end{array} \right]$$

⁴Die Entstehungsgeschichte des Cholesky Verfahrens ist speziell auch aus geodätischer Sicht sehr interessant. Commandant André-Luise Cholesky (1875-1918) war Vermessungsoffizier im französischen Militärdienst. Im Jah-

Moderne Messsensoren erlauben eine automatisierte Beobachtung von physikalischen Prozessen mit immer höherer Auflösung. Dies betrifft sowohl die zeitliche Auflösung als auch die zu erreichende Genauigkeit. Da diese Genauigkeitsforderungen zumeist nicht über den gesamten Messbereich erreichbar sind, werden die Sensoren auf die jeweilige Messsituationen optimiert. Begrenzte Messbereiche (Messbänder) im Orts- aber auch im Frequenzbereich werden verwendet um bestmögliche Ergebnisse für die spezielle Aufgabenstellung zu erreichen. Dies führt zu Messsignalen mit hoch-korreliertem Rauschanteil. Ohne eine adäquate Modellierung der Korrelationen in der Auswertung kann die erzielte Genauigkeit im Messbandbereich nicht auf die Modellparameter übertragen werden. In der Modellierung dieser Stochastischen Prozesse spielt die Dekorrelation der Beobachtungsreihen, wie sie Helmert/Cholesky aufzeigt hat, eine zentrale Rolle (Schuh et al., 2014; Schuh, 2016).

3. Maße für die Genauigkeit von Beobachtungsreihen

Die „Genauigkeitsfragen, die bei der Anwendung auf Messungsergebnisse hinzutreten“ (Helmert, 1900, p. 699) weckten bei Helmert immer besonderes Interesse. Schon in seiner Dissertationsschrift (Helmert, 1868a,b) standen Genauigkeitsüberlegungen im Vordergrund um die Vermessung möglichst „rationell“ zu gestalten. Nach den Publikationen zu schließen, hat sich Helmert in den Jahren um 1875 und 1977 - also nach der Herausgabe seines ersten Buches - intensiv mit der Definition und Schätzung von Kenngröße von wahren Beobachtungsfehlern beschäftigt (Helmert, 1875a,b, 1876a,b, 1877b,c,d,a, 1904). Eine ausführliche Darstellung über Helmer's Arbeiten in Bereich der Theorie von Fehlern ist bei Sheynin (1995) zu finden.

Im folgenden Abschnitt will ich kurz versuchen, seine Gedanken dazu aufzunehmen. Dabei verwende ich einerseits die von Helmert gewählte Notation um das Studium der Schriften zu erleichtern. Eine Gegenüberstellung zur aktuellen Notation (in *grau*) soll aber die Einordnung in die heute vielfach verwendete Notation erleichtern, wo streng zwischen Zufallsvariablen, Realisierungen von Zufallsvariablen (Messungen) und wahren Werten unterschieden wird.⁵

3.1. Definitionen von Kenngrößen aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Großen Raum widmet Helmert in seinem Buch (Helmert, 1872) der Diskussion von Messfehlern. Speziell in den einführenden Kapitel §1-§4 des I. Abschnitts, werden sehr präzise folgende

re 1910 verfasste er ein zunächst unpubliziertes, handschriftliches Manuskript mit dem Titel *Sur la résolution numérique des systèmes d'équations linéaires* (Cholesky, 1910), wo er die Grundzüge der Zerlegung eines symmetrischen Systems (Normalgleichungssystem) in zwei gestufte Systeme mit der gleichen (transponierten) Dreiecksmatrix genau darlegte ($N\mathbf{x} = \mathbf{n} \implies \mathbf{R}^T \mathbf{z} = \mathbf{n}$ und $\mathbf{R}\mathbf{x} = \mathbf{z}$). Erst nach seinem Tode wurde sein Verfahren von im *Bulletin géodésique* weltweit erstmals von Benoit (1924) publiziert (Brezinski, 2006; Brezinski und Tournès, 2014).

⁵In dieser modernen Notation wird konsequent zwischen Zufallsgrößen in kalligrafischen Schriftzeichen \mathcal{X} , wahren Werten in griechischen Zeichen ξ und Messungen oder Realisierungen der Zufallsvariablen in lateinischen (italic) Buchstaben x unterschieden. Vektoren, Matrizen und vektorwertige Funktionen werden durch Fettdruck \mathcal{X} , ξ , \mathbf{x} , $\mathbf{E}\{\mathcal{X}\}$ herausgehoben. Die Tilde (Schlange) über den Variablen weist immer auf ausgeglichene (optimal geschätzt) Größen hin. $E\{\mathcal{X}\}$ und $\Sigma\{\mathcal{X}\}$ charakterisieren den Erwartungswert- bzw. Varianzoperator für univariate Zufallsvariable, $\mathbf{E}\{\mathcal{X}\}$ und $\Sigma\{\mathcal{X}\}$ für multivariate Zufallsvariable.

Kenngrößen festgelegt und untersucht:

	Definition(Original)	Definition(modern)
durchschnittlicher Fehler (erstes Moment μ_1)	$\vartheta := [\text{val. abs. } \varepsilon \varphi(\varepsilon)]$	$\vartheta_\varepsilon := \int_{-\infty}^{\infty} x f_\varepsilon(x) dx$
mittlerer Fehler (zweites Moment μ_2)	$\mu^2 := [\varepsilon^2 \varphi(\varepsilon)]$	$\sigma_\varepsilon^2 := \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_\varepsilon(x) dx$
wahrscheinlicher Fehler	$\varrho : [\varphi(\varepsilon)]_{-\varrho}^{+\varrho} = \frac{1}{2}$	$\varrho_\varepsilon : \int_{-\varrho}^{\varrho} f_\varepsilon(x) dx = \frac{1}{2}$

Tabelle 1: Definitionen von Fehlern durch das Fehlergesetz $\phi(\varepsilon)$ der wahren Fehler ε
Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_\varepsilon(x)$.

Hierin bezeichnen ε (ε) die wahren Fehler, die nach einem Fehlergesetz $\varphi(\varepsilon)$ ($f_\varepsilon(x)$) vorliegen. Die eckigen Klammern deuten die Summierung der Größen an. Über die Form des Fehlergesetzes führt Helmert (1872, §2 Abs. III) aus:

„Den Erfahrungen zufolge entspricht das Fehlergesetz dem Gauß-Typ

$$\varphi(\varepsilon) = c e^{-h^2 \varepsilon^2} \qquad f_\varepsilon(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}, \quad (5)$$

worin bezeichnen

- e die Basis der natürlichen Logarithmen,
- h eine von der Genauigkeit der Beobachtungen und der Maasseinheit, in welcher ε ausgedrückt ist, abhängige Constante,
- c die Wahrscheinlichkeit $\varphi(0)$

dem Vorkommen der zufälligen Beobachtungsfehler mit grosser Annäherung“.

Helmert (1872, §2 Abs. III)

Unter der Annahme der Gauß-Verteilung zeigt (Helmert, 1872, §3 Abs. III (19)) auf, dass diese einzelnen Fehlergrößen in einem „constantem verhältnisse“ zueinander stehen,

$$\varrho = 0.67449 \mu \quad \text{und} \quad \mu = 1.25331 \vartheta \quad \varrho_\varepsilon = 0.67449 \sigma_\varepsilon \quad \text{und} \quad \sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \vartheta_\varepsilon = 1.25331 \vartheta_\varepsilon, \quad (6)$$

$$\text{bzw.} \quad \varrho_\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi}{2}} 0.67449 \vartheta_\varepsilon = 0.84553 \vartheta_\varepsilon. \quad (7)$$

Der durchschnittliche und mittleren Fehler stellen damit das erste und zweite Moment der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezüglich der absoluten wahren Beobachtungsfehler dar. Der wahrscheinliche Fehler ist hingegen über den Quantilwert zur Wahrscheinlichkeit 0.25

bzw. 0.75 definiert, wobei eine symmetrische Verteilung bezüglich des Ursprungs vorausgesetzt wird.

Alle drei von Helmert angeführten Kenngrößen für den Fehler habe ihre Bedeutung bis heute nicht verloren, wenn auch für die Varianz σ_ε^2 und somit der mittlere Fehler μ^2 zumeist angesprochen wird. Speziell bei Datensätzen mit auffälligen Daten, die vom Verhalten der restlichen Daten abweichen (Ausreißer, auffallende Daten), wird vielfach die Definition des wahrscheinliche Fehlers ϱ (ϱ_ε) herangezogen, um robust gegenüber großen Fehlern zu sein. Man beachte, dass einzelne große Abweichungen keinen Einfluss auf diese Fehlermaß haben. Im Zusammenhang mit der L1-Norm Ausgleichung (Fuchs, 1982; Schuh, 1985) aber auch der Robusten Parameterschätzung eröffnet die Definition des durchschnittlichen Fehlers ϑ (ϑ_ε) interessante Möglichkeit, da sie ein konsistentes Maß zur Minimierungsforderung darstellt.

3.2. Schätzer für die Kenngrößen aus n wahren Beobachtungsfehlern

Bereits Gauss (1816) hatte Überlegungen angestellt, wie man bei Vorliegen von n wahren Beobachtungsfehler $\varepsilon_i, i = 1, \dots, n$ Schätzer für die angeführten Kenngrößen definiert kann. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Potenzsummen der der absoluten Beobachtungsfehler die folgendermaßen definiert werden,

$$\sigma_m := \frac{1}{n} [|\varepsilon|^m] \qquad \widehat{\mathcal{M}}_m := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^m \quad (8)$$

wobei m die Ordnung des Moments charakterisiert. Aus diesen Potenzsummen lassen sich unmittelbar die Schätzer für den durchschnittlichen Fehler

$$\vartheta = \frac{1}{n} [|\varepsilon|] \qquad \widehat{\mathcal{D}}_\varepsilon := \widehat{\mathcal{M}}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i| \quad (9)$$

und den mittleren Fehler

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{n} [\varepsilon^2]} \qquad \widehat{\mathcal{S}}_\varepsilon := \sqrt{\widehat{\mathcal{M}}_2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (10)$$

angeben. Aus der modernen Schreibweise wird unmittelbar deutlich, dass die Schätzungen $\widehat{\mathcal{D}}_\varepsilon$ und $\widehat{\mathcal{S}}_\varepsilon^2$ wieder Zufallsvariablen sind, die durch ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen oder deren Momente charakterisiert werden können. Diese Schätzung weisen also auch Unsicherheiten oder Fehler auf. Während Gauss (1823) die wahrscheinlichen Fehler der Potenzsummen darstellte, weist (Helmert, 1872, p. 25) die mittleren Fehler der Schätzungen aus. Helmert behandelt dabei drei unterschiedlichen Verteilungen (Annahme I: Gleichverteilung in einem Intervall, Annahme II: Genäherte Gauß-Verteilung, Annahme III: Gauß-Verteilung) und weist den mittleren Fehler des durchschnittlichen Fehlers bei vorliegender Gauß-Verteilung mit

$$\vartheta \left(1 \pm \frac{0.75551}{\sqrt{n}} \right) \qquad \widehat{\mathcal{D}}_\varepsilon \pm \sigma_{\widehat{\mathcal{D}}_\varepsilon} = \widehat{\mathcal{D}}_\varepsilon \pm 0.75551 \frac{\vartheta_\varepsilon}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

(Helmert, 1872, p. 26,(14*)) und den mittleren Fehler des mittleren Fehlers mit

$$\mu \left(1 \pm \frac{0.70711}{\sqrt{n}} \right) \quad \widehat{S}_\varepsilon + \sigma_{\widehat{S}_\varepsilon} = \widehat{S}_\varepsilon \pm 0.70711 \frac{\sigma_\varepsilon}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

(Helmert, 1872, p. 25,(14)) aus.

Im Gegensatz zu den Schätzungen des durchschnittlichen und mittleren Fehler erfolgt die Schätzung des wahrscheinlichen Fehlers durch Abzählen

$$\varrho \quad \text{„durch abzählen“} \quad \widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon = \text{median } |\mathcal{E}_i| \quad (13)$$

(Helmert, 1872, p. 26 Abschn. IV)gegeben ist. Helmert weist darauf hin,

„dass die Bestimmungsweise von ϱ ($\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon$) sehr unsicher ist, bestätigt sich bei genauer Untersuchung (GAUSS, Zeitschr.etc.p.195, ENCKE, Berl. Jahrb.etc.p.295.) Wir werden im Folgenden auf die directe Bestimmung von ϱ verzichten“

(Helmert, 1872, p. 26)

In den von Helmert zitierten Untersuchungen von Gauss (1816, Abschn. 7) und Encke (1832, p. 298)) wird der wahrscheinliche Fehler für die Berechnung von ϱ ($\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon$) angegeben. Umgerechnet mit (6) auf den mittleren Fehler für die Schätzung des wahrscheinlichen Fehlers ϱ ($\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon$) aus n wahren Beobachtungsfehlern ergibt sich

$$\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon + \sigma_{\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon} = \widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon^2 \pm 1.11636 \frac{\varrho_\varepsilon}{\sqrt{n}} . \quad (14)$$

Somit ergibt sich der Schluss, dass von den drei Schätzern (durchschnittlicher Fehler \widehat{D}_ε (9); mittlere Fehler \widehat{S}_ε (10) und wahrscheinlicher Fehler $\widehat{\mathcal{R}}_\varepsilon$ (13)) die Schätzung für den mittleren Fehler die *genaueste* ist. Allerdings weist Helmert (1872, p. 26) darauf hin, dass der „*Unterschied der Genauigkeiten, an sich nicht beträchtlich, und diesem Falle (Anm. großer n) noch weniger ins Gewicht fällt.*“

In einem Kommentar zu diesem Ergebnis geht Helmert dann speziell darauf ein, dass die Angabe der Genauigkeit der Schätzer aber auch von der Verteilung der Schätzgrößen abhängt, die aber weitgehend unklar ist. Im Speziellen führt es aus:

„Wir können hier nicht unerwähnt lassen, dass eine strengere Untersuchung erst feststellen müsste, ob man die Genauigkeit der Berechnung von ϑ und μ nach den mittlern Fehlern [...] beurtheilen darf. Denn die Fehler in S_m befolgen [...] offenbar ein Gesetz, welches von der [...] angenommenen Form des Fehlergesetzes abweicht, [...]. Eine genauere Untersuchung, die nicht sehr einfach ausfällt, würde uns zu weit führen“

(Helmert, 1872, p. 26, Fußnote)

3.3. Verteilung der Schätzer für die Genauigkeit von Beobachtungsreihen

Speziell wegen dieser Anmerkung in der Fußnote wird Helmert von Mees (1875, Heft 2, ausgegeben am 4. März 1875)⁶ kritisiert und damit die Aussage über den Schätzer mit höchster

⁶R.A. Mees (1844-1886) Prof. für Physik an der Universität Groningen

Genauigkeit in Frage gestellt. (Helmert, 1875a, Heft 4, ausgegeben am 30. Juni 1875) antwortet umgehend in der selben Zeitschrift unter der Rubrik „Kleinere Mittheilungen“ auf diesen Angriff. In diesem Kommentar erwähnt Helmert erstmals⁷ die Gamma-Verteilung für die Quadratsumme von n unabhängigen, normalverteilten Beobachtungsfehlern ε ($\mathcal{E} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$).

„Die Wahrscheinlichkeit, dass bei n Fehlern die Summe $[\varepsilon^2]$ zwischen den Grenzen $n(\sigma_2 - \frac{\delta}{2})$ und $n(\sigma_2 + \frac{\delta}{2})$ falle, wo δ sehr klein ist, wird (unter Annahme des Gauss'schen Gesetzes)

$$w = \frac{h^n}{\Gamma(\frac{n}{2})} (n\delta)(n\sigma_2)^{\frac{n}{2}} - 1 e^{-h^2 n \sigma_2} \quad \text{mit} \quad P \left\{ x - \frac{1}{2} dx \leq \mathcal{X} < x + \frac{1}{2} dx \right\} = dF_{\varepsilon} r_{\varepsilon}$$

$$dF_{\varepsilon} r_{\varepsilon} = \frac{1}{\sigma^n 2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}} - 1 e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} dx \quad (15)$$

[...]“

(Helmert, 1875a, Seite 302-303)⁸

(Anm.: Beachte in der originalen Bezeichnung von Helmert bezeichnet σ_2 die Integrationsgröße und nicht die Varianz.)

In diesem Kommentar weist Helmert darauf hin, dass über die genaue Ableitung dieser Zusammenhänge ein ausführliche Arbeit erscheinen wird. In einer weiteren Notiz vom September 1875 äußert Mees dazu:

„Mit Verlangen sehe ich dem angekündigten grösseren Aufsatz entgegen, worin Herr Helmert [...] das Wahrscheinlichkeitsgesetz [...] ableiten wird.“

(Mees, 1876, Helf 2, ausgegeben am 10. März 1876)

In einer umfangreiche Diskussion über die „Wahrscheinlichkeiten der Potenzsummen“ setzt sich (Helmert, 1876b, Heft 3, ausgegeben am 20. Mai 1876) mit den Verteilungsfunktionen der Schätzer der Momente aus einer endlichen Anzahl n von wahren Beobachtungsfehlern ε (\mathcal{E}_i) auseinander. Er stellt fest, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_{\hat{\sigma}_m}$ der Differenz zwischen dem wahren Momente

$$S_m := \int_0^a \varepsilon^m \varphi(\varepsilon) d\varepsilon \quad \mu_m := E \{ |\mathcal{E}|^m \} = \int_0^{e_{max}} |x|^m f_{\varepsilon}(x) dx \quad (16)$$

und der geschätzten Momente

$$\sigma_m = \frac{1}{n} [|\varepsilon|^m] \quad \widehat{\mathcal{M}}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathcal{E}_i|^m \quad (17)$$

für eine große Anzahl n von wahren Beobachtungsfehlern durch

$$\varphi(\sigma_m) = \sqrt{\frac{n}{2\pi(S_{2m} - S_m^2)}} e^{-\frac{n(S_m - \sigma_m)^2}{2(S_{2m} - S_m^2)}} \quad f_{\widehat{\mathcal{M}}_m}(x; n) = \sqrt{\frac{n}{2\pi(\mu_{2m} - \mu_m^2)}} e^{-\frac{n(\mu_m - x)^2}{2(\mu_{2m} - \mu_m^2)}} \quad (18)$$

⁷siehe auch Sheynin (1995, p.89)

⁸siehe auch Helmert (1876b, Seite 203, Formel (25))

angenähert werden kann. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\varphi(\sigma_m)$ ($f_{\mathcal{M}_m}(x; n)$) folgt somit einer Gauß-Verteilung (vgl. Helmert, 1876b, Gl. (34)). Die Varianz der Schätzung kann somit unmittelbar mit

$$\mu_m = \sqrt{\frac{S_{2m} - S_m^2}{n}} \quad \sigma_{\mathcal{M}_m} = \sqrt{\frac{\mu_{2m} - \mu_m^2}{n}} \quad (19)$$

abgelesen werden. Damit können nun die mittleren Fehler (Standardabweichungen) für beliebige Verteilungen abgeleitet werden (siehe Tabelle 2). Andererseits wird damit die Aussage bewiesen, dass der *genaueste Schätzer* derjenige mit kleinstem mittleren Fehler (Standardabweichung) ist.

Verteilung	$\varphi(\varepsilon) = c, \varepsilon^2 \leq \varepsilon_{max}^2$	$\varphi(\varepsilon) = c \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{a^2}\right), \varepsilon^2 \leq \varepsilon_{max}^2$	$\varphi(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2}$
ϑ ($\sigma_{\widehat{D}_\varepsilon}$)	$0.57735 \frac{\vartheta}{\sqrt{n}} \left(\frac{\vartheta\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$	$0.64979 \frac{\vartheta}{\sqrt{n}} \left(\frac{\vartheta\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$	$0.75551 \frac{\vartheta}{\sqrt{n}} \left(\frac{\vartheta\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$
μ ($\sigma_{\widehat{S}_\varepsilon}$)	$0.44721 \frac{\mu}{\sqrt{n}} \left(\frac{\sigma\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$	$0.53452 \frac{\mu}{\sqrt{n}} \left(\frac{\sigma\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$	$0.70711 \frac{\mu}{\sqrt{n}} \left(\frac{\sigma\varepsilon}{\sqrt{n}}\right)$

Tabelle 2: Mittlere Fehler (Streuung $\sigma_{\widehat{D}_\varepsilon}$ bzw. $\sigma_{\widehat{S}_\varepsilon}$) der Schätzer für den durchschnittlichen Fehler ϑ (\widehat{D}_ε) und mittleren Fehler μ (\widehat{S}_ε) bei unterschiedlichen Verteilungen (siehe auch (Helmert, 1872, p.25, (13)))

In der weiteren Folge wendet sich Helmert in der selben Arbeit im §4 der Frage zu, wie speziell für die Schätzung des zweiten Momentes die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berechnet werden kann (Helmert, 1876b, §4). Für $m = 2$, also für die Schätzung des mittleren Fehler μ (\widehat{S}_ε), leitet er über Induktion die Wahrscheinlichkeit her, dass die Quadratsumme der wahren Beobachtungsfehler $[\varepsilon^2]$ zwischen den Grenzen $n(\sigma_2 \pm \frac{\delta_2}{2})$ liegt

$$\begin{aligned} P \left\{ x - \frac{1}{2} dx \leq \mathcal{X} < x + \frac{1}{2} dx \right\} &= dF_{\bar{\varepsilon}^2 \tau_{\bar{\varepsilon}}} \\ &\text{mit} \\ \varphi(\sigma_2)_n \delta_2 &= \frac{h^n}{\Gamma(\frac{n}{2})} (n\sigma_2)^{\frac{n}{2}} - 1 e^{-h^2 n \sigma_2} \delta_2 \\ dF_{\bar{\varepsilon}^2 \tau_{\bar{\varepsilon}}} &= \frac{1}{\sigma^n 2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2} - 1} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} dx. \end{aligned} \quad (20)$$

Dies geschieht unter der Annahme, dass die wahren Beobachtungsfehler normalverteilt sind. Durch Einsetzen von $2h^2 n \sigma_2 = x$ (Homogenisierung der Beobachtungsfehler) erhält man aus diesem Ausdruck die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f^{\mathcal{X}^2}(n)$ bzw. die -verteilungsfunktion $F^{\mathcal{X}^2}(n)$ der χ^2 -Verteilung

$$f^{\mathcal{X}^2}(x; n) = \frac{1}{\Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2} - 1} e^{-\frac{x}{2}} \quad F^{\mathcal{X}^2}(x; n) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{n}{2} - 1} e^{-\frac{t}{2}} dt. \quad (21)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f^{\mathcal{X}^2}(x; n)$ stellt eine spezielle Gamma-Verteilung

$$f_{\Gamma(p,b)} = \frac{b^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-bx} \quad (22)$$

mit den Parametern $p = \frac{r}{2}$ und $b = \frac{1}{2\sigma^2}$ dar. Da die Verteilung $f_{\Gamma}(\frac{r}{2}, \frac{1}{2\sigma^2})$ bei vielen Hypothesentests (z.B. Globaltest) eine zentrale Rolle spielt, wird sie auch χ^2 -Verteilung genannt⁹. Die Definition der χ^2 -Verteilung kann unmittelbar aus Helmerts Herleitung abgelesen werden:

Satz: Die Quadratsumme von r stochastisch unabhängigen und standardnormalverteilten Zufallsvariablen $\mathcal{X}_i, i = 1, \dots, r$ folgt der χ^2 Verteilung mit dem Freiheitsgrad r

$$\mathcal{X}_1^2 + \mathcal{X}_2^2 + \dots + \mathcal{X}_r^2 \sim \chi_r^2. \quad (23)$$

Damit hatte Helmert den von Mees (1876, Helf 2, ausgegeben am 10. März 1876) geforderten Beweis erbracht. Aus der abschließenden Bemerkung von Helmert (1876b) kann man entnehmen, dass dies mit einer gewissen Genugtuung geschah:

„Herr Mees hat [...] auf meine Aeusserung [...] über seinen früheren Aufsatz geantwortet. Dieser Antwort gegenüber genügt es, wiederum auf meine eben erwähnte Aeusserung hinzuweisen und Herrn Mees daran zu erinnern, dass ich selbst in meinem Buche auf eine gewisse Unvollständigkeit eines Beweises aufmerksam mache, mir also die Priorität einer „Warnung“ verbleibt. zu den Mängeln meines Buches rechne ich selbstverständlich die betreffende Stelle nicht — indem ich nämlich aus praktischen Gründen der jüngern Gauss’ Dartstellung der Ausgleichungsrechnung im Wesentlichen folgte, musste ich nothwendig auch deren Lücken in Kauf nehmen, die selbst durch lange Untersuchungen nicht vollständig ausfüllbar sind, aber doch Erwähnung verdienen, und zwar auch in einem Lehrbuche. Gestattet eine nur auf das Gauss’sche Fehlergesetz gebaute Ausgleichungstheorie gerade in dem streitigen Punkte auch eine weit befriedigendere Lösung, so verbleiben doch auch einer solchen Theorie noch Lücken genug, um im Hinblick auf den weit complicirteren mathematischen Apparat und die engeren Grenzen der Giltigkeit derselben nicht der andern Darstellungsweise den Vorzug geben zu können.“

(Helmert, 1876b, p. 218)

4. Schlußwort

In diesem Artikel sind nur wenige Episoden aus dem vielfältigen Schaffen von Helmert herausgegriffen. Dabei wurde versucht „auf den Spuren von Friedrich Robert Helmert“ zu gehen. Das Denken der Zeit, aber auch den Ablauf mancher Entwicklungen, auf Grund der Quellenlage einzufangen. Die Aufnahme von Helmert als ersten Vertreter der Geodäsie in die *Königlich*

⁹ Der Name der χ^2 -Verteilung geht auf eine Arbeit von K. Pearson aus dem Jahre 1900 zurück (Pearson, 1900). Mitte des letzten Jahrhunderts wurde aber auch von Kruskal (1946) der Name „Helmert Verteilung“ (Helmert’s Distribution) vorgeschlagen. Eine starke Befürwortung dieser Namensgebung findet man auch bei Lancaster (1966), der speziell auch die elegante Herleitung von Helmert würdigt und am Ende der Arbeit folgende Empfehlung ausspricht: „We may follow Kruskal (1946) in recommending that “the joint distribution of sample mean and standard deviation for samples of independent random observations, drawn from a normal population, may be called HELMERT’S DISTRIBUTION”“. Eine ausführliche Darstellung dieser Diskussion ist auch bei (Johnson und Kotz, 1970, Kap. 17.3) zu finden.

Preussische Akademie der Wissenschaften im Jahr 1900 dokumentiert sehr gut die herausragende Stellung von Helmert. In einer Zeit, wo Ingenieure um die Anerkennung ihre Leistungen in der Wissenschaft durchaus ringen mussten. So wurde erst mit dem „Allerhöchsten Erlaß“ des Königs von Preußen Wilhelm II vom 10. Oktober 1899 das Promotionsrecht an drei Technischen Hochschulen Preußens, Berlin-Charlottenburg, Hannover und Aachen zum *Doctor-Ingenieur* ermöglicht¹⁰(Weiß, 2013). Die Leistungen Helmerts zur Aufnahme in die Akademie müssen daher in der Wissenschaft weithin sichtbar gewesen sein und haben sicher zu folgender Äußerung von Felix Klein, dem berühmten Mathematik Professor des Gauß-Lehrstuhls aus Göttingen, beigetragen:

„Die *Geodäsie* ist derjenige Teil der Geometrie, in welchem die Idee der Approximationsmathematik ihre klarste und konsequenteste Durchbildung gefunden hat. Man untersucht bei ihr unausgesetzt einerseits die Genauigkeit der Beobachtungen und andererseits die Genauigkeit der Resultate, die aus den Beobachtungen folgen.“

(Klein, 1928, p.158)

Appendix:

A Zusammenstellung von Helmert Verfahren

In diesem Abschnitt soll kurz versucht werden eine Zusammenstellung von Verfahren aufzulisten, die in der Ausgleichsrechnung mit dem Namen von Helmert verknüpft sind. Diese Zusammenstellung kann naturgemäß nicht vollständig sein.

Verfahren/Methode	Zitat
Gauß-Helmert Modell	Helmert (1872, §5 u. §26)
äquivalente Beobachtungen nach Helmert	Helmert (1872, §21)
Helmert-Verteilung (χ^2 -Verteilung)	Helmert (1875a, 1876b)
Varianzkomponentenschätzung nach Helmert	Helmert (1877c,d)
Zeitreihenanalyse nach Helmert	Helmert (1905)
Helmertscher Punktlagefehler	Helmert (1907, Kap. 8,§3)
Helmertsche Fehlerellipse	Helmert (1907, Kap. 4,§7)
Helmertsche Blockzerlegung	Helmert (1907, Kap. 8,§6)
Bestimmung latenter Parameter nach Helmert	Helmert (1911)

Literaturverzeichnis

Allmer, F. (1993): Das Erste Technische Doktorat in Der Österreichischen k.u.k. Monarchie. *Der Wirtschaftsingenieur*, 25(4):18–21. URL <http://diglib.tugraz.at/download.php?id=4e9d5d76e5654&location=browse>. 13

¹⁰In der K.K. Österreichisch-Ungarischen Monarchie wurde die Promotion zum *Doctor der technischen Wissenschaften* mit dem Reichsgesetz Nr. 38 vom 13. April 1901 erlassen. Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass die erste vorgenommene Promotion in der gesamten K.K. Österreichisch-Ungarischen Monarchie zum Doctor der technischen Wissenschaften an den Geodäten Hans Löschner am 14. November 1901 an der Technischen Hochschule in Graz erfolgte (Allmer, 1993).

- Benoit (1924): Note Sur Une Méthode de Résolution des équations Normales Provenant de L'Application de la Méthode des Moindres Carrés a un Système D'équations Linéaires en Nombre Inférieur a Celui des Inconnues. — Application de la Méthode a la Résolution D'un Système Défini D'équations Linéaires. *Bulletin géodésique*, 2(1):67–77. ISSN 0007-4632. doi:10.1007/BF03031308. 6
- Brezinski, C. (2006): The life and work of André Cholesky. URL <http://math.univ-lille1.fr/~brezinsk/choleNUMA.pdf>. 6
- Brezinski, C., D. Tournès (2014): *André-Louis Cholesky - Mathematician, Topographer and Army Officer*. Birkhäuser, Springer International Publishing. ISBN-13: 9783319081342. 6
- Cholesky, A.-L. (1910): Sur la résolution numérique des systèmes d'équations linéaires. (*Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique, reprint: Bulletin de la Sabix [En ligne]*, 39, p 81–95 — 2005). URL <http://sabix.revues.org/529>. 6
- Eggert, O. (1917): Friedrich Robert Helmert †. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 46:281–295. 1
- Encke, J. (1832): Methode der kleinsten Quadrate. *Berliner Astronomisches Jahrbuch 1834*, 59:249–312. URL <http://www.mdz-nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:bvb:12-bsb10538363-1>. 9
- Fuchs, H. (1982): *Adjustment by minimizing the sum of absolute residuals*. Reihe B, 258. Deutsche Geodätische Kommission, München. Proceedings of the "6th International Symposium on Geodetic Network and Computations" (Aug.31 - Sept.5, 1981). 8
- Gauss, C. F. (1816): Bestimmung der Genauigkeit der Beobachtungen. *Zeitschrift für Astronomie und verwandte Wissenschaften*, I:185ff. Nachdruck: Gauss, C. F. (1887): Abhandlung zur Methode der kleinsten Quadrate. Druck und Verlag von P.Stankiewicz' Buchdruckerrei, S. 129–138. 8, 9
- Gauss, C. F. (1823): *Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxia*. Göttingen apud Henricum Dieterich. doi:10.3931/e-rara-2857. 8
- Golub, G., C. F. van Loan (1980): An Analysis of the Total Least Squares Problem. *Siam J. Numer. Anal.*, 17, No. 6:883–893. 3
- Helmert, F. R. (1868a): Studien über rationelle Vermessung im Gebiete der höheren Geodäsie. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 13(2):73–120. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0013|LOG_0009. 6
- Helmert, F. R. (1868b): Studien über rationelle Vermessung im Gebiete der höheren Geodäsie - 2. Teil. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 13(3):163–186. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0013|LOG_0012. 6
- Helmert, F. R. (1872): *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Anwendungen auf die Geodäsie und die Theorie der Messinstrumente*. B. G. Teubner. URL <https://books.google.de/books?id=DzBLAAAAMAAJ&printsec=frontcover>. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13
- Helmert, F. R. (1875a): Ueber die Berechnung des wahrscheinlichen Fehlers aus einer endlichen Zahl wahrer Beobachtungsfehler. *Zeitschrift für Mathematik und Physik (Schlömilch)*, XX(4):300–303. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0020|LOG_0033. 1, 6, 10, 13
- Helmert, F. R. (1875b): Ueber die Formeln für den Durchschnittsfehler. *Astronomische Nachrichten*, 85(22-23):353–366. ISSN 1521-3994. doi:10.1002/asna.18750852203. 6
- Helmert, F. R. (1876a): Die Genauigkeit der Formel von Peters zur Berechnung des wahrscheinlichen Beobachtungsfehlers directer Beobachtungen gleicher Genauigkeit. *Astronomische Nachrichten*, 88(8-9):113–131. ISSN 1521-3994. doi:10.1002/asna.18760880802. 1, 6
- Helmert, F. R. (1876b): Ueber die Wahrscheinlichkeit der Potenzsummen der Beobachtungsfehler und über einige damit in Zusammenhange stehend Fragen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, XXI(3):192–218. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0021|LOG_0024. 6, 10, 11, 12, 13
- Helmert, F. R. (1877a): Die Bestimmung des Fehlergesetzes aus Beobachtungen auf graphischem Weg. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 6:22–26. 6
- Helmert, F. R. (1877b): Über den Maximalfehler einer Beobachtung. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 6:131–147. 6
- Helmert, F. R. (1877c): Zur Bestimmung des Gewichts von Beobachtungen deren mittleres Fehlerquadrat sich aus mehreren Theilen zusammensetzt (Teil 1 von 2). *Astronomische Nachrichten*, 89(2127):241–246. URL http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-tarticle_query?1877AN.....89..225H&defaultprint=YES&filetype=.pdf. 6, 13
- Helmert, F. R. (1877d): Zur Bestimmung des Gewichts von Beobachtungen deren mittleres Fehlerquadrat sich aus mehreren Theilen zusammensetzt (Teil 2 von 2). *Astronomische Nachrichten*, 89(2128):241–

246. URL http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1877AN....89..241H&defaultprint=YES&filetype=.pdf. 6, 13
- Helmert, F. R. (1900): Antrittsrede des Hrn. Helmert. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, XXXII, S. 698–704. URL <https://ia601401.us.archive.org/7/items/sitzungsberichte1900deut/sitzungsberichte1900deut.pdf>. Öffentliche Sitzung zur Feier des LEIBNIZischen Jahrestages, 28. Juni 1900. 2, 5, 6
- Helmert, F. R. (1904): Zur Ableitung der Formel von C.F.GAUSS für den mittleren Beobachtungsfehler und ihrer Genauigkeit. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Sitzung der physikalisch-mathematischen Classe vom 9. Juni 1904*, XXX, S. 950–964. URL <https://ia802704.us.archive.org/31/items/sitzungsberichte1904deutsch/sitzungsberichte1904deutsch.pdf>. 6
- Helmert, F. R. (1905): Über die Genauigkeit der Kriterien des Zufalls bei Beobachtungsreihen. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Sitzung der physikalisch-mathematischen Classe vom 25. Mai 1905*, XXVIII, S. 594–612. URL <https://ia800306.us.archive.org/18/items/sitzungsberichte1905deutsch/sitzungsberichte1905deutsch.pdf>. 13
- Helmert, F. R. (1907): *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Anwendungen auf die Geodäsie und die Theorie der Messinstrumente*. B. G. Teubner. URL <http://books.google.de/books?id=ibsJAAAMA AJ>. Zweite Auflage. 2, 3, 13
- Helmert, F. R. (1911): Über die Genauigkeit der Dimensionen des HAYFORDSchen Erdellipsoids. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Sitzung der physikalisch-mathematischen Classe vom 12. Januar 1911*, II, S. 950–964. URL <https://ia802608.us.archive.org/25/items/sitzungsberichte1911deut/sitzungsberichte1911deut.pdf>. 13
- Helmert, F. R. (1924): *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Anwendungen auf die Geodäsie und die Theorie der Messinstrumente*. B. G. Teubner. Dritte Auflage. 3
- Höpfner, J. (2013): Bibliographie Friedrich Robert Helmert. Technischer Report, Telegraphenberg Potsdam. URL <http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:117035/component/escidoc:117034/JHHelmertBibliographie.pdf>. 1
- Johnson, N., S. Kotz (1970): *Distributions in Statistics: Continuous Univariate Distributions-1*, Band 1. Houghton Mifflin Company, Boston. 12
- Kendall, M. G. (1951): Regression, Structure and Functional Relationship. Part I. *Biometrika*, 38(1/2):11–25. ISSN 0006-3444. doi:10.2307/2332313. 3
- Klein, F. (1928): *Elementarmathematik vom Höheren Standpunkt aus III*. Springer, Berlin. 13
- Koch, K. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn. URL http://www.igg.uni-bonn.de/tg/fileadmin/publication/media/buch97_format_neu.pdf. 3
- Krüger, L. (1917): Anzeige des Todes von Friedrich Robert Helmert. *Astronomische Nachrichten*, 7:397–398. doi:10.1002/asna.19172042104. 1, 3
- Kruskal, W. (1946): Helmert's Distribution. *The American Mathematical Monthly*, 53(8):435–438. ISSN 00029890, 19300972. URL <http://www.jstor.org/stable/2306241>. 12
- Lancaster, H. O. (1966): Forerunners of the Pearson χ^2 . *Australian Journal of Statistics*, 8(3):117–126. ISSN 1467-842X. doi:10.1111/j.1467-842X.1966.tb00262.x. 12
- Mees, R. (1875): Ueber die Berechnung des wahrscheinlichen Fehlers einer endlichen Zahl von Beobachtungen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, XX(2):145–152. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0020|LOG_0019. 9
- Mees, R. (1876): Ueber die Berechnung des wahrscheinlichen Fehlers einer endlichen Zahl von Beobachtungen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, XXI(2):126–128. URL http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN599415665_0021|LOG_0018. 10, 12
- Meissl, P. (1976): Skriptum aus Ausgleichsrechnung II. Technischer Report, Institut für Mathematische und Numerische Geodäsie, Technische Universität Graz. 3, 4
- Pearson, K. F. (1900): On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series 5*, 50(302):157–175. doi:10.1080/14786440009463897. 12
- Schuh, W.-D. (1985): Transforming the L1-norm adjustment of a levelling network into a flow problem. *Proceedings of the "7th International Symposium on Geodetic Computations"*, S. 385–409. Cracow, Poland (June 18–21, 1985). BibTeX, PDF. 8
- Schuh, W.-D. (2016): Signalverarbeitung in der Physikalischen Geodäsie. Freeden, W., R. Rummel, (Hrsg.),

-
- Handbuch der Geodäsie*, Band Erdmessung und Satellitengeodäsie. MeteorSystem. Springer. URL http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-46900-2_15-1. BibTeX, PDF. 6
- Schuh, W.-D., I. Krasbuter, B. Kargoll (2014): Korrelierte Messung - was nun? Neuner, H., (Hrsg.), *Zeitabhängige Messgrößen - Ihre Daten haben (Mehr-)Wert*, Band 74 DVW-Schriftenreihe, S. 85 – 101. Wißner, Augsburg. BibTeX, PDF. 6
- Sheynin, O. (1995): Helmert's Work in the Theory of Errors. *Archive for History of Exact Sciences*, 49(1):73–104. ISSN 00039519, 14320657. doi:10.1007/BF00374700. 6, 10
- Weiß, E. (2013): 200 Jahre Entwicklungen zur heutigen Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. *ALMA MATER Beiträge zur Geschichte der Universität Bonn*, Band 107. 13
- Wolf, H. (1967): F. R. Helmert und die moderne Geodäsie. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 92(7):237–240. 1
- Wolf, H. (1968): *Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 4
- Wolf, H. (1978): Das geodätische Gauß-Helmert Modell und seine Eigenschaften. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 103(10):41–43. 3
- Wolf, H. (1993): Friedrich Robert Helmert - Sein Leben und Wirken. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 118(12):582–590. 1

Die Figur der Erde – zu Zeiten Friedrich Robert Helmerts und heute

Von der Kugelgestalt der Erde zum dynamischen Erdsystem-Modell

Karl Heinz Ilk

1 Die Figur der Erde und die Rolle Friedrich Robert Helmerts

Man kann mit Sicherheit annehmen, dass sich der Mensch der Frühzeit zumindest eine mystische Vorstellung von unserer Welt gemacht hat. Auch wenn manche dieser Vorstellungen uns heute amüsant vorkommen, so deuten diese Erklärungsversuche doch auf das Bemühen der Menschen hin, sich eine Vorstellung von unserer Welt zu machen. Die ersten verbürgten naturwissenschaftlich begründeten Vorstellungen von der Figur der Erde stammen allerdings aus der Antike. Basierend auf verschiedenen Beobachtungen ging man dabei von einer gekrümmten Erdoberfläche aus. Aus philosophischen Gründen musste wegen der Annahme der mathematischen Vollkommenheit der Welt die Erde eine einfache geometrische Form haben, also beispielsweise die Gestalt einer Scheibe oder einer Kugel. Bis zum 17. Jahrhundert wurde an dieser Vorstellung kaum gerüttelt.

Dies änderte sich, beginnend mit der kopernikanischen Wende und der sich anschließenden rasanten Entwicklung der Naturwissenschaften, die vor allem mit den Namen Kepler, Galilei, Newton und Huygens verbunden ist. Diese Entwicklung hatte auch unmittelbare Konsequenzen für eine präzisere Vorstellung von der Figur der Erde. Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts beschäftigte man sich vor allem mit der geometrischen Gestalt der Erde. Man erkannte aber auch, dass neben der Erkenntnis, die Erde als geometrischen Körper, beispielsweise als Rotationsellipsoid zu verstehen, die Bestimmung der Figur der Erde auch ein physikalisches bzw. dynamisches Problem ist. Die größten Mathematiker und Physiker der vergangenen Epochen waren an diesem Erkenntnisprozess beteiligt. In den darauf folgenden Jahrzehnten ist das Bild von der Erdfigur immer klarer geworden, als man begann, die Umwelt nach naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten zu analysieren. Erst seit Kurzem haben wir begonnen, die Erde in seiner Vielfalt zu analysieren und zu erkennen, dass die geometrisch-physikalische Erdfigur nur ein Aspekt eines immer noch rätselhaften zeitveränderlichen dynamischen Erdsystems ist.

Gerade das 19. Jahrhundert hat bedeutende Fortschritte auf diesem Gebiet gebracht und die grundlegenden Voraussetzungen für unser heutiges Wissen geschaffen. Friedrich Robert Helmert war einer der Pioniere dieser Entwicklung und sicher einer der größten Geodäten des 19. Jahrhunderts. Helmert hat mit seinem Werk für das Wissensgebäude seiner Zeit eine große Synthese der Fundamentaltheorie der Geodäsie vorgelegt und man kann ohne Übertreibung sagen, dass er einer der Geburtshelfer der Entwicklung der Geodäsie zu einer naturwissenschaftlichen Disziplin ist. Auch wenn sich seitdem eine schwindelerregende Entwicklung in unserem Erkenntnisprozess abgespielt hat, so sind die zahlreichen auch heute noch gültigen wissenschaftlichen und praktischen Nachwirkungen Friedrich Robert Helmerts klar erkennbar.

Im Folgenden will ich einen Überblick über das Problem der Erdfigur-Bestimmung und die Definition der Figur der Erde geben. Um den wissenschaftlichen Stand der Erkenntnisse zu schildern, als Friedrich Robert Helmert (1843-1917) die Bühne der geodätischen Forschung betrat, ist es notwendig, den Erkenntnisfortschritte über die Jahrhunderte hinweg bis zu diesem Zeitpunkt zu skizzieren. Detaillierter will ich auf die Entwicklungen im 19. Jahrhundert eingehen und zeigen, dass um die Jahrhundertwende vom 19. ins 20. Jahrhundert die Geodäsie bereits einen erstaunlichen Entwicklungsstand erreicht hat, vor allem auf dem Ge-

biet der Theorie aber auch in anwendungsorientierter Hinsicht. Schließlich will ich die rasante Entwicklung der Geodäsie im 20. und 21. Jahrhundert in groben Zügen schildern.

2 Die Figur der Erde im Altertum und im Mittelalter

Als sich erste naturwissenschaftlich geprägte Überlegungen seit der Mitte des ersten vorchristlichen Jahrtausends durchsetzten, deuteten viele Beobachtungen auf die Kugelgestalt der Erde hin. Dies veranlasste wohl auch Eratosthenes (276 - 194) im dritten Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung, den Erdradius in Ägypten mit der sog. geometrischen Methode zu bestimmen. Sie besteht aus der Messung eines Meridianbogens sowie den Messungen der Pol-distanzen an den beiden Endpunkten (Alexandria und Syene bzw. heutzutage Assuan). Damit kann der Zentriwinkel des kreisförmig angenommenen Meridians bestimmt werden und daraus der Erdradius (Abb. 2.1):

$$R = \frac{m}{\text{arc}(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

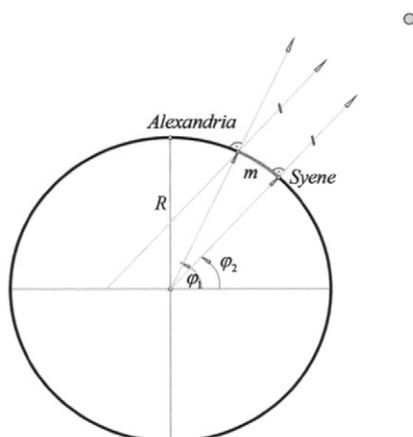


Abb. 2.1: Die Bestimmung des Erdradius nach Eratosthenes

Bereits früher vermuteten griechische Naturphilosophen, wie zum Beispiel Aristoteles (384-322), dass die Erde eine Kugel sei. Eine Verfeinerung dieser Vorstellung und die Entwicklung der Geodäsie zu einer Naturwissenschaft haben viele Jahrhunderte in Anspruch genommen.

3 Die Figur der Erde in der Zeit bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts

3.1 Eine neue Zeit bricht an: die Kopernikanische Wende

Die rein geometrischen Vorstellungen von der Figur der Erde mussten mit der Entwicklung der Physik im Lauf der letzten Jahrhunderte durch physikalische Vorstellungen ergänzt werden. Diese neuartige naturwissenschaftliche Betrachtung unserer Welt begann im 16. und 17. Jahrhundert und löste die auf Tradition und mystischen Vorstellungen beruhende Betrachtungsweise des Mittelalters ab. Diese Wende ist insbesondere mit den Namen Nikolaus Kopernikus (1473-1543), Galileo Galilei (1564-1642) und Johannes Kepler (1571-1630) und später, mit Isaac Newton (1642-1726) und Christiaan Huygens (1629-1695) verbunden (Perrier, 1950). Im Jahre 1543 hat Kopernikus die bisher übliche umständliche Beschreibung der Planetenbewegung revolutioniert. Im Jahre 1602 erforschte Galilei die Gesetze des freien Falles der Körper und des einfachen Pendels und legte damit den Grundstein für eine moderne

Mechanik. Im Jahre 1609 formulierte Kepler seine berühmten drei Gesetze der Planetenbewegung. Damit waren auch die Grundlagen für die Entstehung einer auf naturwissenschaftlichen Gesetzen beruhenden Geodäsie geschaffen.

3.2 Die physikalische Methode zur Bestimmung der Erdfigur

Basierend auf der von Jean Richer (1630-1696) im Jahre 1672 im Rahmen einer astronomischen Expedition nach Cayenne festgestellten Abhängigkeit eines Sekundenpendels von der geographischen Breite vermuteten Isaac Newton (1642-1726) und Christiaan Huygens (1629-1695), dass die Verminderung der Schwere bei abnehmender Breite eine notwendige Konsequenz der Figur und der Rotation der Erde sein müsse. Im Jahre 1687 publizierte Newton das Prinzip der allgemeinen Anziehung zweier Masseteilchen und seine berühmte axiomatische Formulierung der theoretischen Mechanik. Er erkannte sehr schnell, dass die Schwerkraft ein wesentliches Element der Figur der Erde darstellt. Er kam zu dem Ergebnis, dass die Erde ein abgeplattetes Rotationsellipsoid sein müsse und die Schwerkraft (als Summe von Gravitations- und Zentrifugalkraft) vom Äquator aus zu den Polen proportional dem Quadrat des Sinus der Breite anwachsen müsse. Huygens vertrat im Jahre 1690 die Ansicht, dass die Schwerkraft normal zur Oberfläche der Erde stehen müsse und gelangt zu einem rotationssymmetrischen Körper, der sich nicht merklich von einem Rotationsellipsoid unterscheidet.

Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) bzw. Colin MacLaurin (1698-1746) konnten die Annahmen von Newton im Falle einer homogenen Massenverteilung in den Jahren 1737 bzw. 1740 beweisen. Clairaut formulierte im Jahre 1743 einen Zusammenhang zwischen der geometrischen und der physikalischen Abplattung der Erde für ein vereinfachtes Erdmodell. Dieser Zusammenhang ist unter der Bezeichnung Theorem von Clairaut bekannt (Abb. 3.1):

$$\frac{a-b}{a} + \frac{\gamma_b - \gamma_a}{\gamma_a} \approx \frac{5}{2} \frac{\omega^2 a}{\gamma_a},$$

mit der geometrischen Abplattung $\frac{a-b}{a}$ und der Schwereabplattung $\frac{\gamma_b - \gamma_a}{\gamma_a}$ sowie der Winkelgeschwindigkeit ω . Beachtet man, dass die Schwingungsdauer eines Pendels von der Schwerkraft (und der Pendellänge) abhängt, dann konnte man auf diese Weise die geometrische Abplattung der Erde berechnen.

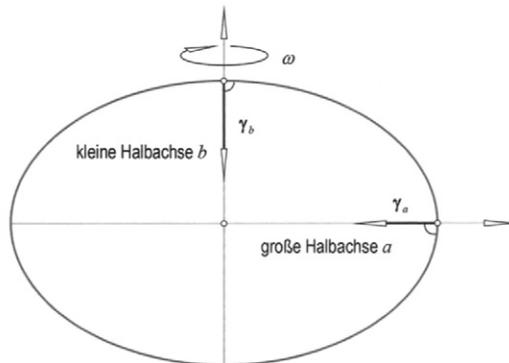


Abb. 3.1: Das Theorem von Clairaut

Neben Clairaut stellten andere Wissenschaftler theoretische Überlegungen zur Bestimmung der Erdfigur an. In den Jahren 1754 und 1756 verallgemeinerte Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783) die Studien Clairauts und MacLaurins, wobei er sich nicht auf ein Rotationsellipsoid beschränkte sondern die Anziehung eines geschichteten Sphäroids betrachtete.

Im 19. Jahrhundert führte die mathematische Behandlung des Zusammenhangs zwischen Massenanziehung und Gleichgewichtsfiguren zur Entwicklung der Potentialtheorie. Diese Thematik wurde bereits von Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) behandelt, der Begriff aber erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Carl Friedrich Gauß (1777-1855) und George Green (1793-1841) eingeführt, die hierzu wichtige Beiträge lieferten. Die Potentialtheorie wird in der Folge ein wichtiger Bestandteil der physikalischen Geodäsie (Bialas, 1996).

3.3 Die geometrische Methode zur Bestimmung der Erdfigur

Neben dieser von Clairaut erstmals angewendeten sog. *dynamischen Methode* der Bestimmung der geometrischen Abplattung der Erde wurde aber insbesondere die *geometrische Methode* im 17. und 18. Jahrhundert erfolgreich eingesetzt. Durch die Einführung des Triangulationsverfahrens im Jahre 1615 durch Snellius (Willebrord van Roijen Snell (1580–1626)) erlebte diese Methode einen rasanten Aufschwung. Das Triangulationsverfahren besteht darin, dass eine Dreieckskette angelegt wird und durch präzise Messungen einer Basislinie und den Horizontalwinkeln zwischen den Dreiecken die sphäroidische Distanz zwischen den auf einem Meridian liegenden Endpunkten mit Hilfe trigonometrischer Berechnungen abgeleitet wird. An den Endpunkten waren durch astronomische Messungen die Breiten zu bestimmen und das Azimut mindestens einer Dreiecksseite (Abb. 3.2).

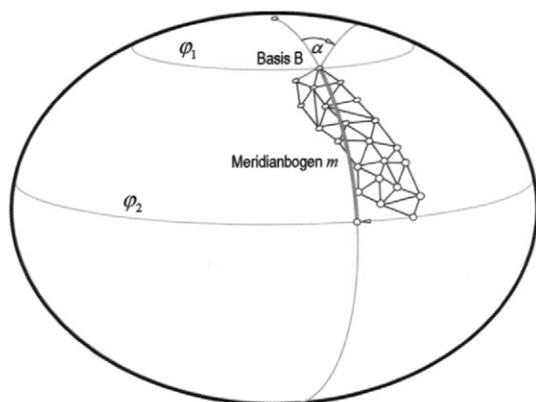


Abb. 3.2: Triangulation.

Als sich die Erkenntnis durchsetzte, dass die Kugelgestalt durch ein Rotationsellipsoid zu ersetzen sei, mussten konsequenterweise zwei Parameter bestimmt werden, beispielsweise die große und die kleine Halbachse einer Meridianellipse. Damit kann der gemessene Meridianbogen sowie die beiden Breitenwerte in den Endpunkten durch die Formparameter der Meridianellipse ausgedrückt werden. Misst man als Spezialfall am Pol bzw. am Äquator einen kleinen Ausschnitt des Meridianbogens, so können unmittelbar die beiden extremen Halbachsen (genähert) berechnet werden (Abb. 3.3):

$$a = (R_a R_b^2)^{1/3}, \quad b = (R_b R_a^2)^{1/3}.$$

Dass die Erde ein Rotationsellipsoid ist, also eine gewisse Abweichung von der Kugelgestalt aufweist, darüber herrschte allgemein Konsens. Allerdings war man sich nicht im Klaren, wie groß die Abweichungen sind. Man war sich sogar nicht ganz sicher – trotz der Ergebnisse nach dem Theorem von Clairaut und der anderen theoretischen Überlegungen –, ob das Rotationsellipsoid an den Polen abgeplattet sei oder spitz zuläuft.

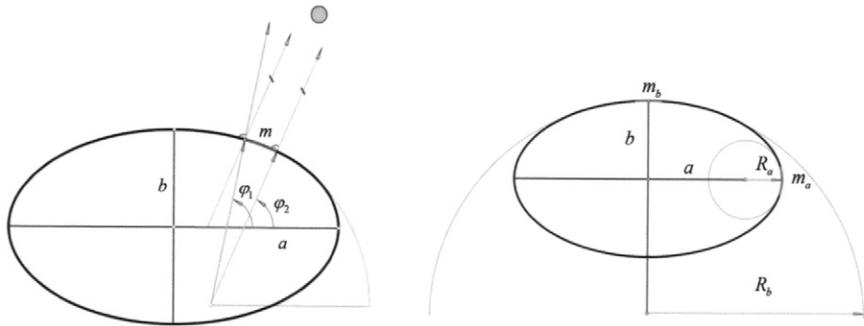


Abb. 3.3: Bestimmung der Meridianellipse aus den Meridianbögen am Pol und am Äquator.

Um dies zu entscheiden, führte man eine Reihe von Gradbogenmessungen durch. Zu nennen sind insbesondere die Meridianbogenmessung von Jean Picard (1620-1682) in den Jahren 1669 und 1670, die von Jean-Dominique Cassini I (1625-1712) und Philippe de La Hire (1640-1718) in den Jahren 1700 und 1718 erweitert wurden. Aufgrund dieser noch sehr ungenauen Messergebnisse vertrat Cassini die falsche Ansicht, dass der Polradius kleiner sei als der Erdradius am Äquator und damit die Erde an den Polen spitz zulaufen müsse. Diese Ansicht wurde von Isaac Newton und anderen Wissenschaftlern wie Maupertuis heftig bestritten. Die Ergebnisse der Meridianbogenmessung schienen zwar eine Abplattung am Äquator zu unterstützen, aber die damalige Messgenauigkeit ließ noch keinen eindeutigen Beweis zu und schließlich sprachen theoretische Überlegungen gegen eine solche Auffassung.

Um den Sachverhalt endgültig basierend auf genaueren Messungen zu klären, wurden von der französischen Akademie der Wissenschaften *Expeditionen nach Peru* (Pierre Bouguer (1698-1758), Charles-Marie de La Condamine (1701-1774), Louis Godin (1704-1760)) und *Lapland* (Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), Alexis Claude Clairaut, Charles Étienne Louis Camus, Pierre Charles Le Monnier) veranlasst. Die Messungen in Lapland wurden in den Jahren 1736 und 1737 unter der Leitung von Maupertuis durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen und weitere Nachmessungen bereits durchgeführter Meridianbogenmessungen bestätigten die Newtonsche Theorie, so dass man bereits 1740 von einer an den Polen abgeplatteten Erde ausgehen konnte. Die Expedition in Peru unter der Leitung von Louis Godin währte von 1735 bis 1744 und hatte mit zahlreichen Schwierigkeiten fertig zu werden. Schließlich wurde auch hier und durch weitere im Verlauf des 18. Jahrhunderts durchgeführter Messungen mit gewissen Abweichungen die Newtonsche Theorie untermauert. Die Abweichungen waren nicht nur in der begrenzten Messgenauigkeit begründet, sondern auch darin, dass man die Lotabweichungen bei den Breitengradmessungen noch nicht berücksichtigte.

Von besonderer Bedeutung sind die Messungen längs des *Meridians durch Paris von Barcelona nach Dünkirchen*. Durch ein Dekret von 1791 hatte die französische Nationalversammlung eine Allgemeine Kommission für Maß und Gewicht geschaffen, die den Auftrag hatte, die zahllosen unterschiedlichen Maßeinheiten zu vereinheitlichen. Die Kommission entschied, dass als fundamentale Länge der zehnmillionste Teil eines Viertels des Erdmeridians

vereinbart werden solle. Um Meridianbogenmessungen durchzuführen, die den bisherigen überlegen sein müssten, wählte man zwei Meridianbogenmessungen aus, die volles Vertrauen genossen. Der von Bouguer gemessene Bogen in Peru wurde als genau genug erachtet und als zweiten Bogen wurde ein neu zu messender Bogen von Barcelona nach Dünkirchen festgelegt, mit dessen Messung Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822) und Pierre Méchain (1744-1804) betraut wurden. Die Messungen wurden unter vielen Schwierigkeiten während der Französischen Revolution von 1792 bis 1798 ausgeführt. Im Jahre 1799 ergab sich zusammen mit dem Bogen von Bouguer eine Abplattung von 1:334 für die Erde. Die Messungen bildeten die Grundlage für die Anfertigung eines Urmeters, ein Endmaß aus Platiniridium, das bis 1889 die Längeneinheit verkörperte.

Eine Voraussetzung für die genaue Bestimmung der Formparameter der Meridianellipse war die Vervollkommnung von Längen- und Winkelmessgeräten, denn davon hing die Genauigkeit einer Triangulation und der geometrischen Methode zur Bestimmung der Ellipsoidparameter ab. Das 17. und vor allem das 18. und 19. Jahrhundert sind vor allem gekennzeichnet durch die Gradmessungen zur Bestimmung der Erdfigur.

3.4 Himmelsmechanische Lösungsansätze zur Bestimmung der Abplattung

Die großen französischen Mathematiker D'Alembert und Pierre-Simon (Marquis de) Laplace (1749-1827) befassten sich mit einer Methode aus der Himmelsmechanik, mit deren Hilfe ebenfalls die Abplattung der Erde bestimmt werden kann. Bereits Newton wies darauf hin, dass der Einfluss von Sonne und Mond auf eine abgeplattete sphäroidische Erdfigur zu einer **Präzessionsbewegung der Rotationsachse** der Erde führen müsse. Aber auch schon Hipparch hatte auf diesen Effekt der Erdrotationsachse aufmerksam gemacht und James Bradley hatte durch Beobachtungen seit 1729 auf den Effekt der Nutation hingewiesen, ein kurzperiodischer Bewegungsanteil, der die Präzessionsbewegung der Rotationsachse in Form einer Ellipse überlagern müsste. D'Alembert bewies 1749 diese Vermutung. Umgekehrt konnte man aus der Beobachtung von Präzession und Nutation auf die Abplattung der Erdfigur schließen.

Eine weitere Wirkung der ellipsoidischen Gestalt der Erde ist ein bereits von Tobias Mayer 1767 beobachteter periodischer Einfluss der abgeplatteten Erde auf die **Bahnbewegung des Mondes**, und zwar sowohl auf die Länge wie auch auf die Breite des Mondumlaufes um die Erde. Laplace bewies 1802 diesen Zusammenhang in seinem Werk *Darstellung der Himmelsmechanik*. Die inverse Anwendung dieses Zusammenhanges lieferte ebenfalls Werte für die Abplattung und zwar aus der Breite den Wert 1:304,6 und aus der Länge den Wert 1:305,5.

4 Die Erforschung der Figur der Erde bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts

4.1 Entwicklung der Beobachtungsinstrumente

Die Geodäsie ist ihrem Wesen nach eine messende Wissenschaft. Dies galt insbesondere auch für die in der Nach-Newton-Zeit sich entwickelnde klassische Geodäsie. Deshalb war es notwendig, die Ableitungen zur Figur der Erde empirisch abzusichern und so die Einheit von Theorie und Praxis für die Geodäsie zu gewährleisten (Bialas, 1996). Ende des 18. Jahrhunderts und zu Beginn des 19. Jahrhunderts entstanden viele optisch-feinmechanische Institute und der Instrumentenbau erfuhr eine rasante Entwicklung. Dies galt nicht nur für die Konstruktion spezieller Vermessungsgeräte und die deutlich gesteigerte Genauigkeit der geodätischen Instrumente, sondern auch für die Entwicklung neuartiger messtechnischer Methoden, die in der Lage waren, Messfehler zu minimieren oder gar zu kompensieren.

Die **Längenmessung** machte bis zur Einführung des metrischen Maßes zum Ende des 18. Jahrhunderts nur geringe Fortschritte. Erst zu diesem Zeitpunkt wurde die Notwendigkeit von Eichungen mit Hilfe von Etalons eingeführt. Es wurden erstmalig genaue Basisapparate konstruiert und bei den Grundlinienmessungen verwendet. Man kannte zwar bereits seit dem 17. Jahrhundert Thermometer, mit denen man bei Verwendung von eisernen Mess-Stangen die Temperatur berücksichtigen konnte, aber erst mit den neuartigen Basisapparaten aus Metall wurden Temperaturänderungen korrigiert oder die Temperatur wurde konstruktiv kompensiert. Eine Genauigkeitssteigerung wurde insbesondere auch durch die Verwendung des Nönus und des Mikrometers mit Hilfe von Ablesemikroskopen erreicht.

Die Erfindung des Fernrohres durch holländische Optiker und durch Galilei zu Beginn des 17. Jahrhunderts hatte nach Einführung des Fadenkreuzes entscheidende Fortschritte bei der Genauigkeit der **Winkelmessung** zur Folge. Seit der Mitte des 16. Jahrhunderts war auch die Libelle ein bekanntes Gerät zur präzisen Horizontierung bzw. Vertikalstellung von Messgeräten. Die Winkelmessgeräte wurden kontinuierlich weiterentwickelt. Während man zu Beginn der Triangulation noch Dioptra-Alhidaden und Quadranten unterschiedlicher Größe verwendete, wurden später sog. Borda-Kreise verwendet. Dies waren Instrumente, die nur einen Teilkreis enthielten und sowohl für die Horizontalwinkelmessung wie auch für die Vertikalwinkelmessung verwendet werden konnten, allerdings für beide Zwecke nur unzureichend genau. Zunehmend setzten sich Theodoliten durch, die zwei Teilkreise enthielten, einen für die Horizontalwinkelmessung und einen für die Vertikalwinkelmessung. Insbesondere wurden auch Spezialgeräte für präzise astronomische Beobachtungstechniken entwickelt. Um einen Winkel präzise zu messen, benötigt man sehr genaue Winkelmessgeräte; andererseits muss das Ziel auch entsprechend gut signalisiert sein. Die Entwicklung des Heliotrops im Jahre 1821 von Carl Friedrich Gauß war ebenso von Bedeutung wie die Konstruktion entsprechender Signalbauten und Beobachtungstürme.

Die einzigen Geräte, mit dem im 19. Jahrhundert die **Schwere** gemessen werden konnte, waren Pendelapparate. Die Messgrößen für die Beobachtung der Schwere mit dem Pendel sind die Pendellänge und die Schwingungsdauer. Da es nicht möglich ist, ein mathematisches Pendel streng zu realisieren, ist ein physisches Pendel anzuwenden, das als sog. Reversionspendel ausgearbeitet ist. Die entscheidenden Verbesserungen des Reversionspendels wurden 1826 von Friedrich Wilhelm Bessel (1784 - 1846) vorgeschlagen, aber es vergingen noch viele Jahrzehnte bis zum Ende des 19. Jahrhunderts, bis die wesentlichen Fehler einer Absolutschwere-Bestimmung mit einem Pendelapparat beseitigt waren. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Konstruktionen von Johann Georg Repsold (1770-1830) und seinen Nachfolgern in der von ihm gegründeten Firma.

Seit 1892 war als Absolut-Schwerereferenz das Wiener Schweresystem in Gebrauch, mit dem von Robert von Sterneck und Theodor von Oppolzer in Wien bestimmten absoluten Wert der Schwerkraft. Das erste international verwendete Schwerereferenzsystem wurde von Helmerert 1909 vorgeschlagen und legte ein absolutes Schwereniveau mit Bezug zu dem Potsdamer Referenzpunkt fest. Der Wert beruht auf Messungen, die von Friedrich Kühnen (1858-1940) und Philipp Furtwängler (1869-1940) in den Jahren 1898 bis 1904 im Pendelsaal des Geodätischen Institutes durchgeführt wurden. Obwohl das Potsdamer Schweresystem im Jahr 1971 durch das International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71) offiziell abgelöst wurde, findet es trotzdem auch heute noch in einigen Ländern Anwendung.

Hat man durch sorgfältige Messungen einen Absolutschwerewert auf einer Station gemessen, dann kann man durch relative Beobachtungen die Absolutwerte auf die benachbarten Stationen übertragen. Aber auch diese Relativ-Pendelapparate wiesen anfangs etliche Probleme auf, die viele Entwicklungsjahre erforderten, bis im Jahre 1887 ein für den Transport gut geeigneter Apparat von dem österreichischen General Robert Freiherr von Sterneck (1839-1910) konstruiert wurde. Damit wurden in der Folgezeit viele relative Schweremessungen

durchgeführt, die allerdings bei Weitem nicht global überdeckend waren. Selbst um 1910 war die Punktdichte mit Schwerewerten noch recht dürftig (Abb. 4.1).

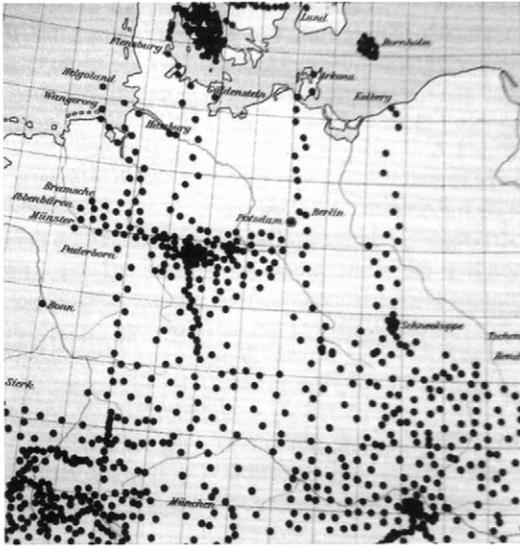


Abb. 4.1: Schweremessungen in Deutschland, um 1910 (Torge 2007).

Zum Ende des 18. Jahrhundert und in der Folge wurden neuartige Instrumente zur Messung des Schwerefeldes entwickelt. So wurde Im Jahre 1798 die Drehwaage von Henry Cavendish erfunden und erstmals zur Ableitung der Masse der Erde, bzw. zu deren Dichte verwendet. Die Drehwaage wurde später durch Loránd Eötvös (1848-1919) für physikalisch-geodätische Untersuchungen angewendet (Bialas 1982). Aus den Drehwaagen-Beobachtungen konnten Informationen über die differentialgeometrischen Eigenschaften der Niveauflächen gewonnen werden. Für die Beobachtung kleiner Neigungsänderungen wurde das Horizontalpendel von Karl Friedrich Zöllner (1834-1882) eingeführt. Die Horizontalpendelmessungen erlaubten, geophysikalische Eigenschaften der Erdkruste zu messen, die auch für die Physikalische Geodäsie von Bedeutung waren. Beispielsweise untersuchte F. R. Helmert damit die Elastizität der Erdkruste unter der Gezeitenwirkung von Sonne und Mond.

4.2 Entwicklung der Berechnungsverfahren

Während in den Anfangsjahren bei den Triangulationsarbeiten kaum redundante Messungen durchgeführt wurden und man bei der Wahl der Beobachtungsanordnung (zwangsweise) nicht sehr wählerisch war, änderte sich dies bei den in der Folge durchgeführten Arbeiten. Es wurden nicht nur überschüssige Beobachtungen ausgeführt, man achtete auch auf die Beobachtungsanordnung und Konfiguration der Dreiecke. Für die Bearbeitung und Analyse der Messergebnisse sind die Arbeiten von Carl Friedrich Gauß (1777-1855), Adrien-Marie Legendre (1752-1833) und Pierre-Simon (Marquis de) Laplace (1749-1827) von Bedeutung. Mit 18 Jahren entwickelte Gauß die Methode der kleinsten Quadrate, bei der es darum geht, die Summe der Quadrate von Abweichungen zu minimieren und das wahrscheinlichste Ergebnis aus einer genügend großen Zahl von Messungen zu ermitteln. In seinem Werk *Theorie der Wahrscheinlichkeitsrechnung* unterzog auch Pierre-Simon Laplace 1818 dieses Problem einer sorgfältigen Analyse. Gauß hat seine Überlegungen auf die zunehmend komplizierteren Dreieckskonfigurationen und Beobachtungspläne der Triangulationen ausgedehnt und 1826 in sei-

nem Werk *Erweiterung der Ausgleichsrechnung* gezeigt, wie sie berechnet werden können.

Gauß hat sich mit diesen und vielen anderen theoretischen Arbeiten zur Mathematik nicht nur als einer der führenden Mathematiker seiner Zeit einen herausragenden Namen gemacht, er hat auch als Geodät wichtige Beiträge geliefert. Seine unmittelbare Bedeutung für die Geodäsie liegt neben der Entwicklung der Methode der kleinsten Quadrate und der Verarbeitung redundanter Messungen auf dem Gebiet der Geometrie gekrümmter Flächen, der Berechnungen auf gekrümmten Flächen sowie auf der Abbildung von gekrümmten Flächen und insbesondere der konformen Abbildung. Daneben hat er aber auch Messungen durchgeführt, wie zum Beispiel die Gradbogenmessung von Göttingen nach Altona in den Jahren 1821 bis 1823 und andere praktischen Arbeiten.

Insbesondere die Arbeiten zur Messung der Meridianbögen in Peru haben die Notwendigkeit gezeigt, insbesondere die gemessenen Basislinien auf das Ellipsoid zu reduzieren. Hierzu wurde die trigonometrische Höhenmessung mittels gemessener Zenitdistanzen verwendet. Bouguer erkannte bereits 1738 bei seinen Vermessungsarbeiten in Peru, dass die Erdmassen einen Einfluss auf die Breiten- bzw. Zenitdistanz-Messungen haben, ohne aber daraus weitere Schlüsse zu ziehen. Für die Bestimmung des Einflusses der Erdmassen bzw. der Schwere auf die Messergebnisse gab es damals noch keine praktikablen Methoden. Das Problem bestand darin, dass am Ende des 18. Jahrhunderts die Pendelapparate als reine Laboratoriums-Instrumente konzipiert waren und als mobile Gerät nicht verwendet werden konnten. Auch das Fehlerverhalten war noch wenig untersucht worden.

4.3 Gradmessungen

Beginnend mit dem Ende des 18. Jahrhunderts und insbesondere in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte die Triangulationsmethode bereits eine bemerkenswerte Entwicklungsstufe erreicht. Mit den Möglichkeiten, zahlreiche Messungen eines Triangulationsnetzes einer gemeinsamen Berechnung mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate zu unterziehen, wurde die Erde zunehmend mit einem Netz von immer komplizierter angeordneten Triangulationsketten überzogen. Die Arbeiten in den Gebirgsgegenden, insbesondere in Peru, zeigten, dass auch die Höhen der Triangulationspunkte bestimmt werden müssen.

Während in der Anfangszeit der Gradmessungen die Bestimmung eines bestmöglichen Erdellipsoides im Vordergrund stand, gewinnt um 1800 die Geodäsie immer mehr Bedeutung für die Bereitstellung topographischer und kartographischer Produkte und schließlich auch für staatsverhaltende Aufgaben, wie die Erfassung von Grundstücken zum Zweck einer gerechteren Besteuerung. All diese Aufgaben förderten die Entwicklung der geodätischen Grundlagemethoden ganz entscheidend. Das Königreich Bayern war das erste Land Europas, das die Erstellung eines Katasters, basierend auf den Gradmessungen dieser Zeit bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts beschloss.

Die Gradmessungen wurden hauptsächlich entlang des Meridians durchgeführt, da die Breitenbestimmung problemloser war, während für die Gradmessungen entlang der Parallelkreise eine Zeitmessung notwendig ist, die damals noch nicht hinreichend genau war. Erst mit der Einführung von Zeitübertragungen mittels Funksignale oder genauen Chronometern Ende des 19. Jahrhunderts konnten genauere Parallelkreismessungen durchgeführt werden. Dies war dann auch der Beginn der flächenhaften Bestimmung von Referenzellipsoiden.

1858 wurde Johann Jacob Baeyer (1794-1885) mit der Ausführung des von Preußen übernommenen Anteils einer europäischen Längengradmessung unter dem 52. Parallelkreis betraut. Er veröffentlichte mehrere wissenschaftliche Arbeiten, unter anderem eine Denkschrift im Jahre 1861 über die Größe und Figur der Erde, die 1862 zur Gründung der *Mittel-europäischen Gradmessung* führte: Diese Aktivität hatte die Vermessung Mitteleuropas nach Längen- und Breitengraden und die Untersuchung lokaler Verhältnisse unter anderem des

Schwerfeldes sowie die internationale Zusammenarbeit zum Ziel. Zu diesem Zweck wurde 1864 in Berlin ein unter Baeyers Präsidium stehendes *Zentralbüros der Europäischen Gradmessung* errichtet und 1867 die *Mitteuropäische Gradmessung* zu einer *Europäischen Gradmessung* erweitert. Baeyer erwarb sich große Verdienste bei den organisatorischen Arbeiten zur internationalen Koordinierung der europäischen Vermessung (Perrier, 1950).

Nach dem Tode Baeyers im Jahre 1885 wurde die *Europäische Gradmessung* in *Internationale Gradmessung* umbenannt, insbesondere, um dem internationalen Charakter der Gradmessungen Rechnung zu tragen. 1886 übernahm F. R. Helmert, der 1887 zum Direktor des Geodätischen Institutes in Berlin ernannt wurde, die Leitung der *Internationalen Gradmessung*. Die *Internationale Gradmessung* war die erste und bis zum Ersten Weltkrieg die bedeutendste internationale geodätische Vereinigung. Die Konferenz von 1862 wird heute von der *Internationalen Assoziation für Geodäsie* (als Assoziation innerhalb der *Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik*, die 1919 gegründet wurde) als ihre Gründungskonferenz und Johann Jacob Baeyer als ihr erster Präsident angesehen. Näheres hierzu berichtete bereits Prof. Reigber.

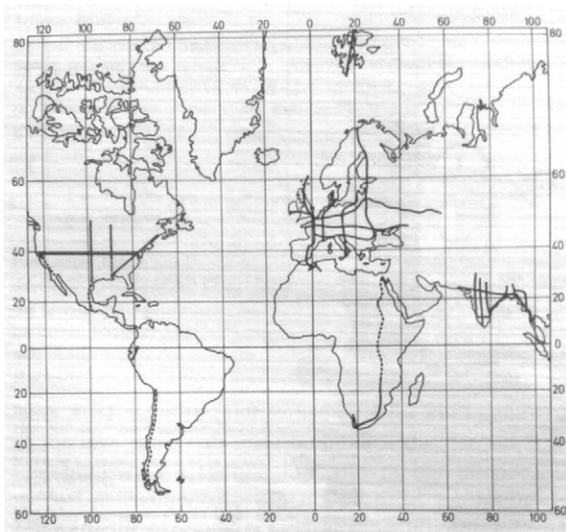


Abb. 4.2: Gradmessungen um 1900 (Bialas 1982)

Die Abb. 4.2 veranschaulicht die globale Verteilung der Gradmessungen, die bis etwa 1900 durchgeführt wurden und die für die Berechnung der Parameter eines Referenzellipsoides verwendet werden konnten. Man erkennt, dass von einer globalen Überdeckung mit Gradbogenmessungen zu dieser Zeit nicht die Rede sein konnte.

4.4 Ellipsoidbestimmungen

Mit Hilfe der verfügbaren Gradmessungen konnten die beiden Ellipsoidparameter, z.B. große Halbachse und Abplattung, nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Jedes Land hatte bis etwa 1850 den Ehrgeiz, ein eigenes bestanschließendes Referenzellipsoid und damit ein eigenes geodätisches Datum für die eigene Landesvermessung und Kartenherstellung zu berechnen. So entstanden bis etwa zur Mitte des 19. Jahrhunderts 15 verschiedene Ellipsoide, von denen die wichtigsten in der folgenden Tab. 4.1 zusammengestellt sind.

Das Ellipsoid von Friedrich Wilhelm Bessel (1784 - 1846) wurde 1841 aus zehn Gradmessungen abgeleitet. Das Bessel-Ellipsoid liegt zahlreichen Landesvermessungen West- und Mitteleuropas zugrunde. Es wurde auch als Bezugsfläche für das Deutsche Hauptdreiecksnetz DHDN 1990 verwendet. Die Ellipsoide von Alexander Ross Clarke (1828 - 1914) wurden insbesondere in den USA (Coast and Geodetic Survey) und in Frankreich (Service Géographique) verwendet. Die Genauigkeit der Halbachsen eines Referenzellipsoides wird gegen Ende des 19. Jahrhunderts zu $a \pm 75m$, $b \pm 69m$ und für den Nenner des Abplattungswertes zu $\pm 1,07$ angegeben. Die heutzutage verbindliche Referenz ist das Ellipsoid des WGS84, das weitgehend diesem Anspruch genügt; es ist zum Vergleich mit in der Tabelle 4.1 aufgenommen, ebenso wie das durch die flächenhafte Methode bestimmte internationale Erdellipsoid von Hayford (siehe Abschnitt 4.8).

Tab. 4.1: Referenzellipsoide aus dem 19. Jahrhundert

Bezeichnung	Jahr	Große Halbachse (km)	Abplattung
G. B. Airy	1830	6377,5634	1:299,3249646
Everest (Indien)	1830	6377,276345	1:300,8017
Bessel	1841	6377,397155	1:299,1528128
Clarke	1866	6378,206600	1:294,9786982
Clarke / IGN	1880	6378,24915	1:293,465
Hayford	1909	6378,388	1:297
WGS84 (zum Vergleich)	1984	6378,137000	1:298,257223563

Ernst Heinrich Bruns (1848 - 1919) bezweifelte in einer 1878 erschienen bedeutsamen Schrift als Beitrag zur Europäischen Gradmessung den Sinn, weitere Referenzellipsoide zu berechnen, da die lückenhafte und unvollständige globale Verteilung der Gradmessungen und der nicht bekannte Einfluss der Schwere auf die astronomischen Beobachtungen zu keinem verbesserten Referenzellipsoid führen würde. Er bemerkte hierzu sarkastisch: "Jeder neue derartige Versuch ist im Grunde genommen kaum etwas anderes, als eine Rechenübung, nützlich für den, der sie ausübt". Deshalb schlug er eine sinnvolle Vereinbarung für das Referenzellipsoid vor und empfahl, es für die weiteren Triangulationen beizubehalten.

Die Aufgabe aus einem System unterschiedlicher Gradmessungen die plausibelsten Werte für die Ellipsoidparameter zu bestimmen, hat im Laufe der Zeit viel an Interesse verloren, als man die Erkenntnis gewonnen hatte, dass der Einfluss des Schwerfeldes verhindert, allgemein gültige Werte für die Parameter eines Referenzellipsoides ableiten zu können. Zusätzlich stimmten insbesondere die Abplattungswerte aus Schweremessungen, abgeleitet aus der Präzession und der Nutation sowie den Bewegungen des Mondes um die Erde nicht mit dem Abplattungswert aus den Gradmessungsmethoden überein. Einen gewissen Ausweg aus diesem Dilemma bot die Lotabweichungsausgleichung, die aus den flächenhaft verfügbaren Informationen noch am besten geeignet war, so etwas ähnliches wie ein bestanschließendes Ellipsoid für die gesamte Erde oder für gewisse Bereiche davon abzuleiten.

Interessanterweise hat der große Alexander von Humboldt in seinem vierbändigen Werk *Kosmos* die Aufgabe, den Erdkörper zu messen und zu wiegen um die Mitte des 19. Jahrhunderts als gelöst betrachtet (Bialas, 1996). Man sieht, auch große Geister können irren!

4.5 Himmelsmechanische Methoden zur Bestimmung der Abplattung

Die im Abschnitt 3.4 bereits erwähnten, von D'Alembert und Laplace zum Ende des 18. Jahrhunderts vorgeschlagenen himmelsmechanischen Methoden zur Bestimmung der Abplattung der Erde, wurden im 19. Jahrhundert wieder aufgegriffen und erweitert. Unter anderen bewies Jules Henri Poincaré (1854-1912), basierend auf den Konstanten von Präzession und Nutation, dass die Abplattung der Erde nicht größer als 1:296 bzw. 1:297 sein könne, unabhängig von der Dichteverteilung innerhalb der Erde. Die Methode von Laplace, die Abplattung der Erde aus den periodischen Bewegungen des Mondes in Länge und Breite zu bestimmen, wurde von Peter Andreas Hansen (1795-1874) wieder aufgegriffen und schließlich von Helmert weiterentwickelt. Er leitete einen schon recht genauen Wert $1:297,8 \pm 2,2$ ab. George William Hill (1838-1914) behandelt das Problem ebenfalls in allen Einzelheiten und leitete 1884 einen Wert von 1:297,2 ab.

Um die große Halbachse des Erdellipsoides zu bestimmen, kann auch die Messung der Mondparallaxe verwendet werden, wobei die aus Schweremessungen abgeleiteten Werte für die Erdabplattung notwendig sind. Helmert hat, basierend auf Schwerewerten, die durch Pendelbeobachtungen ermittelt wurden, für die große Halbachse folgende Werte abgeleitet: aus der Abplattung 1:299,26 erhielt er 6378830m und aus 1:289,76 den Wert 6381260m. Die erzielten Werte weichen mit den aus Gradmessungen abgeleiteten Werten für die Halbachse allerdings zu stark ab. Deshalb wurde diese Methode zur Bestimmung der großen Halbachse wieder verworfen.

4.6 Die Suche nach der „wahren“ Gestalt der Erde

Den engen Zusammenhang zwischen der Schwere und der Geometrie der Erde wurde u.a. durch das *Theorem von Clairaut* gezeigt. Bereits die frühen Gradmessungen zeigten überdies, dass die Schwerkraft einen Einfluss auf die Gradmessungen hat. Insbesondere die Vertikalwinkelmessungen, also die Messung von Zenitdistanzen zur Breiten- und Höhenbestimmung zeigten einen Einfluss. Wegen der begrenzten Messgenauigkeit hatte man aber keine wirklich klare Vorstellung vom Einfluss der Schwere. Man beruhigte sich damit, dass diese Effekte nur sehr klein seien, also die Bestimmung der Erdfigur in erster Linie ein geometrisches Problem sei. Diese Vorstellung hatte sich bis zum Ende des 18. Jahrhunderts zweifelsfrei gehalten. Dass die Lotrichtungen als physikalische Größen einen Einfluss auf die Gradmessungen haben, wurde als selbstverständlich angesehen und dennoch ignoriert. Deshalb stand die Bestimmung eines geometrisch definierten Referenzellipsoides für die Arbeiten der Landesvermessung und für die anschließenden Anwendungen in der Kartographie und Verwaltung eindeutig im Fokus der geodätischen Arbeiten zu Beginn des 19. Jahrhunderts, wie dies bereits im 18. Jahrhundert der Fall war.

Gauß leitete 1828 einen Wandel in dieser Vorstellung ein, indem er die Erdfigur als diejenige Fläche definierte, die überall zur Lotrichtung senkrecht steht und von der die Flächen der ruhenden Weltmeere Teile sind. Bessel präzisierte diese Definition 1837, indem er zusätzlich diese mathematische Erdfigur auf den Kontinenten durch ein Netz kommunizierender Röhren veranschaulichte und gewissermaßen die Meeresoberfläche unter den Kontinenten fortsetzte.

Schließlich bezeichnete Johann Benedikt Listing (1802-1882) im Jahre 1872 diese ausgewählte Niveaufläche als *geoidische Fläche*. Listing definierte aber auch die Schar der Niveauflächen als *Geoide*. Diese Bezeichnung hat sich allerdings nicht durchgesetzt und die Bezeichnung Geoid war zukünftig der Niveaufläche im Bereich der ruhenden Ozeane vorbehalten. Die für die Triangulationen verwendeten Bezugsflächen, die durch einen einfacheren mathematischen Ausdruck beschrieben werden können, bezeichnete er dagegen als *sphäroidische Flächen*. Dies kann ein zweiachsiges oder auch ein dreiachsiges Rotationsellipsoid sein

oder auch eine Oberfläche, die sich einem Referenzellipsoid weitgehend annähert. Damit wollte er die Bezeichnung mathematische Oberfläche, die oft zu Verwechslungen führte, vermeiden. Bisher hatte man die Bezeichnung mathematische Erdfigur einmal für das Geoid, einmal für das Rotationsellipsoid verwendet.

4.7 Die hypothesenfreie Bestimmung der Erdfigur von Bruns: Bruns'sches Polyeder

In der im Jahr 1878 veröffentlichten bereits erwähnten Schrift kritisierte Ernst Heinrich Bruns (1848 - 1919) die Definitionen von Gauß, Bessel und Listing und bemerkte, dass das so definierte Geoid keine eindeutige Fläche sei (Bruns, 1878). Er weist insbesondere auf die Veränderungen der Meeresoberfläche hin und auf die Problematik der Festlegung eines so definierten Geoides. Im Gegensatz hierzu verwendete Bruns den Begriff der *mathematischen Figur der Erde im Sinne einer strengen potentialtheoretischen Definition*. Er sieht die Aufgabe der Geodäsie darin, diese Kräftefunktion bzw. die Potentialfunktion des Schwerfeldes zu bestimmen (Abb. 4.3). Wenn das Schwerepotential als räumliche Funktion bekannt sei, so brauche man diese Funktion nur einer Konstanten gleichzusetzen, um auf diese Weise nicht nur das Geoid, sondern alle Niveaulflächen zu erhalten.

Er diskutierte in diesem Artikel die mathematischen Eigenschaften des Schwerepotentials und seiner Ableitungen. Bruns kommt zu dem Ergebnis, dass es aus prinzipiellen und praktischen Gründen nicht möglich sei, einen geschlossenen analytischen Formelausdruck für das Geoid im gesamten Erdbereich, also auch innerhalb der Massen, zu finden. Eine Ausnahme könnten lediglich sehr kleine Bereiche von einigen Dutzend Kilometern Ausdehnung sein.

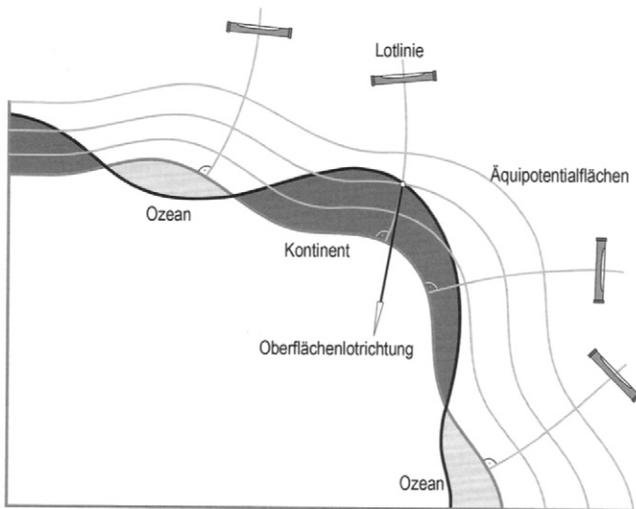


Abb. 4.3: Die mathematische Figur der Erde: Schar der Potentialflächen

Bruns schlägt vor, das Geoid unter der Voraussetzung geeigneten Beobachtungsmaterials punktweise zu bestimmen und gegebenenfalls eine grafische Darstellung für das Geoid anzufertigen. Er listete diejenigen am Ende des 19. Jahrhunderts verfügbaren Beobachtungen auf, die für eine solche *hypothesenfreie Bestimmung der mathematischen Figur* der Erde notwendig sind (Bruns, 1878):

- Astronomische Ortsbestimmungen (Breiten, Längen, Azimute)
- Triangulationen (Horizontalwinkel, Basislinien)

- Trigonometrisches Nivellement (Zenitdistanzen)
- Geometrisches Nivellement
- Schwerewerte

In seiner sorgfältigen Analyse, kommt er zu dem Ergebnis, dass die astronomischen und trigonometrischen Messungen in der Lage sind, die Gestalt des Gradmessungspolyeders zu bestimmen und zusammen mit dem Lotrichtungs-System die Orientierung dieses Polyeders mit Bezug auf das globale geozentrische (astronomische) Koordinatensystem vorzunehmen. Die Lagerung dieses Polyeder-Systems ist damit nicht möglich, und die Ableitung von Parametern der Figur der Erde deshalb mit sehr großen, damals unterschätzten Unsicherheiten behaftet.

Mit dem geometrischen Nivellement, zusammen mit Schweremessungen (geodätisches Nivellement) ist man (zumindest im Prinzip) in der Lage, die Abstände der Polyeder-Punkte von einem Geoid längs der Lotlinien zu berechnen und damit das Geoid punktweise zu erhalten, ohne Hypothesen über das analytische Bildungsgesetz dieser Fläche anzunehmen. Wenn keine global überdeckenden Ergebnisse des geometrischen Nivellements und der Schweremessungen vorliegen, dann gelingt die Bestimmung des Potentials oder der Kräftefunktion nur bis auf eine Konstante.

Die Form des Polyeders ist in horizontaler Richtung von den gemessenen Azimuten abhängig und in vertikaler Richtung von den Zenitdistanzen, wobei in letzterem Fall die Refraktion eine genauigkeitsbegrenzende Größe darstellt. Davon hängt auch die Genauigkeit des punktweise bestimmten Geoides ab. Zusammenfassend sagte Bruns, dass die Gestalt der Niveauflächen unabhängig von allen hypothetischen Voraussetzungen über ihr Bildungsgesetz ermittelt werden können.

4.8 Translative Lotabweichungsausgleichung

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden, wie bereits erwähnt, die Mängel der Ellipsoidbestimmung basierend ausschließlich auf den Gradmessungen immer deutlicher. Hinzu kamen die im letzten Abschnitt erwähnten neuartigen Überlegungen zu einer umfassenderen auf dem Schwerfeld der Erde beruhenden Definition der Erdfigur, so dass der Wunsch entstand, beide Gesichtspunkte der Erdfigur, den geometrischen und den physikalischen Aspekt, zumindest teilweise, miteinander zu verbinden. Es standen zudem immer mehr flächenüberdeckende Triangulationen zur Verfügung und die Messgenauigkeiten wurden zunehmend perfektioniert.

Mit den Horizontalwinkeln in den sphäroidischen Dreiecken, den verschiedenen stabilisierenden Querverbindungen zwischen den Dreieckspunkten, den redundanten Grundlinienmessungen sowie den Zenitdistanz-Messungen konnte man die innere dreidimensionale Geometrie eines Dreiecksnetzes festlegen. Der Datumsdefekt für die Orientierung des Netzes konnte durch die astronomischen Beobachtungen (Breiten bzw. Poldistanzen, zunehmend auch Längen und Azimute) beseitigt werden. Es blieb aber ein Datumsdefekt für die Lagerung des Netzes im Raum. Dies war der Grund, dass zwischen den verschiedenen im 19. Jahrhundert isoliert berechneten Rotationsellipsoiden keine Verbindung möglich war, selbst dann nicht, wenn dieselben Ellipsoidparameter verwendet wurden. Erst global verfügbare Beobachtungen, wären in der Lage, die Lagerung dieser Referenzellipsoide zu ermöglichen.

Um die Triangulierungsnetze auf dem Ellipsoid zu berechnen, sind die Netzpunkte mit den zugehörigen terrestrisch-geodätischen Messungen auf das Ellipsoid zu übertragen. Für die Projektion auf das Referenzellipsoid sind prinzipiell verschiedene Methoden vorgeschlagen worden, die auch die Art der Lotabweichungen festlegt (Abb. 4.4):

- Punktzuordnung entlang der Ellipsoidnormalen um die Ellipsoidhöhen (nach Helmert),

- Punktzuordnung entlang der Lotlinie auf das Geoid um die Meereshöhe und dann vom Geoidpunkt entlang der Ellipsoidnormalen auf das Ellipsoid um die Geoidhöhe (nach Pizzetti).

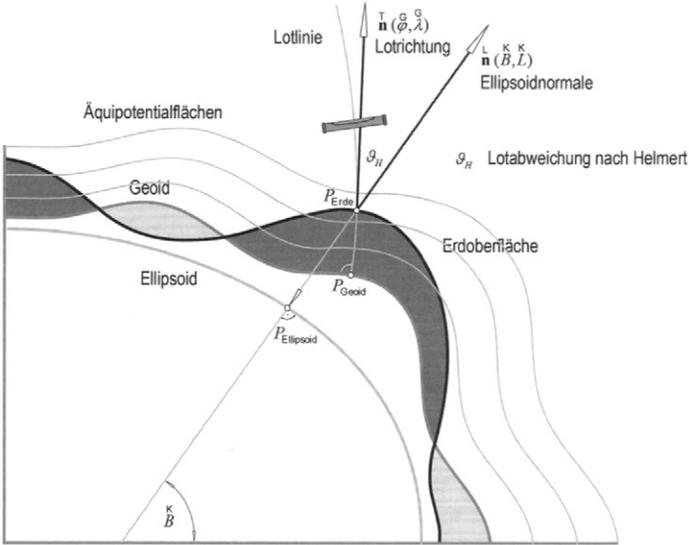


Abb. 4.4: Punktzuordnung nach Helmert, Lotabweichung nach Helmert.

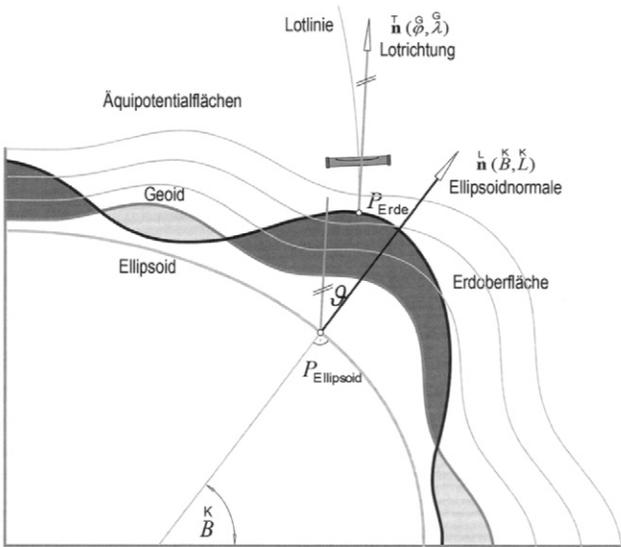


Abb. 4.5: Zuordnung von Oberflächenpunkten und Ellipsoidpunkten im Sinne einer Netzausbreitung.

Allerdings war ein strenger projektiver Zusammenhang zwischen den Netzknoten auf der Erdoberfläche und den Netzknoten auf dem Ellipsoid nicht ohne weiteres zu realisieren.

Hierzu wäre die vorausgehende Bestimmung eines Bruns'schen Polyeders notwendig gewesen. Das Ergebnis der flächenhaften Berechnung der Triangulationsnetze auf den Referenzellipsoiden wurde in der praktischen Anwendung vielmehr durch Netzausbreitung gewonnen (Abb. 4.5).

Die weitere Berechnungs-Methode zur Bestimmung eines Referenzellipsoides wurde als Flächenmethode bezeichnet und bereits von Helmert im Jahre 1880 beschrieben (Helmert, 1880). Neben dem Konzept einer strengeren *projektiven Lotabweichungsausgleichung* (nach Helmert oder Pizzetti) wurde aber insbesondere eine *translativen Lotabweichungsausgleichung* durchgeführt, der folgende Überlegungen zugrunde liegen:

Der Einfluss des Schwerefeldes zeigt sich beim Vergleich der berechneten Koordinaten in einem lokalen ellipsoidischen Koordinatensystem L mit den beobachteten astronomischen Koordinaten, bezogen auf ein topozenrisches astronomisches Koordinatensystem T, durch die Lotabweichungen (ξ, η, ψ) (Abb. 4.6). Die Lotabweichungen ergeben sich durch den Vergleich der astronomischen Beobachtungen im System G (astronomische Längen und Breiten φ, λ sowie Azimut α) mit den auf dem Referenzellipsoid berechneten geodätischen Koordinaten im System K, die von Vereinbarungen im Fundamentalpunkt und den Ellipsoidparametern abhängen. Eine beste Anpassung des Referenzellipsoides an das regionale Geoid erhält man im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate, indem man die Lotabweichungen minimiert und als zu bestimmende Zielgrößen Korrekturen zur Lagerung und Orientierung des Netzes auf dem Ellipsoid und zu den Ellipsoidparametern einführt.

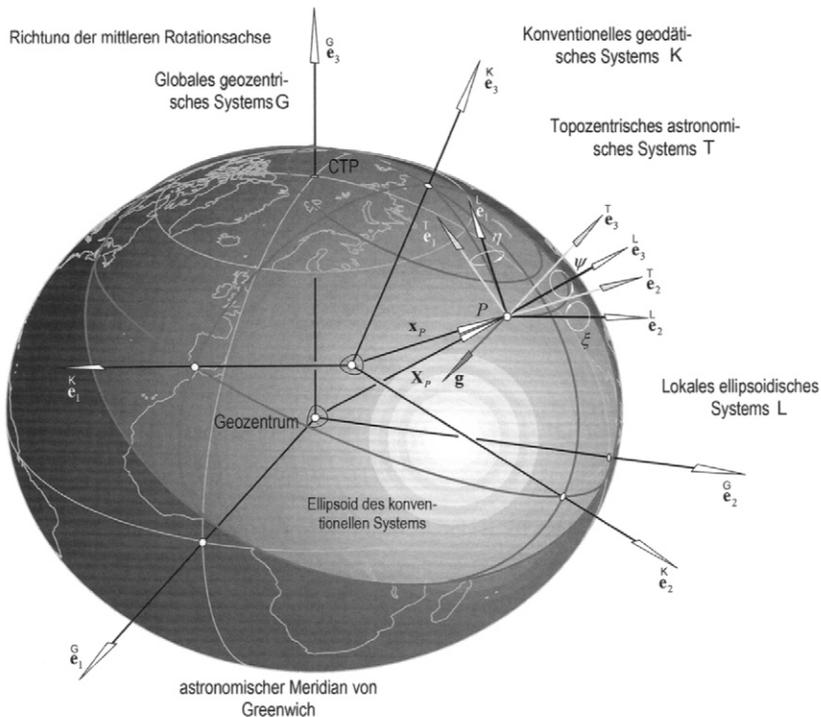


Abb. 4.6: Beziehungen zwischen einem lokalen astronomischen und einem lokalen ellipsoidischen Koordinatensystem.

In diesem Sinne ergeben sich parallele Koordinatenachsen der globalen Systeme, Ellipsoidmittelpunkt und Geozentrum fallen aber nicht zusammen. Der Grund ist, wie bereits ausgeführt wurde, der Datumsdefekt der astronomischen Beobachtungen hinsichtlich einer absoluten Lagerung. Da die Gradmessungen nur auf den Kontinenten durchgeführt werden konnten, ist es auf diese Weise nicht möglich, ein bestanschließendes Ellipsoid für die gesamte Erde zu erhalten. Heutzutage wird die Bestimmung eines *mittleren Erdellipsoids*, also eines *global bestanschließenden Ellipsoids*, angestrebt. Von einem globalen geozentrisch gelagerten mittleren Erdellipsoid war man bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts mangels geeigneter Beobachtungen noch sehr weit entfernt.

Die flächenhafte Ausgleichung von Gradmessungen wurde erstmalig 1909 durch J. F. Hayford (1868-1925) mit Hilfe isostatischer Reduktionen (siehe Abschnitt 4.10) auf das Gebiet der Vereinigten Staaten angewendet. Die Parameter dieses Ellipsoids wurden 1924 von der IUGG für die Definition des *Internationalen Ellipsoids* vorgeschlagen (siehe Tab. 4.1).

4.9 Kenntnisse über das Geoid im 19. Jahrhundert

Die Diskussionen von Gauß, Bessel, Listing und vor allem Bruns zeigten eindeutig die Bedeutung des Schwerfeldes für die Definition der physikalisch-mathematischen Figur der Erde im Sinne von Bruns. George Gabriel Stokes (1819-1903) formulierte bereits im Jahre 1849 die Aufgabe, das Störpotential $T=W-U$ aus den gemessenen Schwerewerten g auf dem Geoid zu bestimmen, das sich auf ein bekanntes Referenzellipsoid bezieht, dessen Oberfläche eine Niveaulfläche mit dem Wert U ist (Abb. 4.7). In der heutigen Bezeichnungsweise handelt es sich dabei um ein sog. skalares freies Randwertproblem.

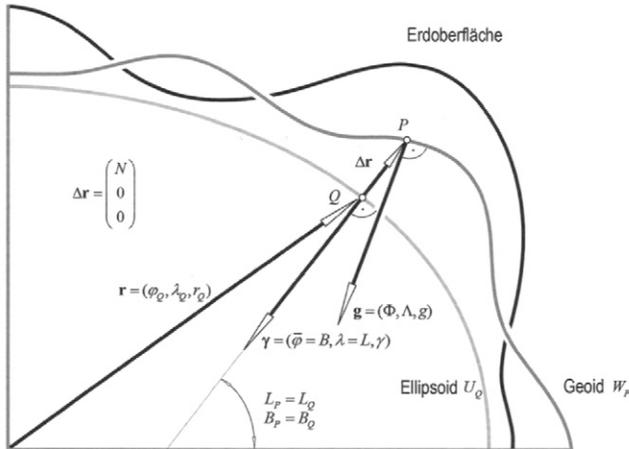


Abb. 4.7: Das freie skalare Randwertproblem nach Stokes

Als Randfläche wird das unbekannte Geoid betrachtet (deshalb freies Randwertproblem). Weiterhin wird angenommen, dass die Geoidpunkte auf den Normalen des Referenzellipsoids liegen, so dass nur die Geoidhöhe N zu bestimmen ist (deshalb skalares Randwertproblem). Die Lösung dieses Problems ist die Formel von Stokes, also die Berechnung des Störpotentials T aus den global zur Verfügung stehenden Schwerenanomalien, die man aus den Schweremessungen g auf der Randfläche erhält. Die Geoidhöhen erhält man daraus mit Hilfe der Formel von Bruns und die Lotabweichungskomponenten nach der Formel von Vening-Meinesz, die allerdings erst im Jahre 1939 entwickelt wurde.

Tab. 4.2: Stationen mit astronomischen Beobachtungen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts

Dreieckskette	Stationen
Netz 1. Ordnung Norddeutschland	18
Bonn - Nizza	22
Brest - Strassburg	9
Schneekoppe - Castaneba	8
Feagham - Warschau	20
Astrachan - Brest	19

Da Schweremessungen in genügend großer Zahl nicht verfügbar waren, spielten diese Lösungen für die Berechnung des Geoides im 19. Jahrhundert keine Rolle. Die einzigen Möglichkeiten, die Schwere zu messen, waren Pendelmessungen, die noch nicht als mobile Messgeräte zur Verfügung standen und astronomische Messungen, die über die Lotabweichungen Auskunft über das Schwerefeld lieferten. Mit diesen geodätisch-astronomischen Lotabweichungen wurden auch einige lokale oder regionale Geoidausschnitte berechnet. Listing (1873) berichtet, dass im Zeitraum von 1800 bis etwa 1850 aus den weltweit durchgeführten Gradmessungen 51 Stationen mit astronomischen Messungen zur Untersuchung der Gestalt und Größe der Erde zur Verfügung standen. Astronomische Messungen wurden in der Folgezeit allerdings vermehrt durchgeführt, beispielsweise wurden im Rahmen der Europäischen Gradmessung im Zeitraum von 1869 bis 1885 die Poldistanzen an 63 Stationen, die Längen an 28 Stationen und Azimute an 27 Stationen gemessen. Eine Vorstellung von der Zahl der Stationen, an denen im Zuge der Anlage von Dreiecksketten astronomische Beobachtungen in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden gibt Tab. 4.2.

Wegen der komplizierten mathematischen Struktur ist das Geoid oder eine andere Niveaufläche für Lageberechnungen ohnehin nicht geeignet - deshalb erschien wohl die Dringlichkeit einer Geoid-Berechnung zunächst zweitrangig. Aus diesem Grunde war man auch Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts nach wie vor bestrebt, ein bestmögliches Referenzellipsoid zu berechnen, das sich einem regionalen Bereich möglichst gut anpasst und damit die Lotabweichungen „vernachlässigbar“ klein werden. Dies gelingt im Prinzip mit der im Abschnitt 4.8 erläuterten translativen Lotabweichungsausgleichung unter der Voraussetzung, es liegen genügend viele astronomische Messungen vor.

Dennoch war man sich zum Ende des 19. Jahrhunderts im Klaren, dass die Kenntnis des Schwerefeldes und des Geoides unverzichtbar ist, aber die Berechnung von gewissen Hypothesen abhängt, abgesehen von dem Fehlen genügend vieler Schweremessungen. Da sich das Geoid auf den Kontinenten innerhalb der Massen befindet, hängt der Verlauf des Geoides natürlich von der Dichte der Massen zwischen dem Geoid und der Erdoberfläche ab. Für jedes Massenmodell hätte man somit ein dazugehöriges Geoid zu definieren.

Bis zum zweiten Drittel des 19. Jahrhundert hatte man aber auch noch keine klare Vorstellung von der Größe der Lotabweichungen. Deshalb wurde einige Mühe darauf verwendet, herauszufinden, wie groß die maximalen Abweichungen zwischen einem bestanschließenden Referenzellipsoid und dem Geoid sein könnten. Für kleinräumige Bereiche wurden Geoidhöhen in der Größenordnung von wenigen Metern abgeschätzt. Besondere Bedeutung hatte eine kleinräumige Geoid-Bestimmung im Bereich des Harz. Hierfür wurden die Breiten an 103 Stationen, die Längen an 5 Stationen und die Azimute an 28 Stationen durchgeführt. Außerdem wurde die Schwere an 84 Stationen mit Hilfe von Pendel-Beobachtungen gemessen.

Helmert untersuchte in diesem Zusammenhang die Bestimmung kleiner Ausschnitte aus dem Geoid mit Hilfe von Lotabweichungen unter Berücksichtigung der Lotkrümmung (Helmert (1900)).

Globale Abschätzungen der Abweichungen eines Geoides von einem Ellipsoid durch Bruns, Helmert und Listing ergaben einen Wert um das Jahr 1880 zu positiven 1000m auf den Kontinenten und negativen 1000m auf den Ozeanen. Ein Grund für die Behauptung Bruns, dass es unmöglich sei, durch Gradmessungen zuverlässige Dimensionen für das Erdellipsoid abzuleiten. Sorgfältige Abschätzungen von Bruns und Helmert unter Berücksichtigung isostatischer Ausgleichsmassen reduzierten diesen Wert kontinuierlich und Helmert gab im Jahre 1899 einen Wert von $\pm 100m$ an, ein Wert, der aus heutiger Sicht sehr realistisch war. Wegen des Mangels an Daten konnte man im 19. Jahrhundert bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts noch keine detaillierteren globalen Geoidmodelle rechnen. Die Zahl der Schweremessungen nahm erst zu, als man mit transportablen Schweremess-Geräten, wie zum Beispiel dem Sterneck'schen Pendelapparat, vermehrt Schweremessungen durchführen konnte.

4.10 Massenreduktion, Isostasie und Wechselbeziehung zur Geologie und Geophysik

Abhängig von der Art und Weise, wie man den Verlauf des Geoides unter den Kontinenten fortsetzt, wird man - wie bereits ausgeführt wurde - unterschiedliche Geoide erhalten. Die Bestimmung der Geometrie des Geoides und des Störpotentials als Lösung des Stokes'schen Problems erfordert Quellenfreiheit im Außenraum. Das bedeutet, dass sämtliche Massen außerhalb der Randfläche (des Geoides) beseitigt werden müssen. Da die Beobachtungen auf der Erdoberfläche durchgeführt wurden, müssen die Beobachtungsgrößen anschließend auf die Randfläche reduziert werden. Mit diesen reduzierten Werten wird das Randwertproblem gelöst. Man erhält auf diese Weise ein regularisiertes Schwerfeld und ein regularisiertes Geoid. Dieses sog. Co-Geoid ergibt dann als letzten Schritt unter Berücksichtigung des indirekten Effektes das Geoid.

Die Reduktion der verschiedenen gemessenen Funktionalen des Schwerfeldes an der Erdoberfläche hat neben der Berechnung des Geoides aber auch Bedeutung für die Erforschung der Struktur der Erdkruste. Die Annahmen über die Massen außerhalb des Geoides und eventueller Kompensationsmassen innerhalb des Erdmantels bestimmen somit das Ergebnis der Geoid-Berechnung. Der Verlauf und die Größe der Anomalien können geophysikalisch-geologisch interpretiert werden.

Die Massen der *Topographie* werden, unter der Voraussetzung, dass die Höhen der Beobachtungspunkte bekannt sind, in der Form der

- Bouguerplatte δg_B als ebene unendlich ausgedehnte Platte konstanter Dichte, u.U. mit sphärischer Korrektur berücksichtigt, wobei die Dicke der Platte durch die Höhe des jeweiligen Beobachtungspunktes festgelegt ist, sowie als Verfeinerung durch die
- Geländekorrektur δg_G , die die tatsächliche Geländestruktur im Sinne einer Korrektur erfasst,

Bouguer hat diese Korrekturen erstmalig im Rahmen der Peru-Expedition im 18. Jahrhundert angebracht, als er einen beobachteten Schwerewert auf einem Berg mit einem zweiten auf Meeresniveau vergleichen wollte.

Diese Massenreduktionen können durch isostatische Reduktionen δg_I verfeinert werden. Diese Reduktionen sind notwendig, da im allgemeinen eine Topographie oberhalb des Geoides durch eine isostatische Ausgleichsmasse unterhalb des Geoides in gewisser Weise kompensiert wird. Besondere Bedeutung haben die isostatischen Modelle von John Henry Pratt (1854) und George Bidell Airy (1855), die später von Hayford und Heiskanen verfeinert wurden. Nach Beseitigung der topographischen Massen und der Berechnung der Effekte auf die Beobachtungsfunktionale müssen die Beobachtungen noch von den Beobachtungspunkten auf die Geoidpunkte entlang der Lotlinie reduziert werden. Zur Berechnung dieser *Freiluftre-*

duktion, beispielsweise für Schwerewerte, wird i.a. von einem globalen Mittelwert des Freiluftgradienten der Schwere ausgegangen.

Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, sollte der indirekte Effekt möglichst klein sein. Da der indirekte Effekt mit der Änderung des Potentials zufolge der Massenverlagerung bzw. -beseitigung verknüpft ist, hängen die reduzierten Massen und die entsprechenden indirekten Effekte zusammen. Die verschiedenen Massenreduktionen können hinsichtlich des indirekten Effektes wie folgt charakterisiert werden:

- gering bei der Geländereduktion ,
- groß bei der Bouguerreduktion,
- groß bei der isostatischen Reduktion, jedoch umgekehrtes Vorzeichen wie bei der Bouguerreduktion.

Die Berechnung der Bougueranomalien ist besonders gut geeignet, wenn man die lokalen geologischen Verhältnisse in einem bestimmten Gebiet untersuchen will. Da der indirekte Effekt aber sehr groß ist, sind sie zur Geoidberechnung allerdings nicht geeignet. Man wird Freiluft- oder isostatische Anomalien vorziehen. Um die Nachteile, die sich bei der Verwendung der Bougueranomalien bei der Geoidberechnung ergeben, zu umgehen, werden zwei alternative Reduktionsverfahren diskutiert:

- Kondensationsreduktion von Helmert (Abb. 4.8),
- Inversionsreduktion nach Rudzki.

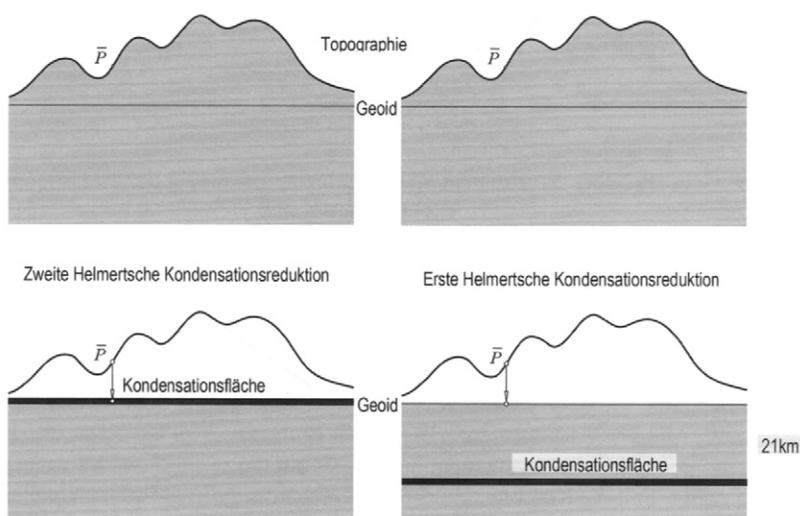


Abb. 4.8: Die Kondensationsmethoden von Helmert.

Bei der Kondensationsreduktion nach Helmert (1884) werden die topographischen Massen auf einer Äquipotentialfläche des Schwerefeldes als einfache Schicht „kondensiert“. Man unterscheidet zwei Kondensationstiefen:

- Kondensationsmethode: Kondensationsfläche ist eine dem Geoid parallele Fläche in 21km Tiefe (Interpretation als isostatische Reduktion nach Airy-Heiskanen mit einer Ausgleichstiefe von 21km),
- Kondensationsmethode: Kondensationsfläche ist das Geoid selbst (Interpretation als isostatische Reduktion nach Airy-Heiskanen mit einer Ausgleichstiefe von 0 km).

Die Eigenschaften dieser Reduktionsverfahren sind:

- unveränderte Gesamtmasse,
- geringer indirekter Effekt,
- ähnliche Eigenschaften wie Freiluftreduktion.

Zu erwähnen sind im Zusammenhang mit den Wechselbeziehungen der Geodäsie mit der Geologie und der Geophysik schließlich auch die Arbeiten von Hecker und Helmert im Zusammenhang mit der Erforschung der Elastizität der Erdkruste unter der Gezeitenwirkung von Sonne und Mond mit Hilfe des von Karl Friedrich Zöllner entwickelten Horizontalpendels. Aus den Beobachtungen mit Hilfe der Drehwaage konnten nach Loránd Eötvös Informationen über die differentialgeometrischen Eigenschaften der Niveauflächen gewonnen werden.

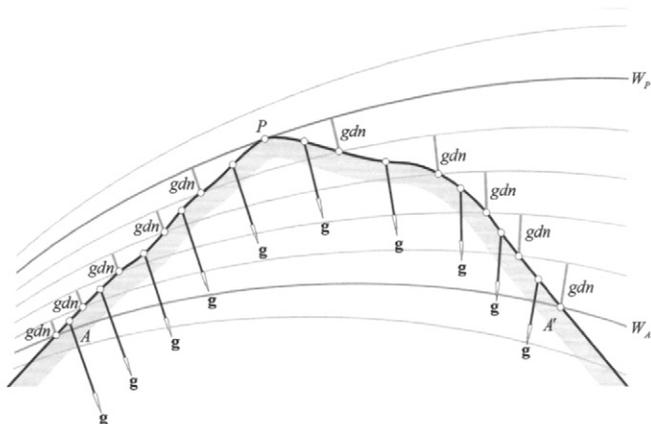


Abb. 4.9: Geometrisches Nivellement dn und Schweremessung g liefern Differenzen von geopotentiellen Koten.

4.11 Höhenbestimmung

Zu einer vollständigen Beschreibung der Figur der Erde ist eine präzise Höhenbestimmung der Oberflächenpunkte notwendig. Zenitdistanzmessungen und das geometrische Nivellement zur Höhenbestimmung waren im 19. Jahrhundert bekannte Messmethoden. Beide Höhenmessverfahren ergeben allerdings unterschiedliche Typen von Höhen. Die Zenitdistanzmessung (unter Berücksichtigung der Lotabweichungen) liefert ellipsoidische Höhen h , während das geometrische Nivellement nur wegabhängige angenäherte schwerefeldorientierte Höhen H ergibt. Erst die Kombination der Ergebnisse des geometrischen Nivellements dn mit den Schweremessungen g entlang der Nivellement-Linien erlaubt die Bestimmung von Differenzen von geopotentiellen Koten C , von denen dann schwerefeldbezogene Höhen abgeleitet werden können (Abb. 4.9, 4.10). Verwendet man einen genäherten Wert für die Schwere entlang der Höhe, ausgehend von einem Oberflächenschwerewert g , so erhält man eine nach Helmert benannte Definition der orthometrischen Höhe (Schwere in $mgal$, Höhen in m),

$$H = \frac{C}{g + 0,0424H}.$$

Diese Formel kann als Standardformel zur Berechnung der orthometrischen Höhe betrachtet werden. Sie wird in zahlreichen Landesvermessungen verwendet. Die orthometrische Höhe eines Punktes P , beispielsweise in der Variante nach Helmert, wird als dessen Abstand vom Geoid, gemessen längs der Lotlinie, definiert. Die Lotlinien sind als Orthogonaltrajek-

torien der Niveaulflächen gekrümmte Linien. Wegen der Nichtparallelität der Niveaulflächen besitzen die Äquipotentialflächen des Schwerepotentials keine konstanten orthometrischen Höhen, da sich deren numerische Werte unterscheiden. Die Niveaulfläche des Schwerkraftpotentials W durch den Punkt P stimmt also nicht mit der äquithometrischen Fläche durch diesen Punkt überein.

Wegen der fehlenden Schwerewerte, war es im 19. Jahrhundert nicht möglich, orthometrische Höhen streng zu ermitteln. Um den Schwerevariationen wenigstens in Abhängigkeit von der Breite bzw. der Höhe Rechnung zu tragen, verwendete man die Normalschwere statt der wirklichen Schwere. Anfangs wurden lediglich nivellierte Höhen ohne Korrekturen verwendet. Erst ab 1912 wurden in Deutschland *normalorthometrische Höhen* eingeführt, in Bayern bereits seit 1890. Die folgende Tabelle Tab. 4.3 gibt einen Überblick über die Höhensysteme Ende des 19. Anfang des 20. Jahrhunderts.

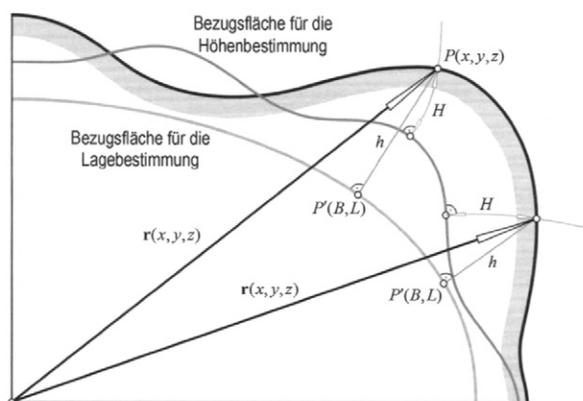


Abb. 4.10: Ellipsoidische Höhen und schwerefeldorientierte Höhen

Tab. 4.3: Höhensysteme in den alten Bundesländern Deutschlands.

Bezeichnung	„Altes System“ (in Deutschland außer Bayern)	„Vorläufiges System“ (in Bayern)	„Neues System“ heute: Deutsches Haupthöhennetz 1912 (DHHN12)
Erstellungszeitraum	ab 1875 bis 1879	ab 1890	ab 1912 bis 1956
Berechnung	Netzausbreitung	Netzausbreitung	Teilnetzausgleichungen
Datumsfestlegung	Sternwarte Berlin	Sternwarte Berlin	Sternwarte Berlin, verlegt nach Hoppegarten
Höhendefinition	nivellierte Höhen (ohne Reduktionen)	Normalorthometrische Höhen	Normalorthometrische Höhen

Bis 1885 wurden etwa 11000km geometrisches Nivellement durchgeführt, allerdings ließ die Genauigkeit sehr zu wünschen übrig, zumal die Ergebnisse des geometrischen Nivellements wegababhängig sind. Im 18. Jahrhundert und noch später wurde auch die Methode der barometrischen Höhenmessung angewendet. Sie konnte allerdings hinsichtlich der Genauigkeit so wenig befriedigen wie damals die anderen beiden Messverfahren.

4.12 Der Stand der Erdfigur-Bestimmung zu Beginn des 20. Jahrhunderts

Fasst man den Kenntnisstand der Erdfigurbestimmung zu Beginn des 20. Jahrhunderts zusammen und vergleicht ihn mit dem Wissen zum Ende des 18. Jahrhunderts, so gelangt man zu einer beeindruckenden Bilanz, insbesondere in theoretischer Hinsicht, aber auch mit Blick auf die praktischen Ergebnisse.

In Frankreich war zum Ende des 18. Jahrhunderts bereits das *metrische System* eingeführt worden, basierend auf den von Bouguer gemessenen Gradbogen in Peru und der Messung des Gradbogens durch Paris von Méchain und Delambre. Der Norddeutsche Bund sollte am 17. August 1868 die Einführung des französischen Metersystems zum 1. Januar 1872 beschließen. Deutschland sollte dann 1875 zu den zwölf Gründungsmitgliedern der Meterkonvention gehören.

Auf theoretischem Gebiet wurden die Arbeiten von Newton und seinen Zeitgenossen durch die großen französischen Mathematiker, Physiker und Astronomen wie Laplace, d'Alembert und Legendre zu einer gewissen Vollendung geführt. Laplace hat mit seiner Werk *Traité de Mécanique Céleste* (Darstellung der Himmelsmechanik), das im Zeitraum von 1799 bis 1823 entstanden ist, ein Lehrgebäude von klarer Einheitlichkeit geschaffen.

Gauß hat mit seinen Arbeiten die Ausgleichsrechnung und die Methode der kleinsten Quadrate die Auswertemethoden bereits auf einen sehr hohen Stand gebracht. Überdies hat er mit seinen Arbeiten zur Flächentheorie die Grundlagen für geodätische Abbildungen geschaffen.

Die Triangulationen hatten bei einer kontinuierlichen Verbesserung der Messinstrumente, und zwar der Basisapparate und der Winkelmess-Instrumente im 19. Jahrhundert bereits einen bemerkenswerten Stand erreicht. Es wurden zahlreiche Referenzellipsoide aus Gradmessungen abgeleitet. Zu nennen sind insbesondere die Ellipsoide von Bessel und Clarke. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die flächenhafte Methode zur Bestimmung bestanschließender Referenzellipsoide von Helmert und Hayford entwickelt und von Hayford für den Bereich Nordamerikas ein bestanschließendes Ellipsoid abgeleitet, das später als Internationales Ellipsoid vereinbart wurde. Diese aus heutiger Sicht mit Lotabweichungsausgleichungen bezeichneten Verfahren hatten nicht nur bereits sehr genaue Werte für die Ellipsoidparameter ergeben, es konnten auch regionale Lotabweichungen bestimmt werden, die einen Eindruck vom Verlauf des Geoides in gewissen Regionen vermittelten.

Daneben wurden alternative astronomische und himmelsmechanische Methoden zur Analyse von Präzession und Nutation und der Mondbewegung entwickelt, die man getrost als Vorläufer der Verfahren der Satellitengeodäsie bezeichnen kann.

Mit den Definitionen der Erdfigur von Gauß, Bessel, Listing und Bruns ist man einen entscheidenden Schritt in Richtung unseres modernen Verständnisses vom Erdsystem gegangen. Vor allem Bruns hat in seinem vielzitierten Artikel von 1878 das Konzept einer hypothesenfreien Bestimmung der Kräftefunktion des Schwerfeldes mit den damals zur Verfügung stehenden Beobachtungstypen skizziert. Bemerkenswert ist, dass er mit seinem Konzept des Bruns'schen Polyeders die neuesten Entwicklungen der Geodäsie vorausgesehen hat. Die enge Verbindung der Geodäsie zur Mathematik, der Physik und der Astronomie hat sich klar herausgebildet.

Auf dem Gebiet der Schweremessung hat man mit den Pendel-Methoden zur Absolut-schweremessung aber auch zur relativen Schwerebestimmung mit transportablen Geräten noch nicht die geeignete Messmethode gefunden. Die Theorie zur Geoidbestimmung wurde zwar bereits 1849 von Stokes entwickelt, aber es fehlten noch genügend viele Schwerewerte, um eine großräumige Geoidbestimmung durchführen könnte.

Im 19. Jahrhundert sind weltweit zahlreiche Landesvermessungswerke mit der Schaffung von Festpunktfeldern als Grundlage für die Kartenherstellung und für die Verwaltung ent-

standen. Wegen des Fehlens von Schwerewerten konnte aber weder ein genaues Geoid noch ein schwerefeldorientiertes Höhennetz geschaffen werden. Aus der Sicht der Bestimmung der Figur der Erde als Ganzes stand die Bestimmung eines globalen Referenzellipsoides deshalb im Vordergrund der Bemühungen, obwohl natürlich klar war, dass das Ziel eines mittleren Erdellipsoides im Sinne eines global bestanschließenden Rotationsellipsoides nicht möglich war. Bruns hatte bereits darauf hingewiesen, dass weitere Verbesserungen mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich sein werden und die Ellipsoidparameter ungenauer als vermutet seien.

Auf dem Gebiet der Aufarbeitung einer geodätischen Theorie hat Helmert mit seinem 1872 entstandenem Werk über die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate und seinem 1880 und 1884 entstandenem zweibändigen Werk *Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie* eine theoretische Grundlage geschaffen, die Generationen von Geodäten geprägt hat. Mit diesem Werk legte Helmert für das Wissensgebäude seiner Zeit als große Synthese die *Fundamentaltheorie der Geodäsie* vor (Bialas 1996). Die Bücher besaßen unverminderte Aktualität in diesem Zeitraum und die in der Zwischenzeit entstandenen vorzüglichen Werke, beispielsweise von Baeschlin und Heiskanen, gingen im Wesentlichen kaum darüber hinaus. Nicht umsonst ist das zweibändige Standardwerk noch im Jahre 1962 nachgedruckt worden. Natürlich haben sich in der Zwischenzeit umwälzende Veränderungen ergeben, aber viele theoretischen Details haben immer noch Gültigkeit. Helmert hat in seiner Zeit Stellung zu allen wichtigen theoretischen und praktischen Fragen bezogen. Viele Begriffe aus der Geodäsie tragen seinen Namen, wie beispielsweise die Helmert-Transformation, Helmert-Höhen und vieles mehr.

5 Der Weg zum dynamischen Erdsystem-Modell

Der Zeitraum vom Beginn des 20. Jahrhunderts bis zum Start des ersten künstlichen Erdsatelliten 1957 kann auf dem Gebiet der Geodäsie durch drei wesentliche Entwicklungen gekennzeichnet werden:

- im messtechnischen Bereich ist es die Entwicklung von Gravimetern, die eine flächenhafte Erfassung der Schwere ermöglichten und die Entwicklung von Schwere mess-Apparaten auf Schiffen. Beide Entwicklungen sind u.a. mit den Namen von Lucien J. B. LaCoste (1908-1955) und Felix Andries Vening-Meinesz (1887-1966) verbunden, ohne in diesem Überblick auf die vielen anderen Entwicklungen einzugehen.
- im theoretischen Bereich sind es die Verfeinerungen der Stokes'schen Randwertaufgabe durch Vening-Meinesz und die Arbeiten zur Isostasie, aber insbesondere die Entwicklungen zur Lösung der geodätischen Randwertaufgabe, vor allem die mit dem Namen von Mikhail Sergeevich Molodensky (1909–1991) verbunden sind.
- im anwendungsorientierten Bereich die Anlage von ausgedehnten Nivellement- und Schwerenetzen und die Versuche, durch die Überbrückung der Ozeane beispielsweise mit Hilfe der auf dem Radarprinzip basierenden Verfahren Shoran und Hiran ein Kontinent übergreifendes Weltnetz zu schaffen.

5.1 Entwicklungen der Schweremessung

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erfolgte eine rasante Entwicklung der Instrumente zur Schweremessung. Insbesondere die Entwicklung von mobilen Gravimetern in Form von Relativgravimetern war für den mobilen Einsatz wichtig. Es konnten Schwerenetze angelegt und flächenhafte Schweremessungen durchgeführt werden. Die Entwicklungen wurden insbesondere auch durch die Anwendungen in der Geophysik und der Lagerstättenforschung forciert. Relativgravimeter beruhen auf dem Prinzip der Federwaage. Dabei wird aber nicht die Änderung der Federlänge gemessen, sondern die Änderung kompensiert und die Kompen-

sation gemessen. Hier soll stellvertretend nur das von Lucien J. B. LaCoste (1908-1995) La-Coste-Romberg - Gravimeter erwähnt werden. Um die Sensitivität des Gravimeters zu erhöhen, bedient man sich des Prinzips der Astasierung. die Konstruktion der Feder erfolgt so, dass eine geringe Änderung der Schwerebeschleunigung eine große Auslenkung der Feder erfolgt. Beim LaCoste-Romberg-Gravimeter wird dies durch die schräge Aufhängung der Feder erreicht.

Ohne auf weitere Entwicklungen detailliert einzugehen, war es wichtig, Gravimeter auf bewegten Plattformen zu entwickeln, um eine globale Überdeckung mit Schwerewerten zu erreichen. Eines der ersten Geräte, das auf einem Schiff, vorzugsweise in einem U-Boot betrieben wurde, war das von Felix Andries Vening-Meinesz (1887-1966) entwickelte Schiffsgavimeter. Das Gerät verfügt über zwei im selben Rahmen angebrachter und in entgegengesetzter Phase schwingender Pendel derselben Größe. Dadurch konnten die Störungen durch die Wellenbewegung kompensiert werden. Mit der Entwicklung dieses Gravimeters wurde Messung des Schwerfeldes auf den Ozeanen möglich. Mit Hilfe von weiter entwickelten Seegravimetern von LaCoste-Romberg und Graf wurde eine große Zahl von Schwerewerten gemessen.

5.2 Entwicklungen der Randwertaufgaben zur Bestimmung der Figur der Erde

Mit der Lösung des Problems von Stokes und dem geodätischen Nivellement (geometrisches Nivellement und Schweremessungen) kann die Erdoberfläche mathematisch beschrieben werden. Das Geoid wird im Falle des skalaren Problems über die Geoidhöhen festgelegt. Dennoch bleibt die Lösung des Problems von Stokes unbefriedigend, weil die Ergebnisse mit Hypothesen behaftet sind:

- die auf der Erdoberfläche gemessenen Schwerfeldfunktionale müssen auf das Geoid reduziert werden. Dabei sind die Massen außerhalb des Geoides zu beseitigen. Für diese Reduktionsschritte ist die Dichtefunktion notwendig. Weil diese Information i.a. fehlt, müssen stattdessen Hypothesen über den Dichteaufbau herangezogen werden.
- Zur Bestimmung der orthometrischen Höhen sind Mittelwerte der Schwere entlang der Lotlinien notwendig. Da diese Schwerewerte nicht direkt gemessen werden können, ist ebenfalls die Dichtefunktion der gravitierenden Massen notwendig.

Von zunehmender Bedeutung sind die Theorien zur Isostasie, die nicht nur für die großräumigen geophysikalischen Aspekte neue Impulse geben, sondern auch für die Schwerereduktionen von Bedeutung sind. Folgende isostatische Modelle werden angewandt:

- Pratt-Hayford Modell (gleiche Eintauchtiefe der Gebirgsstöcke, unterschiedliche Dichtewerte),
- Airy-Heiskanen (variable Eintauchtiefe der Gebirgsstöcke und Ozeanbereiche, konstante Dichtewerte),
- Vening-Meinesz (kontinuumsmechanisches Modell der Erdkruste unter der Annahme gewisser Elastizitätseigenschaften).

Mit der Verfügbarkeit von hinreichend vielen Schweremessungen konnten die ersten mehr oder weniger globalen Geoid-Modelle berechnet werden (Heiskanen/Moritz (1966)):

- 1934: Hirvonen, $5^\circ \times 5^\circ$ - Freiluftanomalien, 62 Geoidundulationen
- 1948/1949: Tanni, isostatische Reduktionen, $5^\circ \times 5^\circ$ - Geoidundulationen global
- 1957: Heiskanen, sog. Columbus-Geoid mit noch sehr mäßiger Genauigkeit.
- ab Anfang der Sechzigerjahre wurden die ersten Gravitationsmodelle aus Satellitenbeobachtungen gerechnet.

In der Theorie zeichnete sich ab 1940 ein neuartiges Lösungskonzept für die geodätische Randwertaufgabe ab. Zweifellos lag es nahe, die Erdoberfläche und das Schwerfeld im Außenraum direkt aus den an der Erdoberfläche gemessenen Schwerfunktionale zu bestimmen. Diese Lösungsidee wurde in den Jahren 1940 bis 1950 von dem Russen Mikhail Sergeev

vich Molodensky (1909 –1991) erarbeitet. Die erste englische Publikation erschien 1962, zusammen mit V.F. Eremev und M.I. Yurkina. Dem Vorteil dieser Idee, ohne Hypothesen auszukommen, steht der Nachteil gegenüber, ein mathematisch schwieriger zu lösendes Problem zu erhalten. Der sofort ins Auge fallende Unterschied ist, dass die Randfläche nicht wie im Falle des Stokesschen Problems eine Äquipotentialfläche des Schwerefeldes ist, auf der der Schwerevektor senkrecht steht. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass die Randfläche eine beliebige, streng genommen nicht einmal stetige Funktion ist. Natürlich handelt es sich wieder um ein nichtlineares Problem. Um eine Näherungslösung zu erhalten, wird also wieder eine Linearisierung notwendig sein. Man wird aber nicht wie im Falle des Problems von Stokes lediglich auf eine freie Randwertaufgabe (vektoriell bzw. skalar) treffen, sondern da der Schwerevektor nicht senkrecht auf der Randfläche steht, auf ein sog. *schiefachsiges freies Randwertproblem* geführt.

Tab. 5.1: Vergleich des Problems von Molodensky und Stokes

Randpunkt P	Erdoberfläche	Geoid
Näherungspunkt Q	Telluroid	Ellipsoid
"vertikale" Distanz	Höhenanomalie	Geoidhöhe

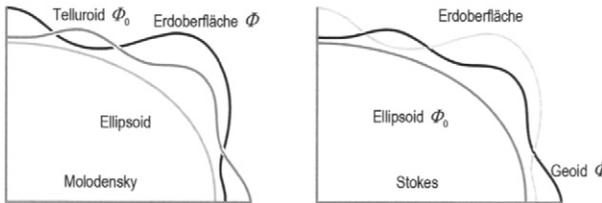


Abb. 5.1: Vergleich des Problems von Molodensky und Stokes

Es gibt jedoch viele Gemeinsamkeiten zwischen den Problemen von Stokes und Molodensky. Tatsächlich ergeben sich für das Stokessche Problem bzw. das einfache Problem von Molodensky dieselben Randbedingungen sowie dieselben Beziehungen für den Zusammenhang zwischen beobachtenden bzw. zu vereinbarenden Größen, wie z.B. Potentialanomalie und (vektorielle) Schwereanomalie und den zu bestimmenden Größen, wie z.B. Störpotential und Positionsanomalie. Damit gelten die in der Abb. 5.1 zusammengestellten Analogien. Während jedoch beim Stokesschen Problem sowohl Randfläche als auch Modell-Randfläche Äquipotentialflächen von Schwerefeld bzw. Modell-Schwerefeld sind, gilt dies für das Problem von Molodensky nicht.

Das Lösungsverfahren für dieses Problem gestaltet sich wesentlich schwieriger. All diesen Nachteilen steht jedoch der Vorteil gegenüber, dass die Randwerte hypothesenfrei gewonnen werden können und dass (fast) keine Massenverlagerungen vorgenommen werden müssen. Es zeigt sich, dass die Lösung des Stokesschen Problems auch die erste Näherung des Problems von Molodensky darstellt. Tatsächlich ist der Korrekturterm zur Lösung des Stokes'schen Problems relativ klein.

5.3 Der Siegeszug des Computers und der geodätischen Raumverfahren

Der Wunsch nach einem einheitlichen geodätischen Weltsystem, dem ein mittleres Erdellipsoid als allgemeine Rechenfläche zugrunde liegt, wurde ab der Mitte des 20. Jahrhunderts

immer dringlicher geäußert. Hierzu wurde eine Reihe von Vorschlägen unterbreitet. Zu erwähnen sind insbesondere die Bemühungen von Heiskanen ein solches geodätisches Weltnetz zu errichten (Grossmann 1966). Eine Möglichkeit boten die globalen Schweremessungen aber auch die Überbrückung der Ozeane beispielsweise mit Hilfe der auf dem Radarprinzip basierenden Verfahren Shoran und Hiran, die im Sinne einer Trilateration eine Verbindung der Triangulationsnetze auf den verschiedenen Kontinenten schaffen sollten.

Diese Überlegungen aber auch die Forschungen mit dem Schwerpunkt einer *Kosmischen Geodäsie* wurden im wahrsten Sinne durch die Ende der fünfziger Jahre mit dem Start des ersten künstlichen Satelliten *Sputnik I* aufkommende Satellitentechnologie und die etwa gleichzeitig einsetzende atemberaubende Entwicklung der Computer-Technologie überrollt. Zunächst lag es nahe, basierend auf den Überlegungen zu einer Ballon-Triangulation bzw. einer Stellar-Triangulation, die künstlichen Erdsatelliten als Hochziele zu betrachten. Satelliten werden dabei als hochfliegende Zielmarken betrachtet. Auf diese Weise wird das System der Triangulationen der Vergangenheit in die Zukunft geführt. Führt man die Beobachtungen von mehreren topozentrischen Stationen gleichzeitig aus, so kann ein drei-dimensionales Polyeder bestimmt werden. Als Satelliten wurden sog. Ballonsatelliten verwendet oder Satelliten, die Lichtblitze aussenden. Das Konzept wurde im Prinzip bereits 1878 von H. Bruns vorgeschlagen (Brunnsches Polyeder). Im Jahre 1964 wurde vom US-Coast and Geodetic Survey die Möglichkeit eines Satellitenweltnetzes vorgeschlagen, das aus 36 Stationen mit Seitenlängen zwischen 2000 bis 3000 Kilometern bestehen sollte. Die in allen Details ausgearbeiteten Verfahren der Triangulation, hinsichtlich Messung und Auswertung, wie auch die Methoden der geodätischen Astronomie zur Messung von Längen, Breiten und Azimuten verloren in den nachfolgenden Jahrzehnten dramatisch an Bedeutung. Es würde den Rahmen dieser Darstellung sprengen, auf alle neueren Entwicklungen auch nur in skizzenhafter Vereinfachung einzugehen. Deshalb sollen nur einige für die Figur der Erde als Ganzes bedeutsamen Entwicklungen vereinfacht dargestellt werden.

Ein allgemein gesteigertes Interesse an einer genauen Kenntnis des Schwerfeldes setzte ein beträchtliches Potential an internationalen geodätischen Aktivitäten frei. William M. Kaula (1926 - 2000) war einer derjenigen Wissenschaftler, der die Theorie der Satellitengeodäsie in den Anfangsjahren prägte. Die klassischen Methoden der Gravitationsfeldbestimmung mit Hilfe von künstlichen Erdsatelliten beruhen darauf, dass der Erdsatellit als Testkörper im Gravitationsfeld der Erde betrachtet wird. Aus den Abweichungen der beobachteten Bahn von einer Referenzbahn, die sich ergeben würde, wenn sich der Satellit unter dem Einfluss eines bekannten Gravitationsfeldes (Referenz-Gravitationsfeld) antriebsfrei (freifallend) bewegen würde, können Korrekturen zu den Parametern des Referenzfeldes bestimmt werden. Diese Satellitenbahnstörungsverfahren trugen dabei wesentlich zur Bestimmung des langwelligen Anteils des Gravitationsfeldspektrums mit einer Auflösung bis zu einigen tausend Kilometern bei.

Bereits Ende der Sechzigerjahre wurde in den Programmpapieren zur Entwicklung von zukünftigen Methoden der neu entstandenen *Satellitengeodäsie* die Weichen gestellt, die bis in unsere Tage die modernen Entwicklungen bestimmen. Dies gilt nicht nur für die Bestimmung des Schwerfeldes mit speziellen Satellitenkonfigurationen, sondern auch für die Bestimmung eines weltumspannenden Netzes von Festpunkten als Realisierung von globalen Referenzrahmen und globalen Navigationssystemen.

Zur hochauflösenden Gravitationsfeldbestimmung kann man neben der Bahnanalyse eines einzelnen Satelliten insbesondere auch zwei Testkörper vorsehen, deren Relativbewegung gemessen wird. Dies kann dadurch geschehen, dass relative Kräfte oder Drehmomente im Satellitenbereich dynamisch gemessen werden (Satellitengravitations-Gradiometrie) oder die Relativbewegung nach dem Dopplerprinzip oder auf interferometrischem Wege kinematisch ausgemessen wird (Satellite-to-Satellite-Tracking).

Mit Hilfe einer weiteren sich als enorm erfolgreich herausstellenden Methode, der Satellitenaltimetrie, kann die Meeresoberfläche und damit das Geoid direkt ausgemessen werden. Satellitenaltimetrie und verbesserte terrestrische Schweredaten leisteten vor allem Beiträge zur Bestimmung des Gravitationsfeldes im mittel- und kurzwelligen Spektralbereich bis zu einer Auflösung von einigen hundert Kilometern. Lange Zeit kannte man deshalb das Geoid auf den Ozeanen besser als auf den Kontinenten.

Heutzutage ist es gelungen, mit Hilfe der genannten satellitengestützten Beobachtungssysteme in Verbindung mit terrestrischem Schwerematerial hochauflösende Gravitationsmodelle abzuleiten und Veränderungen des Gravitationsfeldes mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Tagen zu berechnen. Diese wiederum können auf Massenbewegungen im Erdraum zurückgeführt werden. Die funktionale Darstellung des Gravitationspotentials erlaubt, beliebige Funktionale des Gravitationspotentials abzuleiten. Damit wurde die Vision von Bruns erfüllt, die Kräftefunktion zu bestimmen und damit Kenntnis über alle Funktionale des Schwerfeldes zu erhalten.

Mit Hilfe von künstlichen Erdsatelliten war es auch möglich geworden, die Koordinaten von global verteilten Stationen zu bestimmen und damit ein geozentrisch gelagertes Bezugssystem zu realisieren. Weitere in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte Methoden, wie beispielsweise die VLBI-Technik (Very-Long-Baseline Interferometry) und die Entwicklung immer genauerer Navigationssysteme haben die Geodäsie revolutioniert. Die verschiedenen Beobachtungssysteme, GPS, Doris, SLR, VLBI und LLR und mögliche weitere zukünftige Sensoren bilden die Grundlage für eine permanente Überwachung des Erdsystems.

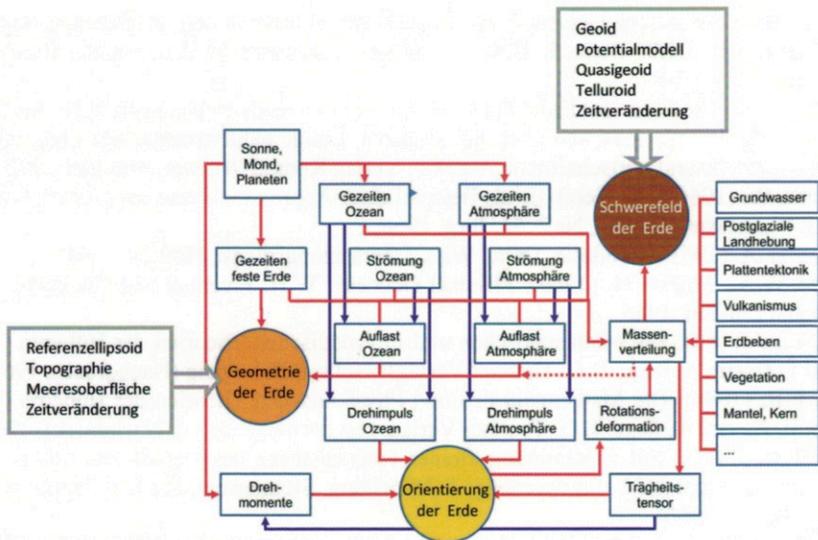


Abb. 5.2: Das dynamische System Erde mit den Elementen Geoid und Referenzzellipsoid.

5.4 Die verschiedenen Aspekte der Figur der Erde

Aus heutiger Sicht ist man sich im Klaren, dass es keine eindeutige alle Aspekte befriedigende Definition für die *Figur der Erde* gibt. Vielmehr wird man im Sinne von Moritz (1990) drei grundlegende Definitionen für die Erdfigur unterscheiden müssen, eine erste, nämlich die von der physischen Erdoberfläche bzw. topographischen Oberfläche begrenzte feste und flüssige Erde, eine zweite, nämlich den Teil der Erde, der vom Geoid begrenzt wird,

und schließlich eine dritte, nämlich die Normalerde, Referenzerde bzw. Erdmodell, das mathematisch im einfachsten Fall von einem Rotationsellipsoid begrenzt wird und physikalisch eine Gleichgewichtsfigur ist.

Aber die geometrische Figur ist nur ein Aspekt der Erdbeschreibung. Deshalb erscheint es notwendig, den Bruns'schen Gesichtspunkt mit in die Beschreibung eines etwas weiter gefassten Begriffes der Figur der Erde zu integrieren. Buschmann (1992) formuliert es so: "Geodäsie ist die Wissenschaftsdisziplin vom Erkennen von Raum und Zeit im Bereich des Planeten Erde an den Strukturen geeigneter Materieverteilungen und deren zeitlichen Änderungen; solche Strukturen sind insbesondere Erdoberfläche und Erdschwerefeld". Diese Definition der Bestimmung der Erdfigur führt schließlich zu dem Begriff des *dynamisches Erdsystem*, das das geodynamische Geschehen im erdnahen Raum, oberhalb der Erdoberfläche und in einem gewissen Bereich im oberflächennahen Innenraum der Erde umfasst.

Diese geodynamischen Vorgänge in geeignet definierten Bezugsrahmen zu dokumentieren, definiert die Aufgabe, die die Geodäsie zu übernehmen hat. Die Figur der Erde tritt dabei in den Hintergrund und wird damit nur zu einem Teilaspekt des Erdsystems. Hierzu ist es notwendig, terrestrischen und raumbezogenen, geozentrisch und topozentrisch gelagert Bezugssysteme zu definieren und die dazu gehörigen Bezugsrahmen zu realisieren (Abb. 5.2).

Quellen:

- Bialas, V.** (1982): Erdgestalt, Kosmologie und Weltanschauung, Konrad Wittwer, Stuttgart 1982
- Bialas, V.** (1996): Klassische Geodäsie und Weltbild im 19. Jahrhundert, in: Beiträge zum J.J. Baeyer-Symposium, DGK, Reihe E, Heft 25, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1996
- Bruns, H.** (1878): Die Figur der Erde, Publ. Königl. Preuß. Geodätisches Institut, Berlin 1878
- Buschmann, E.** (1992): Gedanken über die Geodäsie, Einige naturwissenschaftliche, technische, philosophische und wirtschaftliche Aspekte, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1992
- Grossmann, W.** (1966): Die Geodäsie als Beispiel einer Approximationswissenschaft, Österr. Zeitschr. f. Vermessungswesen, Nr 2, 54. Jhrg. 1966
- Heiskanen W.A.** (1961): Geodäsie, DGK, Wiss. Übersetzungsdienst, Heft 30, 1961
- Heiskanen W.A., Moritz H.** (1966): Physical Geodesy, W.H. Freeman and Company, San Francisco and London, 1966
- Helmert, F.R.** (1880): Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Teil I, Zweite Auflage, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (Nachdruck), 1962
- Helmert, F.R.** (1884): Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Teil II, Zweite Auflage, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (Nachdruck), 1962
- Helmert, F.R.** (1900): Zur Bestimmung kleiner Flächenstücke des Geoids aus Lothabweichungen mit Rücksicht auf Lothkrümmung; 1. Mitteilung. Sitzungsber. der Kgl. Preuß. Akad. d. Wiss. zu Berlin (1900)
- Hopfner, F.** (1949): Grundlagen der Höheren Geodäsie, Springer-Verlag, Wien 1949
- Kaula, W.M.** (1966): Theory of Satellite Geodesy, Blaisdell Publ. Company, Waltham, 1966
- Listing, J.B.** (1873): Über unsere jetzige Kenntnis der Gestalt und Größe der Erde, Nachrichten Königl. Gesellschaft der Wissenschaften d. G.A. Universität zu Göttingen, 1873
- Moritz, H.** (1990): The Figure of the Earth. Theoretical Geodesy and the Earth's Interior, H. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1990
- Perrier, G.** (1950): Kurze Geschichte der Geodäsie, Wie der Mensch die Erde gemessen und gewogen hat, Bamberger Verlagshaus Meisenbach & Co., Bamberg 1950
- Torge W.** (1989): Gravimetry, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1989
- Torge W.** (2007): Geschichte der Geodäsie in Deutschland, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2007

Spendenaufruf der Deutschen Stiftung Denkmalschutz



DEUTSCHE STIFTUNG
DENKMALSCHUTZ



Der historische
Helmert-Turm
braucht Ihre Hilfe!

<https://www.denkmalschutz.de/denkmal/Helmert-Turm.html>

Instrumente und Geräte für geodätische Arbeiten und Forschungen am Geodätischen Institut Potsdam unter dem Direktorat von Friedrich Robert Helmert

Joachim Höpfner

1. Einführung

Die Anfänge der Geodäsie finden sich in den Kulturen von Ägypten und Mesopotamien vor etwa fünf Jahrtausenden. Zuerst ist es die Landvermessung, für deren Aufgaben Mess- und Auswertemethoden entwickelt wurden. Dabei dienten zur Längenmessung Seile und Stangen und zur Absteckung rechter Winkel entsprechende einfache Instrumente. Mit der wissenschaftlichen Frage nach der Größe der Erde kam die Erdmessung als ein neues Arbeitsgebiet hinzu, das aber anfänglich durch die Astronomie mit bearbeitet wurde.

Die Mathematik lieferte mit der Arithmetik und Geometrie die für die Geodäsie benötigten Grundlagen. Seitens der Geographie gab es ein besonderes Interesse an Karten, die auf einem geometrischen Gerüst beruhen. Um ein Festpunktnetz zur Kartenherstellung aufzubauen, waren Entfernungen zwischen ausgewählten Festpunkten zu messen und astronomische Ortsbestimmungen auszuführen. Zur Umrechnung astronomischer Koordinaten in geodätische Koordinaten und umgekehrt, war es nötig, den Erdumfang zu bestimmen und daraus den benötigten Erdradius zu berechnen. Mit der Erkenntnis, dass die Erde an den Polen abgeplattet ist, stellte sich die Aufgabe nach der Größe der Erde neu, nämlich die Abmessungen für das abgeplattete Erdellipsoid aus genauen Erdmessungen herzuleiten.

Was die zeitliche Entwicklung der Geodäsie angeht, so gab es ganz unterschiedliche Entwicklungsphasen bis in die Neuzeit. Hierzu ist festzustellen, daß speziell im Mittelalter durch das christlich bestimmte Weltbild die Geodäsie keine Fortentwicklung erfahren hat. In der Renaissance kommt es zur Wiederbesinnung auf die alten Kulturen und, indem sich die Naturwissenschaften von der Theologie befreien, werden die Interessen an der geographischen Erkundung und kartographischen Erfassung der Erde befördert. Das war die Zeit der europäischen Entdeckungsreisen und des wachsenden Handels zu Lande und zu Wasser in ferne Länder. Ferner kommt es zu einem rasanten Fortschritt in Wissenschaft und Technik durch die moderne wissenschaftliche Naturforschung, die Galileo Galilei (1564-1642) begründete. Fortschritte in der Messtechnik waren für den wissenschaftlichen Instrumentenbau von großer Bedeutung. Zuerst meist durch Erfindungen beim Bau astronomischer Beobachtungsinstrumente gemacht, kamen sie im geodätischen Gerätebau ebenso zur Anwendung.

Im 19. Jahrhundert haben die politischen Ereignisse in Europa große Auswirkungen in bezug auf territoriale Umverteilungen und die weitere Entwicklung der Staaten gehabt. Die praktische Vermessung gewann zunehmende Bedeutung. Einerseits waren genaue geodätische Grundlagen für die Herstellung topographischer Karten, andererseits für den Aufbau der Grundsteuerkataster zu erstellen. Um geodätische und astronomische Messungen von hoher Qualität ausführen zu können, war der Bedarf an modernen Präzisions-Messinstrumenten enorm. Deshalb wurden zahlreiche feinmechanisch-optische Werkstätten gegründet.

Zunächst wurden in deutschen Ländern und anderen Staaten Europas Landstriangulationen ausgeführt. Dann hatten die Länder mit ihrem Beitritt zur Mitteleuropäischen Gradmessung ihre Triangulationen zu homogenisieren und zu verbinden. Außerdem waren geodätisch-astronomische Längen-, Polhöhen- und Azimutbestimmungen für die Gradmessungen vorzunehmen. Ende des 19. Jahrhunderts sind die praktischen Arbeiten der Gradmessungen in Europa weitgehend abgeschlossen worden. Daraufhin lag der neue Schwerpunkt auf Schwerebestimmungen mit Pendelapparaten. Das heißt, engmaschige Schwerenetze waren zu messen. Ferner kam noch hinzu, das Problem der Polbewegung zu studieren.

Zuerst werden die wichtigsten politischen Ereignisse und ihre Auswirkungen in Europa im 19. Jahrhundert aufgezeigt. Dann werden die technische Entwicklung im naturwissenschaftlichen Bereich seit dem 16. bis Ende des 18. Jahrhunderts sowie die Umstände für die rasante Entwicklung des wissenschaftlichen Instrumentenbaus in Deutschland im 19. Jahrhundert betrachtet. Zur Information über die bedeutenden mechanischen und optischen Werkstätten in dieser Zeit ist eine Übersicht über diese Firmen gegeben. Schließlich werden geodätische, geodätisch-astronomische und geowissenschaftliche Instrumente und Apparate einschließlich Zubehör hinsichtlich Besonderheiten und Verbesserungen dargestellt, welche am Geodätischen Institut Potsdam (GIP) unter dem Direktorat von Friedrich Robert Helmert angewandt wurden.

2. Historische Ereignisse und ihre Auswirkungen in Europa im 19. Jahrhundert

Wie die Entwicklung in Europa im 19. Jahrhundert verlief, soll durch einige historische Ereignisse deutlich gemacht werden.

Die Französische Revolution von 1789 bis 1799 führte zur Abschaffung des feudal-absolutistischen Staates mit König Ludwig XVI. Ab Nov. 1799 wurde Napoleon Bonaparte (1769-1821) Erster Konsul und Oberhaupt einer Französischen Republik, ab 1804 deren Kaiser. Im Kaiserreich Frankreich wurde ein moderner Verwaltungsapparat geschaffen.

Wechselnde Koalitionen europäischer Mächte gegen das revolutionäre Frankreich versuchten die Ideen der Französischen Revolution und ihre Auswirkungen einzudämmen bzw. zu verhindern. Kriegerische Auseinandersetzungen gab es von 1792 bis 1815, insgesamt fünf sogenannte Koalitionskriege, ab 1803 auch als Napoleonische Kriege bzw. ab 1813 als Befreiungskriege bezeichnet.

1794 eroberten französische Armeen linksrheinische Gebiete Deutschlands, die sie 1798 in vier Departements einteilten und nach französischem Vorbild verwalteten. 1806 wurde auf Initiative Napoleons der Rheinbund aus Staaten, die aus dem Verband des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation austraten, gebildet. Sonach endete der Reichsverband. Nach französischem Muster wurden Reformen bzw. Institutionen auch in kleinen, Napoleon loyal gesinnten deutschen Staaten durchgeführt, nämlich Bayern, Baden, Württemberg, Nassau und Sachsen.

1806 gab es das Bündnis von Preußen mit Sachsen gegen Napoleon. Nach seiner Zerschlagung avancierte Sachsen zum Königreich von Napoleons Gnaden; Preußen erlitt eine vernichtende Niederlage in der Schlacht bei Jena und Auerstedt. 1807 wurde der Frieden von Tilsit geschlossen, wodurch Preußen auf seine rechtselbischen Kernräume beschränkt wurde, d. h. Ost- und Westpreußen (ohne Danzig), Pommern, Schlesien und Brandenburg (ohne Altmark).

Von 1807 bis 1813 wurden in Preußen umfangreiche Reformen (auch Stein-Hardenbergsche

Reformen genannt) umgesetzt: Staats- und Verwaltungsreformen, Bildungsreform, Gewerbefreiheit und Heeresreform.

1812 war der sogenannte Russlandfeldzug Napoleons, von 1813 bis 1815 wurden die Befreiungskriege geführt, speziell vom 16. bis 19. Oktober 1813 war die Völkerschlacht bei Leipzig, in welcher Frankreich durch Russland, Österreich und Preußen besiegt wurde. In den Jahren 1812 bis 1814 schließlich brach das napoleonische Staatensystem zusammen, aber der grundlegende Einfluss der französischen Herrschaft auf die Herausbildung des modernen Europa blieb.

Von 1814 bis 1815 fand der Wiener Kongreß zur Neugliederung Europas statt, und Preußen konnte sein Territorium erheblich erweitern. Die Beschlüsse erhoben das Königreich Preußen zur stärksten Macht Norddeutschlands von den Rheinlanden und Westfalen über die erweiterten Mittelprovinzen (Gebiete von Sachsen) bis nach West- und Ostpreußen. Als Ergebnis des Wiener Kongresses wurde der Deutsche Bund, eine Konföderation aus 39 Staaten, welche zuvor dem Heiligen Römischen Reich oder dem napoleonischen Rheinbund angehörten, gebildet. Er bestand bis 1866.

1818 wurde ein einheitliches preußisches Zollgebiet durch ein Zollgesetz eingeführt.

1834 schlossen sich mehrere Staaten des Deutschen Bundes im Deutscher Zollverein zur Schaffung eines wirtschaftlichen Binnenmarktes zusammen. Bis 1888 erfuhr das Zollgebiet mehrere Erweiterungen durch den Beitritt weiterer deutscher Staaten.

1866 stimmte Österreich der Auflösung des Deutschen Bundes und den preußischen Annexionen der Territorien Hannover, Schleswig-Holstein, Nassau, Hessen-Kassel nebst Frankfurt als Folge der Niederlage im Krieg mit Preußen zu.

1871 brachte der Krieg mit Frankreich den Armeen von Preußen und Süddeutschland große Siege. Noch vor dem Friedensschluss wurde das Deutsche Reich gegründet und König Wilhelm I. (1797-1888) von Preußen zum Deutschen Kaiser in Versaille proklamiert.

3. Technische Entwicklung im naturwissenschaftlichen Bereich seit dem 16. bis Ende des 18. Jahrhunderts

Erst mit dem Ausgang des Mittelalters kam es zu einer technischen Entwicklung im naturwissenschaftlichen Bereich. Zuerst stellten Wissenschaftler ihre Geräte und Instrumente noch selbst her, dann in Kooperation mit Handwerkern. Diese spezialisierten sich zunehmend auf den wissenschaftlichen Geräte- und Instrumentenbau, und auf diese Weise wurde der Beruf Mechanikus geboren. Ende des 16. Jahrhunderts gab es große Fortschritte auf dem Gebiet der Optik. Sonach wurden die verschiedenen Winkelmessgeräte mit Fernrohren statt Dioptern gebaut. Tabelle 1 zeigt eine chronologische Auflistung von Erfindungen, die für Fortschritte in der Messtechnik sehr bedeutsam waren.

Tabelle 1. Wichtige Erfindungen für Fortschritte in der Messtechnik

<i>Zeit</i>	<i>Erfinder</i>	<i>Erfindung</i>
1525	Jan Fernel	Quadrant
1542	Pedro Nunez	Nonius nach Transversalen mit äußerer und innerer Teilung
1606	Hans & Zacharias Jansen	Mikroskop

1608	Hans Lipperhey; Adriaan Metius	Fernrohr
1610	Johannes Kepler	astronomisches Fernrohr
1631	Petrus Vernerius	Nonius als bewegliche Skale am Quadranten
1640	William Gascoigne	Fadennetz in Brennpunktebene des Fernrohrs
1645	Evangelista Torricelli	Quecksilberbarometer
1656	Christian Huygens	Pendeluhr
1661	Melchisédech Thévenot	Röhrenlibelle
1667	Jean Picard, Adrien Auzout	Fadenkreuz im Fernrohr, Mauerquadrant mit Fernrohr
1715	Gabriel Fahrenheit	Quecksilberthermometer
1731	John Hadley	Oktant, Sextant
1752	Tobias Mayer	Wiederholungs- oder Repetitionskreis
1762	John Harrison	erste Uhr mit hoher Ganggenauigkeit für die Seefahrt
1770	John Dollond	Theodolit
1777	Johann Tobias Mayer	Dosenlibelle
1785	Jean Charles Borda	Borda-Kreis
1787	Jesse Ramsden	Mikroskop-Mikrometer, Großer Theodolit
1802	Georg von Reichenbach	Repetitions-Theodolit
1820	Carl Friedrich Gauß	Heliotrop (Sonnenspiegel)
1880	Sigmund Riefler	temperaturkompensiertes Sekunden-Pendel aus Invar-Stahl
1897	Carl Edward Johansson	Parallelenmaß

Im 18. Jahrhundert angeschaffte astronomische und geodätische Geräte sind vor allem von John Dollond und anderen Londoner Werkstätten gebaut worden. Ferner waren es Pariser Firmen, wie Lenoir (baute Borda-Kreis) und Gambey. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über diese Werkstätten. Als Produktionsstandorte für den wissenschaftlichen Instrumentenbau spielten Berlin und Potsdam zu dieser Zeit noch keine Rolle. Im süddeutschen Raum gab es aber schon eine leistungsstarke Werkstatt, die 1734 Georg Friedrich Brander (1713-1783) in Augsburg gegründet hatte, die handliche Spiegelsextanten und Scheibeninstrumente (Theodolite) fertigte. Ab 1775 war es die Firma Brander & Höschel. Sie existierte noch bis 1844.

Tabelle 2. Mechanisch-optische Werkstätten im 18. Jahrhundert

Jahr	Instrument(e)	Mechaniker	Zeitraum
<i>Londoner Werkstätten</i>			
1730	erster moderner Theodolit	John Sisson	gegr. 1690-1760
1757	erstes achromatisches Fernrohr (Linsen aus Kron- und Flintglas)	John Dollond sen.	gegr. 1706-1761
1770	Theodolit	John Dollond jun.	gegr. 1766-1804
1768	Mauerquadrant aus der Werkstatt von	John Bird	gegr. 1709-1776
1787	Great Theodolite	Jesse Ramsden	gegr. 1730-1800
	Kreisteilmaschine & geodätische Geräte Sextant	Edward Troughton	gegr. 1753-1836

Pariser Werkstätten

1752	<i>Quadrant</i>	<i>Claude Langlois</i>	<i>gegr. 1730-1754</i>
1785	<i>Konstruktion: Borda-Kreis</i>	<i>Jean Charles Borda</i>	<i>gegr. 1733-1799</i>
	<i>Borda-Kreis aus der Werkstatt von</i>	<i>Étienne Lenoir</i>	<i>gegr. 1776-1827</i>
	<i>Theodolit</i>	<i>Henri Prudence Gambey</i>	<i>gegr. 1787-1847</i>

4. Die Entwicklung des wissenschaftlichen Instrumenten- und Gerätebaus in Deutschland im 19. Jahrhundert

Die von 1792 bis 1815 gegen Frankreich geführten Koalitionskriege beeinflussten die deutschen Länder in besonderer Weise. Wie Tabelle 3 zeigt, wurden in besetzten und annektierten Gebieten Landesvermessungen und topographische Aufnahmen durch französische Ingenieurgeographen durchgeführt. Für die Winkelmessungen in den Triangulationsnetzen wurde der Borda-Repetitionskreis verwendet.

Tabelle 3. Landesvermessungen französischer Ingenieurgeographen in Napoleonischer Zeit

<i>Zeit</i>	<i>Gebiete / Land</i>	<i>Leitung</i>
<i>1801-1813</i>	<i>Linksrheinische Gebiete</i>	<i>Colonel Jean Joseph Tranchot, 1792-1815</i>
<i>1803-1813</i>	<i>Ober rheingebiet</i>	<i>Oberst Maurice Henry, 1763-1825</i>
<i>1801-1807</i>	<i>Bayern</i>	<i>Oberst Charles Rigobert Marie Bonne, 1771-1839</i>
<i>1803-1807</i>	<i>Kurfürstentum Hannover</i>	<i>Eskadronchef François Anatoile Epailly, 1769-1856</i>

Später wurden die französischen geodätischen Arbeiten in den betreffenden Gebieten und Ländern als Landesaufnahmen weitergeführt bzw. ausgedehnt.

Es hatte sich gezeigt, dass für die Länder genaue Karten benötigt werden, um auf deren Grundlage eine gerechtere Besteuerung auf Grund und Boden durchsetzen zu können und die Staatseinnahmen zu verbessern. Ferner waren gute topographische Karten für militärische Einsätze von großem Interesse. Deshalb modernisierten auch die anderen deutschen Länder ihre Verwaltungen, wobei die staatlich organisierte Vermessung einen hohen Stellenwert erhielt.

Sextant, Quadrant und Oktant waren Winkelmessgeräte der 1. Generation. Um Landestriangulationen im 19. Jahrhundert zu bewältigen, wurden an die Winkelmessgeräte höchste Anforderungen bezüglich Qualität und Genauigkeit gestellt. 1804 hat Georg von Reichenbach (1771-1826) das Verlangen nach felddauglichen Präzisionstheodoliten erfüllt, indem er solche Theodolite herstellen konnte. Sie waren die von der Größe handlich, hatten zahlreiche richtungsweisende Neuerungen und blieben über ein Jahrhundert Vorbild für den geodätischen Instrumentenbau. Die in München gegründete Werkstatt für wissenschaftliche Instrumente musste bald erweitert werden und firmierte danach als „Mathematisch-Mechanisches Institut von Reichenbach, Utzschneider und Liebherr“.

In den Jahrzehnten nach dem Wiener Kongress 1814/1815 gab es einen enormen Auftrieb für den Instrumenten- und Gerätebau; erste namhafte deutsche Werkstätten wurden gegründet.

In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts haben die folgenden Umstände die rasante Entwicklung des Instrumenten- und Gerätebaus noch befördert:

- Gründung der Mitteleuropäischen Gradmessung 1862 und
- Gründung des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts 1870 in Berlin.

General-Lieutenant z. D. Johann Jacob Baeyer (1794-1885), der von 1843 bis 1857 die Trigonometrische Abteilung im Preußischen Generalstab geleitet hatte, war der Initiator und Begründer beider Institutionen. Seine Vorschläge sind publiziert in:

Baeyer, J. J. Entwurf zu einer Mitteleuropäischen Gradmessung. April 1861.

Als Sonderdruck. 5 p. und

Baeyer, J. J. Ueber die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mittel-europäischen Gradmessung nebst einer Uebersichtskarte. Berlin: Druck und Verlag von Georg Reimer, 1861. 111 p.

Ziel der Mitteleuropäischen Gradmessung war, die Landstriangulationen zu homogenisieren und zu verbinden, diese Ergebnisse geodätisch-astronomischen Lotrichtungsmessungen gegenüberzustellen und auf diese Weise Strukturen des Geoids zu untersuchen.

Ab 1. Jan. 1886 übernahm Prof. Dr. Friedrich Robert Helmert (1843-1917) die Funktionen Johann Jacob Bayers nach dessen Tod als Direktor des Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Erdmessung. 1891/1892 erfolgte der Umzug des Geodätischen Instituts und Zentralbüros der Erdmessung von Berlin nach Potsdam in einen Neubau auf dem Potsdamer Telegrafenberg. Im Statut für das Königliche Geodätische Institut von 1887 wurden die Aufgaben in Themenkomplexe gegliedert. Durch zahlreiche Anregungen von Wissenschaftlern beider Institutionen sind wichtige Verbesserungen an Instrumenten und Apparaten vorgenommen worden. Ferner sind zu nennen:

Die Deutsche Gesellschaft für Mechanik und Optik, gegründet 1879 als Vereinigung Berliner Mechaniker und Optiker und erweitert 1881 über das Deutsche Reich. Im selben Jahr wurde die Zeitschrift für Instrumentenkunde als ihr Publikationsorgan begründet. Diese Vereinigung hat wesentlich dazu beigetragen, dass der wissenschaftliche Instrumentenbau eine internationale Spitzenstellung erlangte. Zu den Gründungsmitgliedern gehörten die Instrumenten- und Gerätebauer Carl Bamberg (1847-1892) und Rudolf Fuess (1838-1917). Bedeutendste Förderung erfuhr die deutsche Präzisionstechnik durch die im Jahre 1887 begründete Physikalisch-Technische Reichsanstalt mit zwei Abteilungen:

- Erste, wissenschaftliche Abteilung der reinen physikalischen Forschung
- Zweite, technische Abteilung der Feinmechanik.

Im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts entwickelte sich das Gewerbe im Raum von Berlin und Potsdam mit einer enormen Dynamik, so dass man um 1900 hier einen der weltweit führenden Produktionsstandorte vorfand. Eine Übersicht über mechanische und optische Werkstätten in Deutschland vom Beginn 1734 an enthält Anhang A.

5. Geodätische, geodätisch-astronomische und geowissenschaftliche Instrumente am Geodätischen Institut Potsdam unter dem Direktorat von F. R. Helmert

5.1 Aufgaben des Geodätischen Instituts Potsdam

Die Aufgaben des 1870 gegründeten Königlich Preußischen Geodätischen Instituts bestanden in der Erledigung der Geschäfte des Zentralbüros der Europäischen Gradmessung, der Ausführung der preußischen Gradmessungsarbeiten und der Pflege der wissenschaftlichen

Geodäsie. Zuerst vor allem mit der Erdmessung befasst, führten neue Erkenntnisse und Entwicklungen dazu, dass man sich weiteren Arbeiten in großem Umfange widmete. Nachdem Friedrich Robert Helmert die Funktionen Johann Jacob Baeyers als Direktor des Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Erdmessung im Jahre 1886 übernommen hatte, wurden deswegen die Institutsaufgaben durch das Statut von 1887 neu geregelt. Hiernach betrafen die Arbeiten und Forschungen nachstehende Themenkomplexe:

- Wissenschaftliche Untersuchungen und Messungen zur Erforschung der Gestaltung der Erde,
- Bestimmungen der Intensität der Schwere an möglichst vielen Punkten,
- Untersuchungen der mittleren Lage und der Schwankungen des Meeresspiegels und
- Untersuchungen über die Hilfsmittel und Methoden der Arbeiten.

In den nachstehenden Abschnitten werden die zu den ausgeführten geodätischen, geodätisch-astronomischen und geophysikalischen Arbeiten verwendeten Instrumente und Apparate sowie Zubehör beschrieben. Ferner werden zweckmäßige Verbesserungen und richtungsweisende Neuerungen behandelt.

5.2 Theodolite und Universalinstrumente

Triangulationsarbeiten wurden durch das Geodätische Institut von 1867 bis 1886 ausgeführt. Dabei handelte es sich um die Beobachtung und Bearbeitung folgender Dreiecksnetze: Märkisch-Thüringisches Dreiecksnetz, Hessisches Dreiecksnetz und Rheinisches Dreiecksnetz. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über diese Dreiecksnetze, wobei als Genauigkeitskriterium von jeder Konfiguration der mittlere Winkelfehler nach Ferrero berechnet wurde. Zum Vergleich beträgt gemäß Generalbericht für 1892 der aus 6848 Hauptdreiecken aller europäischer Staaten erhaltene mittlere Fehler $\pm 1,16''$. Weiter wurden Anschlüsse an die Nachbartriangulationen gemessen, speziell zu Belgischen Dreiecken, zum Schweizerischen Dreiecksnetz und zu älteren süddeutschen Triangulationen.

Für die Winkelmessungen wurden 2 gleiche 10zöllige Universal-Instrumente (No. I und II) von Pistor & Martins, Berlin verwendet. Abb. 1 zeigt ein solches Instrument. Technische Angaben für das 10zöllige Universal-Instrument von Pistor & Martins, Berlin von 1851 sind nachstehend aufgeführt:

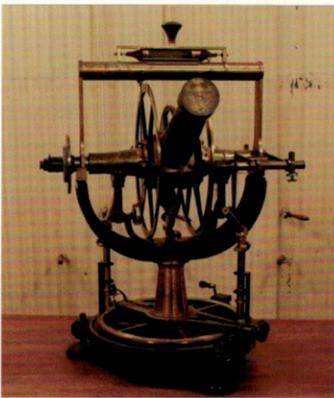


Abb. 1: 10zölliges Universal-Instrument von Pistor & Martins in Berlin

Material: Messing, Bronze und Stahl
 Maße: Breite 40 cm, Höhe 80 cm
 Horizontalkreis: 10 Zoll;
 Vertikalkreis: 10 Zoll (1 Zoll = 2,54 cm)
 Teilung: 5'
 Gerades Fernrohr: Objektivdurchmesser 60 mm,
 Brennweite ca. 800 mm
 Ablesung an 2 Mikroskopen auf 0,1''
 Messgenauigkeit der Winkel: ca. $\pm 15''$

1895 wurde das 10zöllige Universalinstrument No. I nachgerüstet durch ein neues Objektiv mit 47 mm Öffnung und etwa 52 cm Brennweite von Reinfelder & Hertel in München.

Tabelle 4. Dreiecksnetze, beobachtet und bearbeitet durch das Geodätische Institut Potsdam

Beob.- Zeitraum	Netz	Anzahl Punkte	Anzahl Gegensichten	Winkelgl.	Seitengl.	Winkelfehler nach Ferrero
1867-1877	Rhein. Netz	32	77	46	16	$\pm 0,73''$
	+ Nebennetz	36	93	58	24	
1867-1876	Hessisches N.	12	64	21	11	$\pm 0,84''$
1867-1876	Märkisch- Thüring. N.	25	55	33	16	$\pm 0,61''$

1886 waren am Geodätischen Institut Potsdam (GIP) vorhanden: 5 Universalinstrumente mit mikroskopischer Ablesung von Pistor & Martins in Berlin. Weiter wurden neu angeschafft: 1890 Brunnerscher Theodolit, 1893 Universalreisetheodolit von Hildebrand in Freiberg in Sachsen, Horizontalkreis 8 cm, Vertikalkreis 9,5 cm Durchmesser, mit Distanzmesser und Stativ sowie Universalreisetheodolit von Heyde in Dresden, mit mikrometrischer Ablesung der Kreise, Kreise 8 cm Durchmesser, nebst Stativ.

Libellen sind unentbehrliche Hilfsmittel der Geodäsie und Astronomie. Sie haben deutliche Verbesserungen in dieser Zeit durch gute Glassorten für ihre Rohre und deren zweckmäßige Lagerung gegen wechselnde Temperatureinflüsse und in bezug auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit erfahren. Zwei Lösungen sind in Abb. 2 dargestellt:

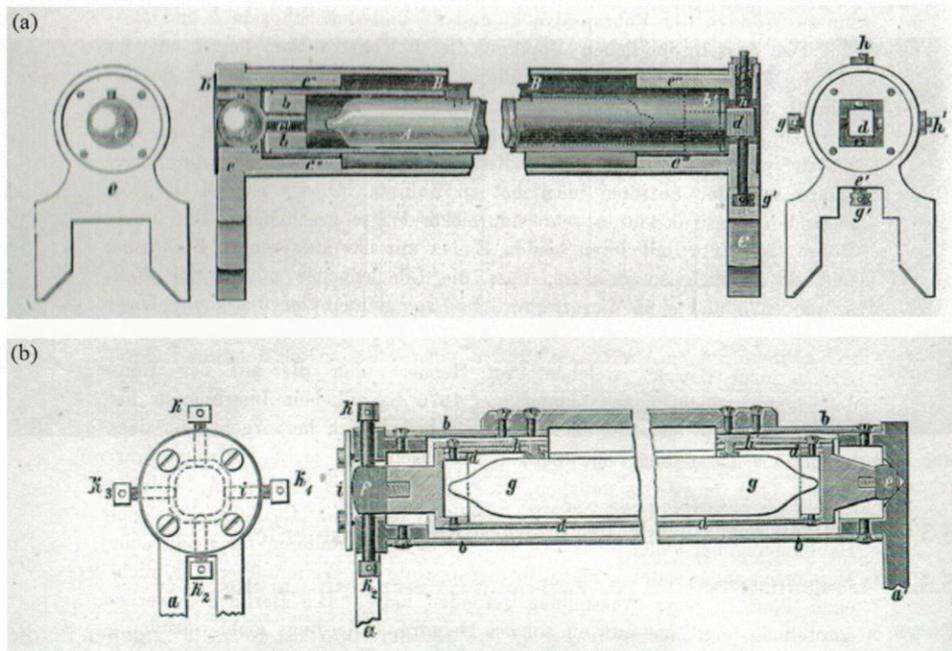


Abb. 2: Libellen, dargestellt (a) gemäß Lösung von Carl Reichel in Berlin und (b) gemäß Lösung von Carl Bamberg in Friedenau (Loewenherz 1880) von Pistor & Martins in Berlin

(a) Lösung von Carl Reichel in Berlin mit doppelten Umhüllungsrohren, speziell äußere Fassungsrohre und innere Fassungsrohre mit Glasrohr, die mittels Kugel und Vierkant zur

äußeren verbunden ist, Lagerung in Baumwolle und Anwendung von 2 Korrekturschrauben mit 2 entgegen wirkenden Federn sowie

(b) Lösung von Carl Bamberg in Friedenau in doppelter Fassung, speziell äußeres Fassungsrohr mit Tuch überzogen und Holzgriff; inneres Fassungsrohr mit darin gelagertem Glasrohr endet in einer Stahlkugel bzw. vierseitigem Prisma mit Lagerung zwischen 4 festen Punkten und 2 Federn sowie 4 Korrekturschrauben.

Auf den Zielpunkten in den Triangulationsnetzen wurde mit einem Spiegel in Richtung des jeweiligen Messstationspunktes reflektiertes Sonnenlicht von Bertramschen Heliotropen (vorhandene Anzahl: 28) als Signal verwendet. Bei diesen Heliotropen handelt es sich um eine von Bertram 1837 angegebene Konstruktion. Das in Abb. 3 gezeigte Signalisierungsgerät zeichnet sich dadurch aus, dass es leicht zu handhaben ist. Anders als das Gaußsche Heliotrop hat es ein Eichenholzbrett von 52,5 cm Länge, 10 cm Breite und 2 cm Stärke als Grundplatte. Siehe Abb. 3 (von links nach rechts). An der einen Schmalseite sind 2 kurze Metallfüßchen und an der anderen eine Höhenverstellungsschraube als die 3 Fußpunkte befestigt, ferner ist in der Mitte der Platte die Vertikalachsenschraube zum Befestigen auf der Unterlage eingelassen. In eine Messingbuchse ist ein gerahmtes Fadenkreuz als Objektiv mit einem klappbaren Visierrohr und in die andere ein quadratischer Spiegel mit einem mittigen Okularloch einzustecken. Das Heliotrop ist bei hochgeklapptem Visierrohr auf den Stationspunkt auszurichten. Dann wird das Visierrohr wieder eingeklappt und der Spiegel so gedreht, dass sich in der Mitte des Rohres ein runder Schatten vom Okularloch zeigt. Diese Schattenstellung hat der Heliotropist zu beobachten und zu erhalten, indem er den Spiegel von Zeit zu Zeit nachstellt.



Abb. 3: Bertramsches Heliotrop (Aufnahme: Autor)

5.3 Geodätisch-astronomische Beobachtungsinstrumente

5.3.1 Passageinstrumente zur Zeit- und Breitenbestimmung

Es waren geodätisch-astronomische Längen-, Polhöhen- und Azimutbestimmungen für die Gradmessungen auszuführen. Ferner mussten astronomische Zeitbestimmungen an Schwerstationen zur Kontrolle der Stationsuhr gemacht werden. Ab 1889 wurden Breitenbestimmungen und ab 1892 Zeitbestimmungen am geodätisch-astronomischen Observatorium des Instituts gemacht, welche die Grundlage für den Potsdamer Breiten- und Zeitdienst bildeten. Die angewandten Methoden waren

für Polhöhenbestimmungen

- Messung der Zenitdistanzen von Nord- und Südsterne aus dem Jahrbuch (Sternecksche Methode) und
- Durchgangsbeobachtungen durch den Ost-West-Vertikal, für Azimutbestimmungen
- Direkte Winkelmessung zwischen einem polnahen Stern und der Richtung nach einem irdischen Objekt mit Universalinstrument und
- Messungen nach einer oder mehreren im Vertikal der Polsterne gelegenen Marken mit Passageinstrument und

für Zeit- bzw. Längenbestimmungen

- Beobachtung von Meridiandurchgangszeiten von Sternen.

Die mittleren Ungenauigkeiten für die geodätisch-astronomischen Stationen der Gradmessungen betragen: $\pm 0,034$ s in Länge, zwischen $\pm 0,26$ und $\pm 0,40''$ in Breite und zwischen $\pm 0,56''$ und $\pm 0,79''$ im Azimut.

Als Beobachtungsinstrumente für Zeit- bzw. Längen- und Polhöhenbestimmungen waren vorhanden:

- Passageinstrument No. I von Pistor & Martins in Berlin
- Passageinstrument No. II von Pistor & Martins, rekonstruiert 1912

8zölliges Passageinstrument von Pistor & Martins Nr. 9326, Objektiv von Steinheil in München

- Passageinstrument No. III von Carl Bamberg zur Breitenbestimmung nach Horrebow mit Mikrometerokular, 1892 aufgerüstet durch elektrische Beleuchtung des Gesichtsfeldes.



Abb. 4: Passageinstrument von Carl Bamberg in Berlin

Nachstehend sind Angaben zum Instrument genannt: Objektiv aus Jenaer Glas mit 82 mm Öffnung und 92 cm Brennweite, 3 Okulare von 85, 115 und 145facher Vergrößerung; die beiden zur Ausbalanzierung der Horizontalachse dienenden Stützen werden durch einen Waagebalken getragen. Abb. 4 zeigt das Passageinstrument von Carl Bamberg in Berlin auf dem Untersatz mit Azimutkorrektur-Einrichtung gemäß Vorschlag von Theodor Albrecht.

Besonderheiten von Passageinstrumenten sind:

- Gebrochenes Fernrohr
- Umlegevorrichtung für das gebrochene Fernrohr
- Hängelibelle und
- Registriermikrometer am Okular.

Ein Registriermikrometer machte es möglich, einen beweglichen Faden dem Stern nachzuführen, wobei die Durchgangszeiten mit einem Chronographen registriert werden.

Wichtige Verbesserungen an Passageinstrumenten waren:

- Umwandlung der Friktionsrollen in einen Waagebalken, wodurch das Gerät fast frei vom Kollimationsfehler ist,
- Repsoldsche Einrichtung, wodurch persönliche Fehler reduziert werden, unpersönliches Mikrometer, nachgerüstet 1891 an den Passageinstrumenten No. II und III, und
- Sekundenlibelle von Peßler & Sohn in Freiberg in Sachsen, angeschafft 1913 für das Passageinstrument No. II.

5.3.2 Azimutaltransit oder Universaltransit (Durchgangstheodolit)

Abb. 5 zeigt das Universal-Transit von Carl Bamberg von 1879. Nachstehend sind Angaben zum Universal-Transit gemacht:

- Entwurf des Instruments: Wilhelm Foerster, Berlin
- Hersteller: Firma Carl Bamberg in Berlin
- Objektiv von Hugo Schröder in Hamburg, Objektivöffnung 115 mm, Brennweite 129 cm.

In den Jahren 1884 und 1885 beobachtete Friedrich Küstner am Berliner Observatorium am Universal-Transit in Meridianstellung Sternpaare nach der Horrebow-Talcott-Methode und fand eine Breitenvariation. Daraufhin begannen intensive Bemühungen zur Untersuchung der Polbewegung mittels simultaner Breitenbeobachtungen.

1890 wurde ein Azimutaltransit (Durchgangstheodolit), gefertigt von den Gebr. Repsold in Hamburg, durch das Geodätische Institut Potsdam angeschafft.



Abb. 5: Universal-Transit von Carl Bamberg in Berlin

Angaben zum Instrument:

- gebrochenes Fernrohr mit Objektivöffnung von 68 mm und Objektivbrennweite von 79 cm
- Okulareinrichtung befindet sich an einem Ende der Horizontalachse
- 3 Okulare geben 70-, 105- und 140fache Vergrößerung
- Mikrometerschraube am Fernrohrökularkopf (1 Revolution = 88''): Registriermikrometer von Repsold
- Umlegevorrichtung
- ausgerüstet mit 2 Libellen von 1 Sekunde Teilwert ($1p = 1,8 \text{ mm}$)
- verdeckter Teilkreis von 40 cm Durchmesser mit 4'-Teilung
- 2 diametrale Mikroskope mit Ablesung von Doppelsekunden.

Anwendung zu azimutalen Winkelmessungen sowie zu Durchgangsbeobachtungen von Sternen bis 7. Größe.

Von 1894 bis 1900 hat L. Haasemann mit dem Azimutaltransit auf dem Helmer-Turm wiederholt Azimutbestimmungen der beiden Fernmarken (nördlich im Königswalde bei Nedlitz und südlich auf dem Kleinen Ravensberg) mit dem Stern α Urs. min. bei unterer und oberer Kulmination zwecks Untersuchung einer Veränderlichkeit des Azimuts ausgeführt.

5.3.3 Zenitteleskope zur Breitenbestimmung

1891 wurde bereits ein visuelles Zenitteleskop von Julius Wanschaff in Berlin mit 2 Libellen von Carl Reichel in Berlin für die Expedition von Adolf Marcuse nach Honolulu (im Archiv des GFZ Potsdam) hergestellt.

Um das Problem der Polbewegung genauer zu studieren, wurde 1899 der Internationale Breitendienst (ILS) als erste weltweite wissenschaftliche Kooperation gestartet, indem auf 5 auf dem gleichen Parallel von 39°08' N liegenden Stationen Breitenbestimmungen

mit visuellen Zenitteleskopen ausgeführt wurden. Weiter von 1906 an wurden auch 2 Internationale Breitenstationen (Oncativo, Westaustralien und Bayswater, Argentinien) auf dem gleichen Parallel von $31^{\circ}55' S$ für einige Jahre betrieben.



Zenitteleskop

für die Stationen

Mizusawa, Carloforte, Galthersburg und Ukiah.

Abb. 6: Zenitteleskop für die Stationen des Internationalen Breitendienstes (ILS) von Julius Wanschaff in Berlin

Die Zenitteleskope für die ILS-Stationen Mizusawa (Japan), Carloforte (Italien), Galthersburg (USA und Ukiah (USA) wurden von der Firma Julius Wanschaff in Berlin gebaut und dafür die optischen Teile von Carl Zeiss in Jena und die Libellen von Carl Reichel in Berlin gefertigt. Abb. 6 zeigt ein solches Beobachtungsinstrument.

Angaben zum visuellen Zenitteleskop:

Objektivöffnung 108 mm, Brennweite 130 cm, 104fache Vergrößerung.

Besonderheiten des Gerätes:

- exzentrisches Fernrohr mit Zenitdistanz-Einstellungskreis
- gebrochener Okularauszug mit Okularmikrometer (Revolutionswert $40''$)
- Fadennetz mit 11 festen Fäden
- 2 Horrebow-Libellen (Sekundenlibellen)
- Aufsatzlibelle.

Angewandtes Beobachtungsverfahren:

Horrebow-Talcott-Methode, d. h. mikrometrische Messung von Zenitdistanzdifferenzen für Sternpaare, wobei aufeinanderfolgend ein Südstern und ein Nordstern in oberer Kulmination in verschiedener Lage der Kippachse (Drehung der Stehachse um 180°) beobachtet werden und in umgekehrter Reihenfolge.

5.4 Apparate für Untersuchungen von Teilkreisen und Libellen

Im Verlauf des 19. Jahrhundert wurden die Kreisteilungen der Präzisions-Winkelmeßgeräte durch die Instrumentenbauer deutlich verbessert. Deshalb war es naheliegend, die Kreise älterer Instrumente neu zu teilen. Zwecks Information über Neuteilungen der Kreise von bei der Haupttriangulation verwendeter Instrumente sei auf die im Aufsatz „Die Hauptdreiecke der Königlich Preussischen Landestriangulation“ von Matthiass (1903) gegebene Übersicht verwiesen. Wegen der besseren Teilung der Kreise hat sich der mittlere in einer Richtungsbeobachtung enthaltene totale Teilungsfehler deutlich verringert, und zwar von $0,82''$ auf $0,34''$.

Um Teilkreise und Libellen prüfen zu können, wurden nachstehende Apparate am Geodätischen Institut Potsdam angeschafft: ein Kreisteilungsprüfer von Julius Wanschaff in Berlin, 1886 ein Niveauprüfer von Carl Reichel in Berlin und 1897 ein Großer Niveauprüfer von Max Hildebrandt in Freiberg in Sachsen.

Der in Abb. 7 gezeigte Kreisteilungsprüfer von Julius Wanschaff hat vier verstellbare Mikroskope von etwa 60facher Vergrößerung. Wie ersichtlich, ist das Gerät zur Bestimmung der Teilungsfehler ungenauer größerer Kreise geeignet, speziell für jede Kreisgröße bis 42 cm Durchmesser. Wegen einer Beschreibung des Kreisteilungsprüfers sei auf Löwenherz (1880) verwiesen.

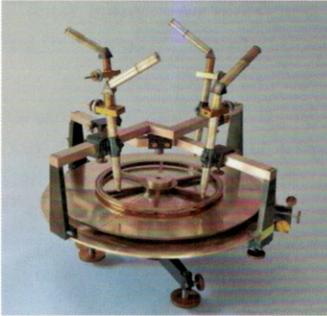


Abb. 7: Kreisteilungsprüfer von Julius Wanschaff in Berlin

Die Bestimmung von Durchmesserkorrekturen ist u. a. für folgende Kreise erfolgt:

- 40-cm-Horizontalkreis des Azimutaltransits von Repsold
- Vertikal- und Horizontalkreis des Universalinstruments No. I von Pistor und Martins
- Vertikalkreis des Universalinstruments No. II von Pistor und Martins (27-cm-Kreise).

Hierbei wurde der Teilungsprüfer dazu benutzt, die Durchmesserkorrekturen der Kreise für alle Durchmesser in der Äquidistanz von 4° zu bestimmen. Die Ergebnisse sind das Mittel aus zwei Einzelbestimmungen; siehe Jahresberichte 1894, 1895 und 1898. In Abb. 8 sind ihre Verläufe graphisch dargestellt. Gemäß der genannten Reihenfolge betragen die mittleren Fehler der verschiedenen Korrekturen: $\pm 0,22''$, $\pm 0,16''$ und $\pm 0,30''$ sowie $\pm 0,19''$ und $\pm 0,08''$.

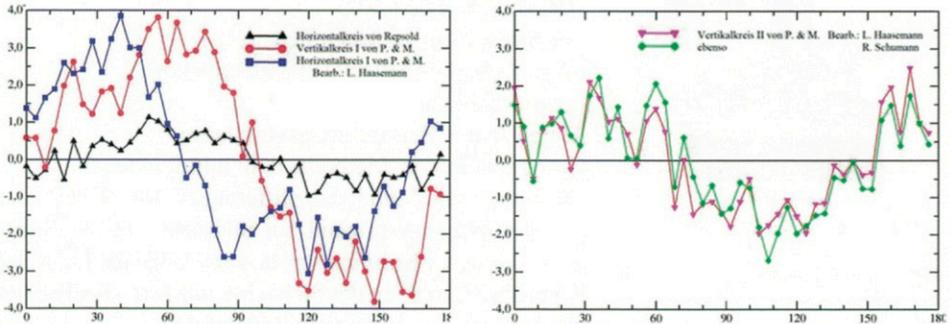


Abb. 8: Verläufe der Durchmesserkorrekturen für Horizontal- und Vertikalkreise

Wie ersichtlich, haben die Teilungsfehler für die Horizontal- und Vertikalkreise Periodizitäten von verschiedener Größe.

Periodische Teilungsfehler wurden weitgehend eliminiert: Bei Anwendung des Horizontalkreises zur Winkelmessung, indem die Messungen auf 18 gleichmäßig über den halben Umfang verteilten Kreisständen gemacht wurden, und bei Anwendung des Vertikalkreises zur Messung der Zenitdistanzen, indem die Beobachtungen auf verschiedenen Kreisständen (Zenitpunkt 0° , 45° , 90° , 135°) erfolgten.

Bei späteren Untersuchungen von Kreisen sind die periodischen Korrekturen durch eine Reihenentwicklung

$$\text{Korr.} = a_1 \sin 2\alpha + b_1 \cos 2\alpha + a_2 \sin 4\alpha + b_2 \cos 4\alpha + a_3 \sin 6\alpha + b_3 \cos 6\alpha$$

mit den Koeffizientenpaaren a_1 , b_1 , a_2 , b_2 und a_3 , b_3 dargestellt worden. Zum Vergleich mit den in Abb. 8 gezeigten Verläufen der Durchmesserkorrekturen sind die Ergebnisse der Reihenentwicklungen als Kurvenverläufe im Anhang B graphisch dargestellt. Bei Polhöhenbestimmungen wurden den betreffenden Reihen die Korrekturen für die Vertikalkreisablesungen entnommen und angebracht. Bei Azimutbestimmungen wurden die Korrekturen für die verwendeten Kreisstände berücksichtigt. Wegen mehr Informationen,

siehe die Veröff. d. Preuß. Geodät. Inst. Neue Folge, Nr. 109, Potsdam 1938: Astronomisch-Geodätische Arbeiten I. Ordnung, ausgeführt in den Jahren 1923 bis 1937.

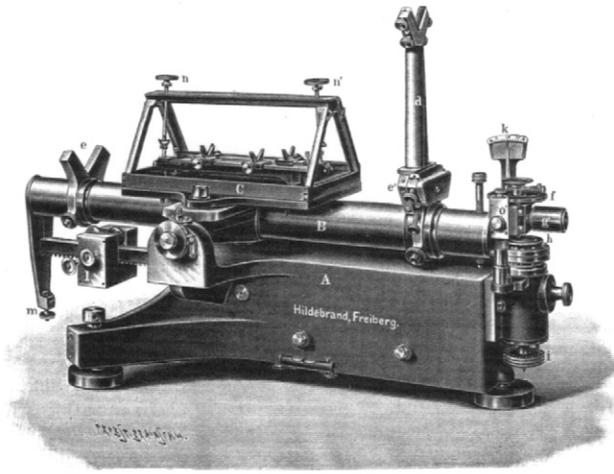


Abb. 9: Großer Niveauprüfer von Max Hildebrandt in Freiberg in Sachsen (Galle 1898)

Was ältere Methoden und Geräte zur Niveauprüfung anbetrifft, sei auf den Aufsatz von Galle (1897) verwiesen. Der in Abb. 9 gezeigte Große Niveauprüfer von Max Hildebrandt in Freiberg in Sachsen diente über Jahrzehnte zur Bestimmung des Teilwertes der Libellen. Das Bedürfnis hierfür stieg mit wachsender Empfindlichkeit der an den Universalinstrumenten und den anderen Instrumenten vorhandenen Niveaus. Das Gerät war so eingerichtet, dass man einzelne Libellen mit oder ohne Fassung untersuchen konnte, ferner durch einen besonderen Aufsatz Aufsatzlibellen und Horrebow-Libellen sowie, indem man ganze Instrumente aufsetzen konnte, deren Libellen in Gebrauchslage.

Der Aufbau des Großen Niveauprüfers ist durch die in Abb. 9 vorhandenen Bezeichnungen verdeutlicht:

- Unterbau A analog zu dem eines Passageinstrumentes
- kreuzförmiger Niveauträger aus einem Gussstück mit Längsarm B
- deren Ansatz trägt das Muttergewinde für die Messschraube
- Oberteil ist in der Mitte als Tisch gestaltet
- eiserne, dreiflügelige Platte zur Aufstellung von Instrumenten oder Glaskasten C kann aufgesetzt werden
- verschiebbare Lager e e' sind zur Aufnahme der Libellen
- Niveaustützen d für Aufsatzlibellen
- Trommel f der Messschraube ist in 120 Teile geteilt; sein Teilwert beträgt: $1p = 1,0234''$
- Entlastung des Drucks der aufgesetzten Instrumente über Hebelarm mit 10facher Übertragung der Masse auf der Waagschale, z. B. 4,56 kg für 10zölliges Universal von 35,0 kg + Fußplatte von 10,6 kg.

5.5 Pendelapparate für relative Schweremessungen

Eine weitere Aufgabe bestand darin, engmaschige Schwerenetze zu messen. Dabei wurden zuerst Referenzpunkte bestimmt und dann die weiteren Punkte daran angeschlossen. Auch sollten relative Schweremessungen auf Expeditionen erfolgen.

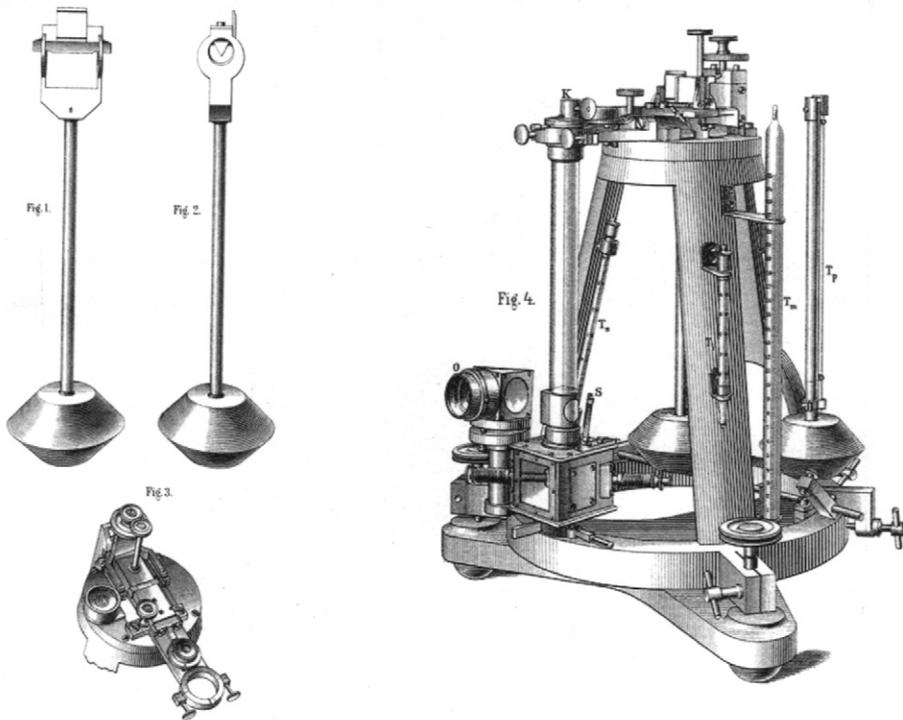


Abb. 10: Konstruktion des einfachen Pendelapparates für relative Schweremessungen

Anschaffungen von Pendelapparaten am Geodätischen Institut Potsdam wurden getätigt: 1892 zwei Pendelapparate mit 4 unveränderlichen Halbsekundenpendeln von Paul Stückrath in Friedenau, mit einem Magazin Thermometern von Rudolf Fuess in Steglitz bei Berlin, 1893 Pendelapparat von Gebr. Repsold in Hamburg mit Meterpendel und Viertelmeterpendel von je 3,59 kg Masse, 1894 Pendelapparat vom System von Sterneck mit 4 unveränderlichen Halbsekundenpendeln von E. Schneider in Wien sowie 1902 ein Dreipendelapparat von Paul Stückrath mit 3 Messingpendel und 3 Nickelstahlpendel (Invarpendeln). Außerdem wurde 1908 ein Vierpendelapparat vom Institutsmechaniker Max Fechner hergestellt.

Die Konstruktion des einfachen Pendelapparates für relative Schweremessungen basiert auf dem System von Sterneck mit Abänderungen von Helmert (Borrass 1896). Sie ist in Abb. 10 veranschaulicht, wo vier Figuren dargestellt sind:

- Fig. 1 und 2: Pendel in Vorder- und Seitenansicht, das aus den Teilen Linse, Stange und Kopfstück mit Achat-Schneide sowie Beobachtungsspiegel besteht,
- Fig. 3: Aufhängung der Pendel als Ansicht auf Kopffläche des Stativs und
- Fig. 4: Stativ, eine massive, kreisrunde Grundplatte mit 3 Fußschrauben zur Horizontierung und ein Dreibein mit 4 Quecksilberthermometern für Pendel, Magazin, Stativ und Luft; am Stativ links ist das Fadenpendel zur Bestimmung des Mitschwingens der Unterlage.

Der Apparat, gebaut von Paul Stückrath in Friedenau, wurde mit 4 invariablen Pendeln von rd. 0,509 Sternzeitsekunden Schwingungsdauer, davon 2 mit Stahl- und 2 mit Achat-schneiden (No. 5 bis 8) geliefert. Wegen des Stückrathschen Apparates älterer Konstruktion

mit 4 Halbsekundenpendeln siehe die photographische Aufnahme in Abb. 11.

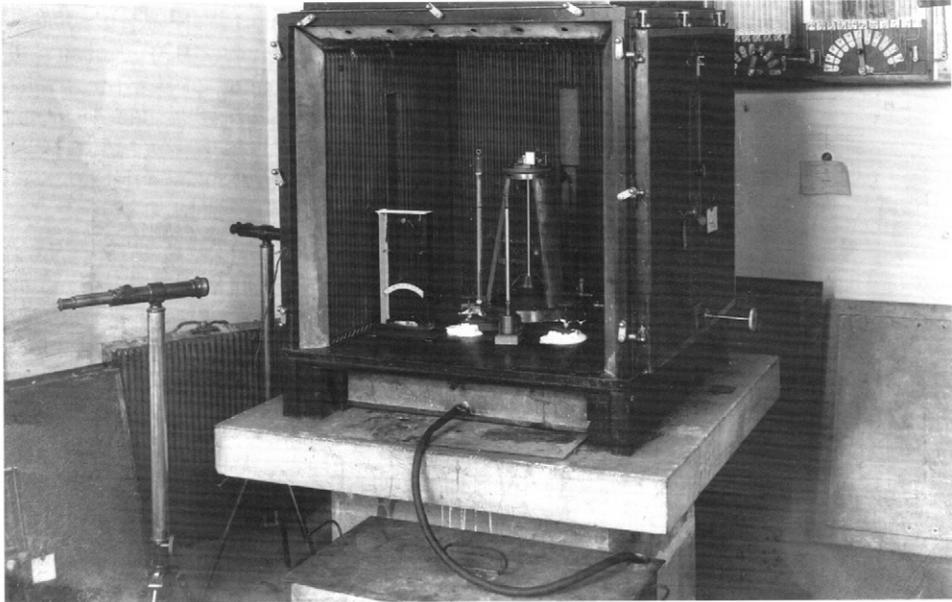
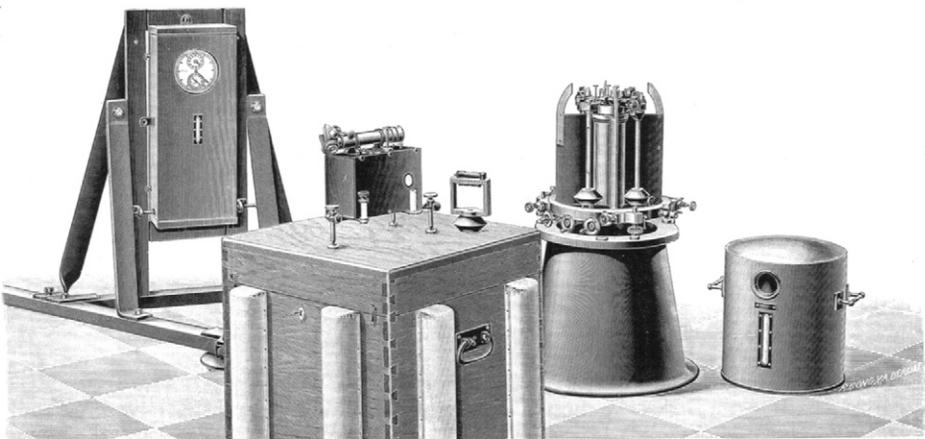


Abb. 11: Einpendelapparat im Schutzkasten, gebaut von Paul Stückradt in Friedenau

Der komplette Aufbau der Geräte zur relativen Schwermessung mit einem geöffneten Vierpendelapparat ist in Abb. 12 zu sehen. Während des Pendelvorgangs diente der Koinzidenzapparat dazu, die Koinzidenzmomente von Uhrpendel und Beobachtungspendel elektrooptisch zu bestimmen. Aus der beobachteten Koinzidenzen-Periode wurde die Schwingungsdauer des Pendels berechnet. Abb. 13 zeigt einen Koinzidenzapparat nach Sterneck.



Pendelapparat und Halbsekundenuhr „Strasser & Rohde No. 141“

Abb. 12: Kompletter Aufbau der Geräte zur relativen Schwermessung mit Halbsekundenpendeluhr, Koinzidenzapparat und Vierpendelapparat (von links nach rechts)

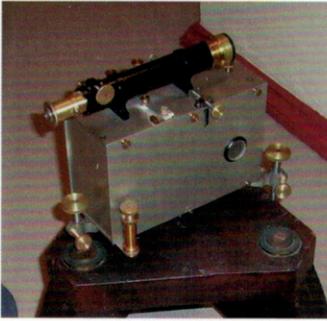


Abb. 13: Koinzidenzapparat für die elektrooptische Beobachtung der Koinzidenzmomente zur Berechnung der Schwingungsdauer der Pendel (Aufnahme: Autor)

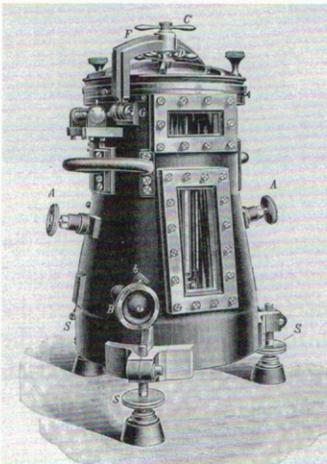


Abb. 14: Luftdicht verschließbarer Zweipendel-Apparat der Deutschen Südpolar-Expedition von 1901-1903

Um eine Übersicht über die relativen Schwere-messungen, die durch die Institutsmitarbeiter im Inland und Ausland ausgeführt wurden, zu erhalten, sei auf 2 Tabellen, die in Höpfner (2013) gegeben sind, verwiesen. Was die Ungenauigkeit der Messungen anbelangt, so konnte zwischen 1894 und 1913 der durchschnittliche mittlere Fehler von $\pm 3,0$ mGal ($1\text{mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$) über $\pm 2,3$ mGal auf $\pm 2,0$ mGal verringert werden.

Spezielle Untersuchungen auf dem Arbeitsgebiet sind am Geodätischen Institut Potsdam ausgeführt worden. Sie betrafen das Mitschwingen des Stativs, den Einfluss magnetischer Felder auf Invarpendel, Erprobung von Quarz- und Invarpendeln, Material und Form von Pendeln und technische Gestaltung von Pendelgeräten.

Zur Ausrüstung der Deutschen Südpolar-Expedition unter der Leitung von Erich von Drygalski in 1901 bis 1903 gehörte ein luftdicht verschließbarer Zweipendel-Apparat für relative Schwere-messungen. Das Gerät ist in Abb. 14 veranschaulicht. Es wurde nach Angaben von F. R. Helmert durch den Mechaniker M. Fechner im Geodätischen Institut Potsdam gebaut und mit vier Stückrathschen Halbsekundenpendeln versehen.

5.6 Pendeluhr und Chronometer

Die Zeit spielte eine wichtige Rolle bei der Bewältigung der meisten Institutsaufgaben, wie nachstehende Auflistung zeigt:

- Sterndurchgangsbeobachtungen für geodätisch-astro-nomische Ortsbestimmungen sind an feste Zeitpunkte gebunden. Registrierung von Sterndurchgangszeiten ist erforderlich.
- Absolute und relative Schwere-messungen mit Pendeln werden mit Schwingzeitmessanlagen ausgeführt, um die Schwingungsdauer der Pendel aus Zeitdifferenzen zu bestimmen. Hier werden Koinzidenzen zu Zeitangaben einer sogen. Koinzidenzuhr registriert.
- Geodätisch-astro-nomische Zeit- und Breitenbestimmungen bilden die Grundlage für Zeit- und Breitendienst.
- Technischer Zeitdienst erfordert Zeitbewahrung und Zeitvergleiche.
- Anschlussmessungen sowie Expeditionen.

Deshalb wurden entsprechend den verschiedenen Anforderungen Zeitmessgeräte durch das GIP angeschafft. Zum Bestand gehörten Präzisions-Pendeluhr, transportable Präzisions-Pendeluhr und Präzisions-Chronometer. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Präzisions-Sekundenpendeluhr, die zur Zeitbewahrung im Technischen Zeitdienst von 1892 bis 1933 benutzt wurden. Daraus ist ersichtlich, welche Innovationen und Verbesserungen in nur zwei Jahrzehnten auf dem Gebiet Präzisions-Pendeluhrbau zu verzeichnen waren. Abb.

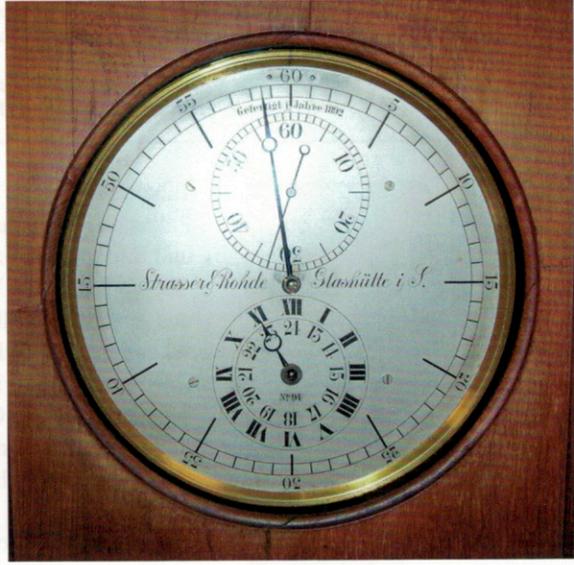


Abb. 15: Präzisions-Sekundenpendel-uhr (1892) von Strasser & Rohde, Glashütte i. S. mit vergrößertem Zifferblatt (Aufnahme: Autor)

15 zeigt die von Strasser & Rohde, Glashütte i. S. im Jahre 1892 gebaute astronomische Pendeluhr Nr. 94. Von 1898 bis 1904 wurden die absolute Schwere mit Reversionspendeln durch Kühnen & Furtwängler (1906) am Institut bestimmt, wobei die astronomische Pendeluhr No. 95 von Strasser & Rohde zusammen mit den Sekundenpendeluhren Nr. 27 und 28 von Dencker als Normaluhren dienten. Was die Zeitbewahrung im Technischen Zeitdienst betrifft, so wurden 4 bis 6 Präzisions-Sekundenpendeluhren mit mittleren Gangänderungen von 10 bis 40 Millisekunden pro Tag von 1892 bis 1933 benutzt.

Tabelle 5. Präzisions-Pendeluhren, benutzt zur Zeitbewahrung von 1892 bis 1933 im Technischen Zeitdienst

Ab Jahr	Firma	Bezeichnung der Pendeluhr
1892	Strasser & Rohde in Glashütte	einfache astron. Pendeluhr, No. 94, mit einer besonderen Art von Zinkkompensation (s. Abb. 15)
1892	Strasser & Rohde in Glashütte	astron. Pendeluhr, No. 95, mit gewöhnlicher Quecksilberkompensation, ab 1908 mit Nickelstahlpendel, verwendet für Pendelmessungen
1893/95	Ferdinand Dencker in Hamburg	Sekunden-Pendeluhr No. 27 und No. 28
1898	Clemens Riefler in München	astron. Sekunden-Pendeluhr, Nr. 20, in luftdichtem Glasgehäuse mit Quecksilberkompensation und elektrischem Sekundenkontakt
1905	Clemens Riefler in München	Sekunden-Pendeluhr, Nr. 96, mit Nickelstahlpendel und elektrischem Aufzug sowie elektr. Kontakten, für Pendelbeobachtungen, ab 1911 mit neuem Nickelstahlpendel, das auch gegen Temperaturkompensation versehen ist

1911	<i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte	Sekunden-Pendeluhr, Nr. 174, mit neuem <i>Rieflerschem</i> Nickelstahl-Kompensationspendel, ausgestattet durch <i>Max Richter</i> in Berlin
1915	<i>Max Richter</i> in Berlin	Sekunden-Pendeluhr, Nr. 65 und Nr. 60, mit <i>Rieflerschem</i> Schichtungspendel und Barometerkompensation

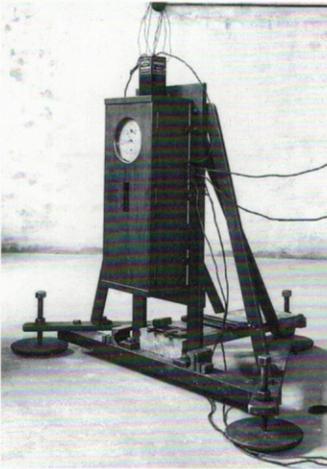


Abb. 16: Halbskundenpendeluhr Nr. 141 von *Strasser & Rohde*, Glashütte i. S., benutzt zur Bestimmung der Schwingungsdauer der Pendel (Koinzidenzuhr) im Feldeinsatz

Tabelle 6 enthält eine Übersicht der transportablen Präzisions-Pendeluhren. Sie kamen bei Feldarbeiten und Expeditionen zum Einsatz. Wie ersichtlich, waren die verfügbaren Uhren zuerst Sekunden-Felduhren und ab 1896 Halbskunden-Pendeluhren. Die Halbskunden-Pendeluhr Nr. 141 von *Strasser & Rohde*, Glashütte i. S. ist in Abb. 16 zu sehen. Abb. 12 zeigt den kompletten Geräteaufbau mit dieser Uhr zur relativen Schwere messung. Die als Felduhren bezeichneten transportablen Präzisions-Pendeluhren hat die Firma *Strasser & Rohde* auf Anregung des Geodätischen Instituts Potsdam konstruiert und gefertigt. Sie wurden an Institutionen im In- und Ausland geliefert. Die durch das Institut angeschafften Präzisions-Chronometer sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 6. Transportable Präzisions-Pendeluhren

Jahr	Firma	Bezeichnung der Pendeluhr
1892	<i>Zachariae</i> in Leipzig	Astronomische Pendeluhr, benutzt bei der Expedition <i>Drygalski</i>
1893	<i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte	astron. Sekunden- Felduhr , Nr. 101, mit kupferbeschlagenem Gehäuse, <i>Rieflerschem</i> Pendel und elektrischem Kontaktwerk, nebst Stativ, 1911 mit <i>Rieflerschem</i> Nickelstahlpendel gewöhnlicher Konstruktion
1894	<i>Hawelk</i> in Wien	astron. Sekunden- Felduhr , Nr. 41, mit zerlegbarem Schieferpendel und elektrischem Kontaktwerk
1894	<i>Hawelk</i> in Wien	Sekunden- Pendeluhr , Nr. 14 mit Schieferpendel (Koinzidenzuhr)
1896	<i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte	Halbskunden-Pendeluhr, Nr. 141, mit gewöhnlicher Quecksilberkompensation, mit Stativ für Feldbeobachtungen (s. Abb. 16), 1897 verliehen an Reichsmarineamt
1897	<i>Hawelk</i> in Wien	Halbskunden-Pendeluhr, Nr. 27
1897	<i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte	Transportable Halbskunden-Pendeluhr, Nr. 174, mit Nickelstahlpendel und elektrischem Kontaktwerk in einem Eisengehäuse, 1906 verliehen an Reichsmarineamt, 1910 verliehen an British Antarctic Expedition
1898	<i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte	Transportable Halbskunden-Pendeluhr, Nr. 194, mit Nickelstahlpendel und elektrischem Kontakt in einem Nussbaumgehäuse

Tabelle 7. Präzisions-Chronometer

Jahr	Bezeichnung der Uhr
....	Sternzeitchronometer <i>Tiede Nr. 29 & Tiede Nr. 351</i> , benutzt zur Kontrolle der Koinzidenzuhr
1892	Taschen-Chronometer von <i>J. H. Kessels</i>
1897	Taschen-Uhr für Sternzeit von <i>Strasser & Rohde</i> in Glashütte
1900	Älterer Box-Chronometer von <i>Parkinson & Frodsham</i> , Nr. 2649 durch <i>Th. Knoblich</i> in Hamburg
1902	Marine-Chronometer, Nr. 3347, von <i>Th. Knoblich</i> in Hamburg
1904	Silberne Taschen-Uhr, Nr.46573, von <i>A. Lange & Söhne</i> in Glashütte
1905	unkompensierte Taschen-Uhr, Nr.43002, von <i>A. Lange & Söhne</i> in Glashütte

5.7 Sonstige Geräte und Zubehör

Im Anhang C ist eine Übersicht über die Ausrüstung zur Pendelmessung für relative Schwerebestimmungen mit geodätisch-astronomischer Zeit- und Breitenbestimmung gegeben (Borrass 1896). Hieraus geht hervor, welche sonstigen Geräte und Zubehör für die Messungen nötig waren. An dieser Stelle seien die Geräte für Zeitregistrierung und Nordorientierung sowie die Messgeräte für meteorologische Bedingungen (Luftdruck, relative Feuchte und Temperatur) genannt: Fuessscher Chronograph nebst Taster zum Uhrvergleich, Orientierungsbusssole, Bohnesches Aneroid-Barometer No. 937, Fuesssche Siedethermometer, Koppesches Hygrometer und gewöhnliche Thermometer.

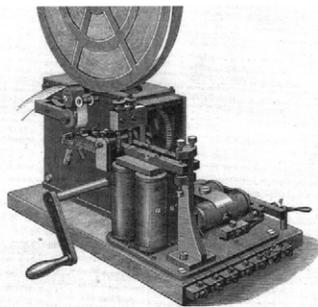


Abb. 17: Fuessscher Chronograph

Der in Abb. 17 gezeigte Fuessscher Chronograph hatte ein Laufwerk von im Telegraphendienst allgemein gebräuchlicher Konstruktion des Normalschreibers. Der Antrieb erfolgte durch eine an eine Stahlgelenkkette gehängte Masse von 14 kg mit einem Windflügelregular für den Erhalt einer gleichmäßigen Geschwindigkeit. Der Papierstreifen wurde durch eine außerhalb des Laufwerks befindliche Walze mit ca. 60 cm Geschwindigkeit pro Minute gezogen, so dass die Sekundenintervalle ca. 1 cm lang wurden. Zwei Hufeisenelektromagnete sind auf der Grundplatte vorhanden, der eine ist mit der Kontaktvorrichtung des

Sekundenpendels und der andere mit dem Signal des Beobachters leitend verbunden. Nadelförmig zugespitzte Schrauben stechen Punkte in den fortlaufenden Papierstreifen ein, indem Anker an den Signalhebeln angezogen werden. Um das Laufwerk vom Standort des Beobachters aus ein- und ausschalten zu können, hat der Chronograph noch einen dritten Elektromagneten, der diese Aufgabe übernimmt. Dabei dementsprechend geschaltet werden die Kontakte der Uhr (Löwenherz 1880).

Rudolf Fuess in Steglitz fertigte Thermometer, Barometer und Anemometer von hoher Qualität in großem Umfang. Gewöhnliche Thermometer mit Papierskala hatten eine Teilung in halbe Grade. Quecksilberthermometer waren in der Weise konstruiert, dass sich die Skale nicht verrücken konnte und jedes Gleiten und Durchbiegen der Kapillare vermieden wurde; Skale und Kapillare können sich für sich und unbeeinflusst von einander ausdehnen. Dabei sind größte Festigkeit und Eleganz in der Form vereint.

6. Schlußbemerkungen

Es gibt Geräte und viele Details, die in unseren Ausführungen nicht berücksichtigt wurden. Beispiele sind Basisapparat, photographisches Zenitteleskop von Wanschaff, Seegravimeter, Horizontalpendel und historischer Potsdamer Reversionspendelapparat. Dabei handelt es sich um Unikate. Falls von Interesse, sollte die betreffende Originalliteratur herangezogen werden. Einige Arbeiten sind folgende: Kühnen (1897), Förster (1930), Kühnen & Furtwängler (1906), Schweydar (1921). Wegen mehr Details sei auf den Rückblick auf ausgeführte Arbeiten und wissenschaftliche Leistungen des Geodätischen Instituts Potsdam von Höpfner (2013) verwiesen. Auf Präzisions-Nivellierinstrumente und selbstregistrierende Pegel wurde im Aufsatz bewusst nicht eingegangen.

Da es zu Beginn des 19. Jahrhundert enorme Fortschritte in Feinmechanik und Optik gab, wurden in Deutschland zahlreiche bedeutende mechanisch-optische Werkstätten gegründet. In Geodäsie und Astronomie waren Sextant, Quadrant und Oktant die Winkelmessgeräte der 1. Generation. Sie wurden durch felddaugliche Präzisionstheodolite abgelöst. Dabei war der Reichenbachsche Repetitionstheodolit das erste Präzisions-Winkelmessgerät der neuen Generation. Ende des 19. Jahrhundert hatten Feinmechanik und Präzisionsoptik eine hervorragende Stellung erlangt, wie Firmen und Institutionen durch ihre Exponate in den verschiedenen Fachgebieten auf zahlreichen Ausstellungen zeigten: Weltausstellung in Brüssel 1888, Weltausstellung in Chicago 1893, Berliner Gewerbe-Ausstellung 1896 und Weltausstellung in Paris 1900. Auf Ausstellungen war das Geodätische Institut Potsdam ebenso als Aussteller vertreten. Was nun die Weltausstellung in Paris 1900 angeht, so gehörten zu deren Ausstellungsstücken folgende Geräte und Apparate, die bis auf eine Ausnahme in unserem Aufsatz vorgestellt werden:

- Azimutaltransit von Repsold
- Kreisteilungsprüfer von Wanschaff
- photographisches Zenitteleskop von Wanschaff (ist nicht beschrieben!)
- optisches Zenitteleskop von Wanschaff
- Niveauprüfer von Hildebrand
- Halbsekundenpendelapparat von Stückradt.

Die von den Instrumentenbauern gefertigten Messgeräte der neuen Generation waren Präzisionsmessgeräte und -apparate, die an Qualität und Messgenauigkeit höchsten Ansprüchen genügten. Wegen Zuverlässigkeit und Präzision für Anwendungen in Praxis und Forschung hervorragend geeignet, konnten dadurch große Leistungen in der Geodäsie und anderen Disziplinen erbracht werden. Als Forschungsinstitut für Geodäsie und Gravimetrie hat das Geodätische Institut Potsdam unter dem Direktorat von Friedrich Robert Helmert dazu durch ausgeführte Arbeiten und Forschungen in hohem Maße beigetragen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Baeyer, J. J. Ueber die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung nebst einer Uebersichtskarte. Berlin: Druck und Verlag von Georg Reimer, 1861. 111 p.

Baumann, E. (Hrsg.) Johann Gottlieb Friedrich Bohnenberger – Pionier des Industriezeitalters. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 2016

Borrass, E. Die Intensität der Schwerkraft auf den Stationen der Südabteilung. Bestimmung der

Polhöhe und der Intensität der Schwerkraft auf 22 Stationen von der Ostsee bis zur Schneekoppe. Berlin 1896. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. p. 175-288.

Förster, G. Untersuchungen von Basisapparaten. II: Der Brunnersche Basisapparat. III: Der Besselsche Basisapparat. Entwurf eines neuen Stangen-Meßapparates. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. N. F. Nr. 105. Potsdam 1930. 104 p.

Fülscher, P. et al. Konstrukteure und Hersteller geodätischer Instrumente. Siehe: www.history-of-geodesy.ch

Galle, A. Notiz über ältere Niveauprüfer. Z. Instrum.-Kd. 17 (1897) 2, S.48-49.

Galle, A. Der Hildebrand'sche Niveauprüfer des Königlichen Geodätischen Instituts. Z. Instrum.-Kd. 18 (1898) 3, S.72-76.

Haasemann, L. Die Intensität der Schwerkraft auf den Stationen der Nord-Abtheilung. Bestimmung der Polhöhe und der Intensität der Schwerkraft auf 22 Stationen von der Ostsee bei Kolberg bis zur Schneekoppe. Berlin 1896. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. p. 85-174.

Haasemann, L. Bestimmung der Intensität der Schwerkraft auf 55 Stationen Hadersleben bis Koburg und in der Umgebung von Göttingen. Berlin 1899. Veröff. Kgl. Preuß. G. I., 96 p. 3 Taf.

Haasemann, L. Bestimmung der Intensität der Schwerkraft auf 42 Stationem im nördlichen Teile von Hannover und im Saaletale von Jena bis zur Elbe. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. N. F. Nr. 41. Berlin 1909. 172 p. 1 Taf.

Höpfner, J. Johann Jacob Baeyer – ein hervorragender Geodät des 19. Jahrhunderts. Tagung zu Fragen der wissenschaftlichen Geodäsie anlässlich des Beginns der „Mitteleuropäischen Gradmessung“ vor 150 Jahren am 14. September 2012 in Berlin. Siehe: Internet

Höpfner, J. Rückblick auf ausgeführte Arbeiten und wissenschaftliche Leistungen des Geodätischen Instituts Potsdam. 2013. Siehe: Internet

Höpfner, J. Preußische Gradmessungsarbeiten im 19. Jahrhundert. INTERGEO 2014 in Berlin. Siehe: Internet

Kühnen, Fr. Die Neumessung der Grundlinien bei Strehlen, Berlin und Bonn. Ausgef. durch das Geod. Inst. unter Mitwirkung von R. Schumann, bearb. von -. Berlin 1897. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. 121 p. 4 Taf.

Kühnen, F. & Ph. Furtwängler. Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln. Veröff. Kgl. Preuß. G. I., Neue Folge Nr. 27, Berlin 1906. 390 S.

Kupčik, I. Alte Landkarten. Von der Antike bis zum Ende des 19. Jahrhunderts. Verlag Werner Dausien, Hanau/M. 1992. 240 p.

Löwenherz, L. (Hrsg.) Bericht über die wissenschaftlichen Instrumente auf der Berliner Gewerbeausstellung 1879. Berlin 1880

Matthiass, Oberst: Die Hauptdreiecke der Königlich Preussischen Landes-Triangulation. ZfV 32 (1903) H. 1, S. 2-17, H. 2, S. 33-52.

Schweydar, W. Lotschwankung und Deformation der Erde durch Flutkräfte, gemessen mit zwei Horizontalpendeln im Bergwerk in 189 m Tiefe bei Freiberg i. Sa. Z. B. Internat. Erdmessung N. F. Veröff. Nr. 38. Berlin 1921. 114 p.

Torge, W. Von Eratosthenes bis Delambre – die Geodäsie entsteht. Siehe: Internet

Torge, W. Müfflings geodätisches Wirken in der Umbruchepoche vom 18. zum 19. Jahrhundert. ZfV 127 (2002) H. 2, S. 97-108.

Weiß, E. (Hrsg.) Meilensteine im Instrumentenbau. 12. Symposium zur Vermessungs-geschichte in Dortmund am 10. Februar 2014. Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e. V., Dortmund 2014

Westphal, A. Mechanik und Optik. Weltausstellung in Paris 1900. Amtlicher Katalog der Ausstellung des Deutschen Reiches, S. 139-152.

Zaun, J. Instrumente für die Wissenschaft. Innovationen in der Berliner Feinmechanik und Optik, 1871-1914. Berlin 2002, S. 45-48.

Knaurs Neuer Historischer Weltatlas. Bechtermünz Verlag. Augsburg 1999

Jahresberichte des Direktors des Königlichen Geodätischen Instituts von 1890 bis 1930.

Weltausstellung in Paris 1900 (Klasse 15). Sonderkatalog der Deutschen Kollektivausstellung für Mechanik und Optik. Reichsdruckerei 1900, S. 33-65.

Anhang

A. Übersicht über mechanische und optische Werkstätten in Deutschland

Werkstatt/Firma	Zeitraum		Instrumente/Teile
	von	bis	
Georg Friedrich Brander, Augsburg ab 1775 & Höschel	1734	1844	Handl. Spiegelsextanten, Scheibeninstr. Theodolite
Johann Christian Breithaupt, Kassel	1762		Mauerquadrant (1785) Kreisteilmaschine (1818)
Georg F. Reichenbach, München	1771	1826	Kreisteilmaschine (18002) Repetitionstheodolite mit Versicherungsfernrohr (1804)
& Joseph Utzschneider	1804		
& Joseph Fraunhofer			Optik, Fernrohre
& Traugott Ertel	1806	1858	Geodätische Instrumente
& Georg Ertel	1834	1921	
Max Hildebrand in Freiberg, Sachsen	1791		Niveauprüfer, geodätische Instrumente
Repsold, Hamburg	1804		Kreisteilungen
A. Repsold & Söhne, Hamburg	1919		Astron. und geodätische Instrumente
Carl Theodor Nathan Mendelssohn	1806	1813	
Carl Philipp Heinrich Pistor, Berlin	1814	1826	
Pistor & Schieck	1824	1836	
Pistor & Martins, Berlin	1841	1873	Universalinstrumente
Julius Wanschaff in Berlin	1875/76	1922	Universalinstrumente, Zenitteleskope
Carl Bamberg in Friedenau b. Berlin, ab 1921 Askania-Werke AG	1871		Astron. und geodätische Instrumente, Theodolite, Libellen
Joh. Aug. Örtling, Berlin	1805	1866	Kreisteilmaschinen
Siemens & Halske, Berlin	1847		Wissenschaftl. und techn. Messinstr.
Bernhard Halle Nachf., Steglitz b. Berlin	1873		Optische Bauelemente
Gustav Halle, Rixdorf b. Berlin			Wissenschaftl. Präzisionsapparate
Hans Heele, Berlin	1876	1923	Präzisions-Optik und Mechanik
Carl Reichel, Berlin			Längenmaße, Libellen
F. Schmidt & Haensch, Berlin	1864		Mikroskope, Physikal. Apparate
Paul Stückrath in Friedenau b. Berlin	1887		Instrumente für Erdmessung
Rudolf Fuess in Steglitz b. Berlin	1865		Optische, meteorologische und Geophysikalische Geräte
Otto Töpfer & Sohn, Potsdam	1873	1919	Mechanische Teile, wissenschaftl. Instrumente
Edmund Hartnack, Potsdam	1870		Mikroskope
Gustav Heyde Söhne, Dresden	1872		Theodolite, feinmechan. Apparate
Otto Fennel Sohn in Cassel	1877		Geodätische Instrumente
Carl Paul Goerz AG	1886		Fernrohre
Carl Zeiss, Jena	1846		Optische Werkstätte
Reinfelder & Hertel, München	1867		Universalinstrumente
C. A. Steinheil Söhne, München	1855		Optisch-astronomische Werkstätte
Strasser & Rohde, Glashütte, Sachsen	1875	1917	Präzisions-Pendeluhren
Clemens Riefler, Nesselwang und München	1841		Astron. Uhren und Pendel
E. Schneider, Wien			Pendelapparate

B. Graphische Darstellung der Kurvenverläufe von Durchmesserkorrekturen

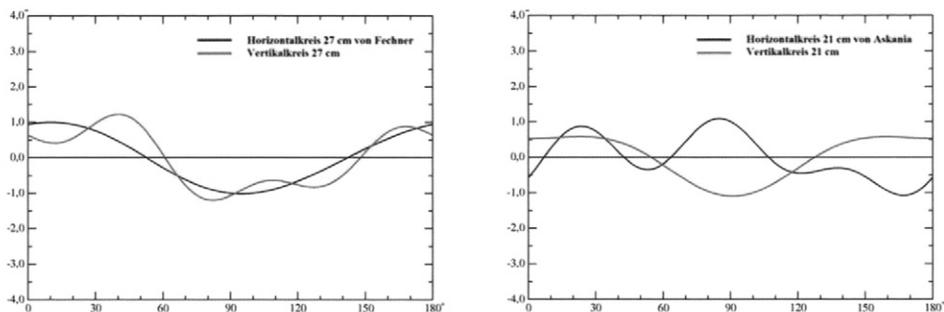


Abb. 18: Kurvenverläufe der Durchmesserkorrekturen, dargestellt für den Horizontal- und Vertikalkreis des 27-cm-Universalinstruments mit exzentrischem Fernrohr von Fechner (links) und für den Horizontal- und Vertikalkreis des 21-cm-Universals Nr. 455939 mit gebrochenem Fernrohr, Vergrößerung 57fach, von Askania (rechts). Siehe Abschn. 5. 3. 4.

C. Übersicht über die Ausrüstung zur Pendelmessung für relative Schwerebestimmungen

Stückrathscher Pendelapparat (System von Sterneck) mit 4 invariablen Halbsekunden-Pendeln

Unterlagskreuz für das Pendelstativ

Zerlegbarer Schutzkasten für das arbeitende Pendel

Schutzkasten für die ruhenden Pendel

4 Thermometer am Pendelstativ und eins im Ruhekasten

Aufsatzniveau zum Nivellieren des Pendellagers

Koinzidenzapparat zum Vergleich der Pendelschwingungen mit der Uhr nebst verstellbarem Tisch

Fadenpendel am Stativ zur Bestimmung des Mitschwingens der Unterlage

Zugdynamometer nebst Montierungsblock zur Ermittlung der Pfeiler- und Erdboden-Elastizität

Zange zum Ein- und Aushängen der Pendel

Staubpinsel und Stellstifte

Sekundenpendeluhr von Hawelk No. 14 zur Bestimmung der Schwingungsdauer (Koinzidenzuhr)

Sternzeitchronometer Tiede No. 351 und Tiede No. 29 zur Zeit- und Breitenbestimmung

und zur Kontrolle der Koinzidenzuhr

Fuessscher Chronograph nebst Taster zum Uhrvergleich

Hellesensche Trockenelemente zum Betrieb des Chronographen und Koinzidenzapparates

sowie ein Umschalter

10zölliges Universalinstrument von Pistor & Martins für Zeit- und Breitenbestimmungen

Hildebrandscher Theodolit mit Stativ für Zentrierungen

Orientierungsbusssole

Hölzernes Normalmeter, Stahlbandmaß (20 m) nebst Zähl- und Visierstäben, Winkelprisma, Lot

Bohnesches Aneroid-Barometer No. 937, zwei Fuesssche Siedethermometer,

Koppesches Hygrometer

Gewöhnliches Thermometer für Beobachtungsraum

Beobachtungslampen, Lichte, Leitungsdraht, Gips, Handwerkszeug, Reserve-Thermometer und -Elemente

Zerlegbares hölzernes Zelt, Uhrbalken, 2 zerlegbare Pfeiler für den Pendelapparat und das Universalinstrument, Leinwand zum Schutz des Zeltes gegen direkte Sonnenbestrahlung (Sonnensegel).

Geodätische Forschung

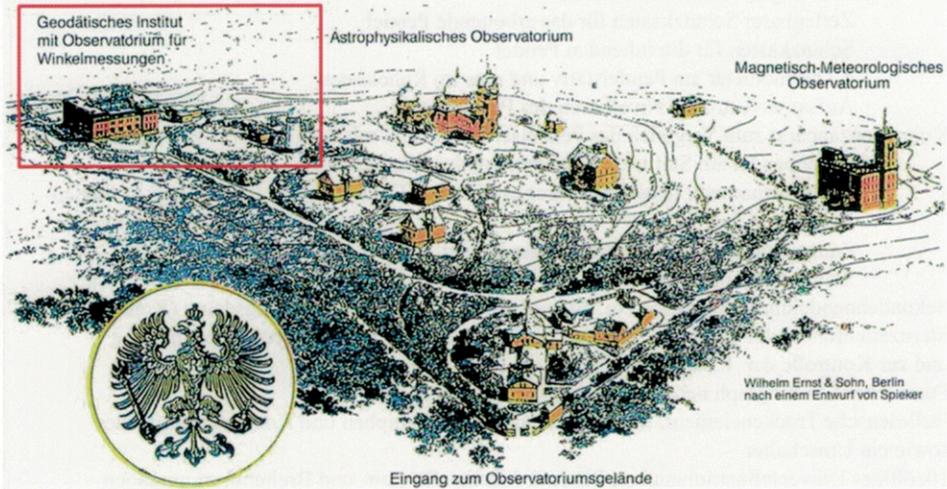
100 Jahre nach Friedrich Robert Helmert - geistiger Vater der modernen Geodäsie

Prof. Dr. Dr. h.c. Harald Schuh

Helmert gilt als Begründer der mathematischen und physikalischen Theorien der modernen Geodäsie und war der erste, der die Grundlagen zu den Methoden der Geoidbestimmung erarbeitete. Diese konnten wegen des Fehlens geeigneter, feldtauglicher Messinstrumente aber erst einige Jahrzehnte später in größerem Maße durchgeführt werden.

Helmert begründete die inzwischen klassische Definition der Geodäsie als Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche.

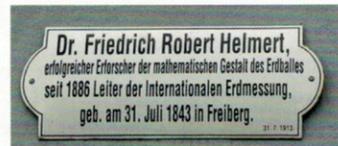
Die Königlich Preussischen Observatorien bei Potsdam auf dem Telegraphen-Berge (um 1892)



Helmert als Namensgeber

Nach Helmert benannt sind:

- der Mondkrater Helmert
- der astronomisch-geodätische Beobachtungsturm auf dem Telegrafenberg in Potsdam (Helmertturm)
- der Helmertplatz in seiner Geburtsstadt Freiberg
- die Professor-Doktor-Helmert-Straße in Potsdam (seit 2001)
- die Helmertstraße in Karlsruhe (seit 1960)
- den Helmertweg in Aachen



Gedenktafel auf dem Helmertplatz in Freiberg

Der Helmert-Turm in Potsdam braucht Ihre Hilfe!

Während das Hauptgebäude des Königlich-Preußischen Geodätischen Instituts vom Deutschen Geoforschungszentrum vorbildlich saniert und Stammsitz des Departments I Geodäsie geworden ist, verfällt das benachbarte Observatorium für astronomisch-geodätische Winkelmessung, dessen herausragendes Gebäude der Helmert-Turm ist.

Der Verfall des Helmert-Turmes ist so weit fortgeschritten, dass er nicht mehr betreten werden darf.

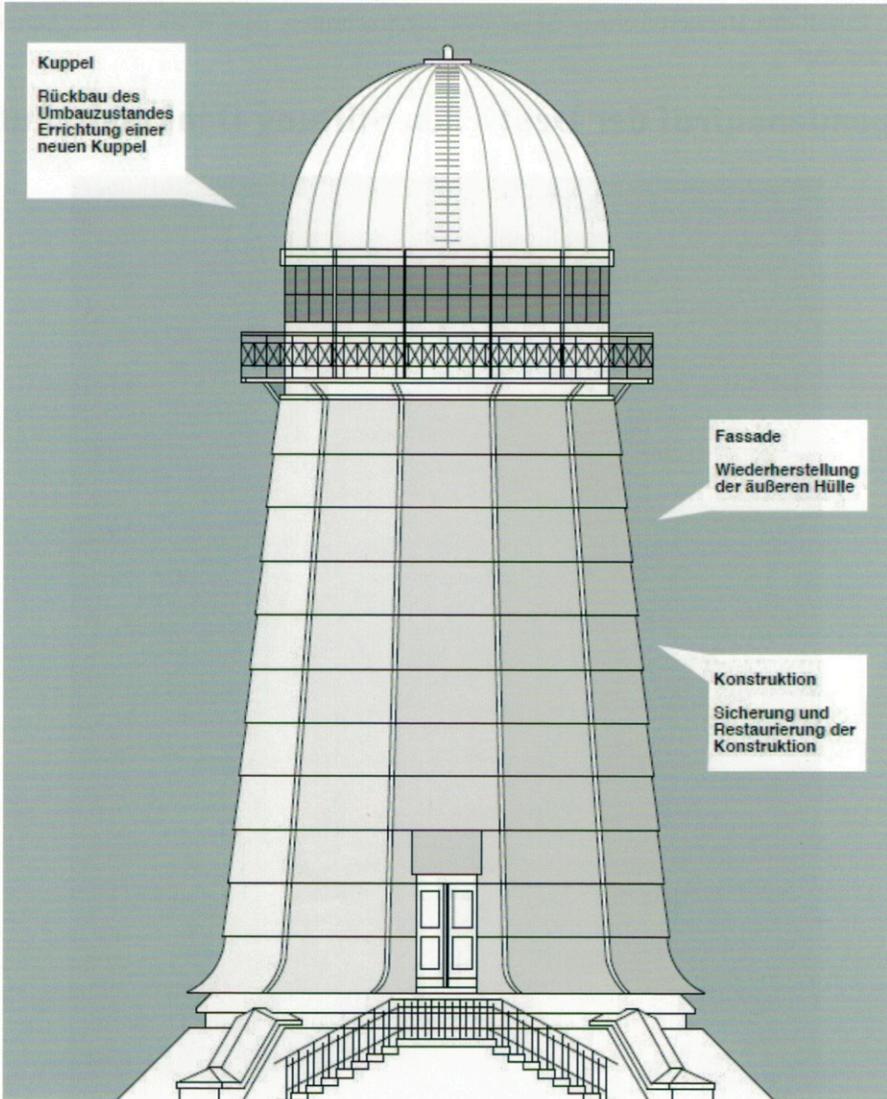
Spendenaufruf der Deutschen Stiftung Denkmalschutz



<https://www.denkmalschutz.de/denkmal/Helmert-Turm.html>

1. Sanierungsschritt

In einem ersten Sanierungsschritt soll die Begehbarkeit des Turmes wieder hergestellt werden. Dazu muss die komplette Treppenanlage saniert und die Elektrik des Turmes ausgetauscht werden. Das kostet ca. 100.000 €.



Unser Ziel

Bis Ende des Jahres 2017 sollen 50.000 € Spenden eingeworben werden (mehr als 30.000 € wurden bereits gespendet). Dann werden weitere 50.000 € von der Deutschen Stiftung Denkmalschutz zur Verfügung gestellt (sind bereits in Aussicht). Geplanter Sanierungsbeginn ist Anfang 2018.

Der Helmert-Turm und seine Bedeutung

Hier wurde die Welt vermessen; von hier wurde das Weltall erforscht - lange bevor 1969 der erste Mensch seinen Fuß auf den Mond setzte. Der Helmert-Turm auf dem Telegrafenberg in Potsdam wurde 1893 eingeweiht und war zunächst der Fundamentalpunkt für die preußische, später sogar für die europäische Landesvermessung. Was Greenwich also für die Zeit, ist der Helmert-Turm gewissermaßen für den Raum. Wer ein Stück Land vermessen wollte, hatte sich an diesem Fundamentalpunkt in Potsdam zu orientieren. Das einmalige Technikdenkmal verlor auf Grund der technischen Weiterentwicklung zwar in Hinsicht auf die Landesvermessung an Bedeutung, hatte aber auch in den folgenden Jahrzehnten zahlreiche wichtige Funktionen.

Der Helmert-Turm, jetziger Zustand

Heute ist der Turm in einem sehr schlechten baulichen Zustand. Um den Helmert-Turm zu erhalten, sind umfangreiche Arbeiten notwendig. Vor allem muss weiteres Eindringen von Wasser und die fortschreitende Korrosion der tragenden Teile verhindert werden. Auch die undichte Not-Kuppel, die nach dem 2. Weltkrieg montiert wurde, soll unbedingt einer neuen weichen.

Der Helmert-Turm und seine wissenschaftliche Bedeutung (I)

Der Helmert-Turm ist ein Technikdenkmal von internationaler Bedeutung. Der Namensgeber des Turms ist Professor Dr. Friedrich R. Helmert (1843-1917). Er gilt als Vater der modernen Geodäsie, der die im 19. Jahrhundert astronomisch-mathematisch geprägte Forschung mit Erkenntnissen der Physik anreicherte. Dies bedeutete einen Wendepunkt: Helmert begründete so die moderne Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche. Für seine astronomisch-geodätischen Forschungen in Potsdam benötigte er einen Komplex aus mehreren Gebäuden.

Der Helmert-Turm und seine wissenschaftliche Bedeutung (II)

Zu dem Ensemble gehören neben dem Turm auch ein Uhren- und zwei Meridianhäuschen, sowie kleine Begleitbauten, die sogenannten Mirenhäuschen. Den Takt gaben die Pendeluhr im Uhrenhäuschen vor, da exakte Zeitmessungen für diese Forschung unerlässlich waren. Sie wurden nach den Sternen gestellt, die über das Meridianhäuschen und den Helmert-Turm hinweg zogen. Um diese beobachten zu können, konnten die Dächer dieser Gebäude geöffnet werden. Noch bis Anfang der 1990er-Jahre wurde das Ensemble für die Erforschung der Gestalt der Erde verwendet und war Standort der ersten Lasermesssysteme zu Satelliten (SLR) des ZIPE (Zentralinstitut für Physik der Erde) der DDR.

Der Helmert-Turm und die geplanten Renovierungsmaßnahmen

Der Helmert-Turm hat neben einem bau- und technikgeschichtlichen Wert eine hohe wissenschaftliche Bedeutung. Ziel der Renovierungsmaßnahmen ist, das ganze Ensemble für die Öffentlichkeit zugänglich und den 15 Meter hohen Turm auf dem 94 Meter hohen Telegrafenberg auch als Aussichtspunkt begehbar zu machen. Damit das möglich wird, muss der Komplex zuerst vor dem Verfall gerettet werden.

Die Deutsche Stiftung Denkmalschutz hat sich bereit erklärt, erhebliche Mittel für die Rettung des bedeutenden Technik-Denkmal zur Verfügung zu stellen, vorausgesetzt, es werden genügend eigene Spenden eingeworben.



Bis Ende 2017 sollen 50.000 € Spenden eingeworben werden



Gedenkstein im Wissenschaftspark „Albert Einstein“ auf dem Telegrafenberg in Potsdam

Charaktereigenschaften von Friedrich Robert Helmert

Fleiß

Aus dem Spezialbericht des Gradmessungskommissars Nagel an das Königlich Sächsische Finanzministerium:

„Herr Assistent Helmert war im Jahre 1865 179 Tage auswärts und 147 Tage in Dresden also überhaupt 326 Tage in Angelegenheiten der Gradmessung in Sachsen beschäftigt. Überdieß war derselbe auf Preuß. Kosten 8 Tage im Harz, um daselbst für den General Baeyer Beobachtungspfeiler zu setzen und 31 Tage hat er für die Triangulirung des Erzgebirgischen Kohlenbassins gearbeitet. ...“

Arbeitstage im Jahr 1865: $179 + 147 + 8 + 31 = 365$ Arbeitstage

Loyalität

Im Oktober 1872 erhielt Helmert ein Schreiben mit einer Einladung zur Teilnahme an einer „Expedition zur Beobachtung des Vorübergangs der Venus vor der Sonne im Jahre 1874“, nachdem er gegenüber Bruhns, der Mitglied der Vorbereitungskommission war, ein gewisses Interesse bekundet hatte.

Er lehnte nun jedoch „... nach genauer Erwägung aller Umstände ...“ mit Bedauern und zugleich um Entschuldigung bittend ab. Helmert dankt für das Vertrauen und weist darauf hin, dass er seine Verantwortung für die Ausbildung der Studenten nicht für so lange Zeit in fremde Hände geben kann, zumal auch das dafür notwendige Personal nicht zur Verfügung steht.

Auch einen Ruf nach Cordoba in Argentinien (1873) und die Nachfolge von Jordan in Karlsruhe (1881) lehnt er ab.

Humor

Helmert war auch mit der Vereinheitlichung der Längenmaße befasst, was er exakt vollzog. 1872 wurde im Deutschen Reich das metrische System eingeführt. 1890 schreibt er an den Chef der preußischen Landesvermessung Generalmajor Schreiber:

Berlin, W. den 28 October 1890
Genthinerstr. 34

Hochgeehrter Herr Generalmajor!

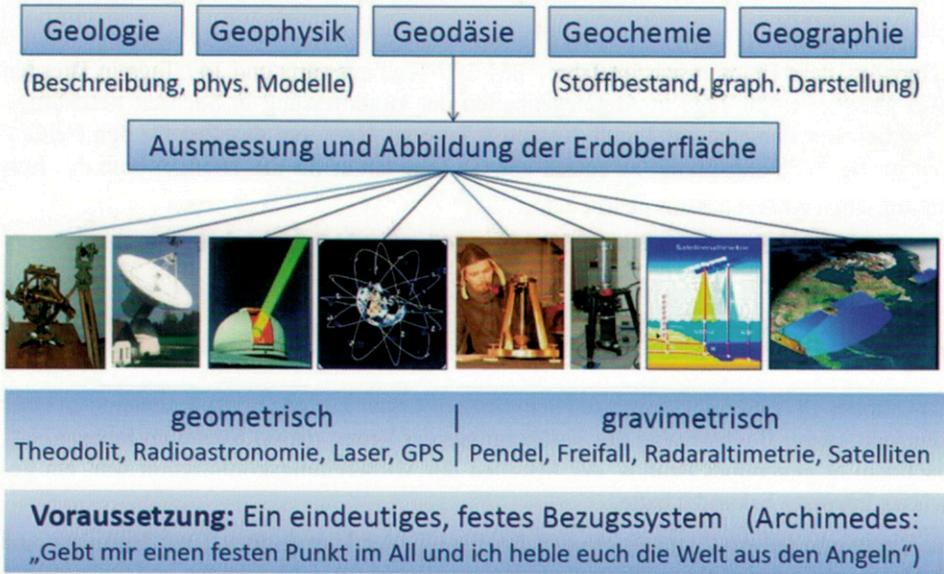
Anbei beehre ich mich, Ihnen ein Memoire von Dir. Benoit über erste Vergleichen der Toisen mit dem Meter vorzulegen. ...

Es ist nun kein Zweifel mehr, daß alle Dimensionen um ca. $1/70000 - 1/80000$ zu vergrößern sind, die aus den Toisen Bessel u. No 9 in Metermaß hergeleitet worden sind. Giebt eine Vergrößerung Preußens um ca. $1/40000$ Fläche.

Sollte es möglich sein, daß ich diesen Zuwachs ganz oder theilweise zugewiesen erhalten könnte, so bitte ich darum.

Mit hochachtungsvollem Gruß

Die Geodäsie innerhalb der Geowissenschaften



GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE FOR GEOSCIENCES



The GFZ and its geodetic research with international partners

Harald Schuh
 Director of GFZ Department 1 „Geodesy“
 President of International Association of Geodesy (IAG)

February 2017



Science campus Telegrafenberg, Potsdam



- **GFZ German Research Centre for Geosciences**
- Budget 2016: ~ 95 Mio. € (incl. 35 Mio. € Third Party)
- Staff: ~ 1280
- Incl. ~590 Scientists, ~220 PhDs
- Member of the **Helmholtz-Association**

As a member of the Helmholtz Association,
the GFZ is the

National Research Centre for Geosciences in Germany



- Foundation under public law
- Founded in 1992
- About 1280 employees (including phd students and guest scientists)
- Annual Budget (2016): € 95 million

Standorte des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ

Hauptstandort Potsdam

Außenstellen

- Adolf Schmidt-Observatorium für Geomagnetismus, Niemegek
- KTB-Tiefenlaboratorium, Windischeschenbach
- Außenstelle des Department 1, Oberpfaffenhofen (Wessling)

Forschungsstandorte u. a.

- Magnetisches Observatorium Wingst
- Geothermie-Labor Groß-Schönebeck
- CO₂-Speicherung Ketzin
- Untertagelabor Freiberg
- Zentralasiatisches Institut für Angewandte Geowissenschaften, Kirgistan, ZAIAG



Geo.X

Koordinierungsplattform der Geowissenschaften in Berlin und Potsdam

Gründung: März 2010

Partnereinrichtungen:

- 4** Universitäten
- 3** Helmholtz-Zentren
- 1** Leibniz-Institut

Mitglieder: 2400

(= alle Angehörigen und Mitglieder der geowissenschaftlichen Institute der Geo.X-Partnereinrichtungen)

Studierende der Geowissenschaften: **3500**

(Berlin und Potsdam)

Doktoranden: 600

Professuren: 120



Cooperation with Universities: Professorships

32 Joint appointments

- 16 University of Potsdam
- 7 Freie Universität Berlin
- 1 Humboldt University of Berlin
- 5 Technische Universität Berlin
- 1 Brandenburg Univ. of Technology (Cottbus - Senftenberg)
- 1 RTWH Aachen University
- 1 Technical Univ. of Braunschweig

10 apl.-Professors

- 3 University of Potsdam
- 4 Technische Universität Berlin
- 1 Freie Universität Berlin
- 1 Technical Univ. of Braunschweig
- 1 Ruhr University of Bochum

4 Honorary Professors

- 1 University of Potsdam
- 1 Technical Univ. Berlin
- 1 Bauhaus University Weimar
- 1 University Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

- 1 Visiting Professor: University of Johannesburg, South Africa

- 1 Other appointment: TU Delft



Public Outreach and Transfer into Society

International Training Courses

- Seismology + Seismic Hazard Assessment (UNESCO, AA, since 25 years)
- Tsunami Early Warning (GITEWS/DEWS/IOC)
- Water + Governance CAWa, Water in Central Asia (AA)
- Geoinformation Systems
- ICDP Training Course on Continental Drilling
- ...

Visitor Service

approx. 3000 visitors per year

School Lab

courses for pupils and teachers

Public Outreach activities

e.g. Girls Day, Science Night

Example of Media Presence

Total 2012: 312 Million
viewers, listeners, readers
in Germany alone, without internet

Print

n=4305

R=74 Million



Radio

n=442

R=178 Million



TV

n=251

R=60 Million



International Cooperation



Helmholtz-Gemeinschaft

Mission:

- Forschung zur **Lösung wichtiger Zukunftsfragen** von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft – strategisch und langfristig orientiert
- Bau und Betrieb großer **Forschungsinfrastrukturen** („think big, act big“)
- Erkenntnisse zum **Nutzen** von Gesellschaft und Wirtschaft umsetzen



Hermann von Helmholtz
(1821-1894)

Universalgelehrter mit
praktischem Sinn

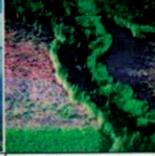
geboren in Potsdam

Helmholtz-Gemeinschaft Zahlen und Fakten (2015)

- 18 Forschungszentren mit 300 Instituten
- Ca. 38.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter
- Ca. 14.700 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler (ohne Doktoranden)
- Ca. 6.200 Doktoranden
- Budget: 4,2 Milliarden Euro



Helmholtz-Forschungsbereiche

Energie	Erde und Umwelt	Gesundheit	Schlüsseltechnologien	Struktur der Materie	Verkehr und Weltraum
<p>Programm Erneuerbare Energien</p>  <p>Geothermie</p>	<p>Programme im Forschungsbereich „Erde und Umwelt“</p>  <p>Geosystem: Erde im Wandel</p>  <p>Atmosphäre und Klima</p>  <p>Polarregionen und Küsten</p>  <p>Terrestrische Umwelt</p>				

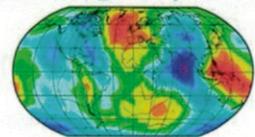
IGAG Central Objective: Geodetic Observation of Solid Earth Processes

Processes in the solid Earth: geodynamics (deformation)

Processes in the atmosphere and hydrosphere: water cycle

deformations

variations of the rotation and the gravity field



point positioning

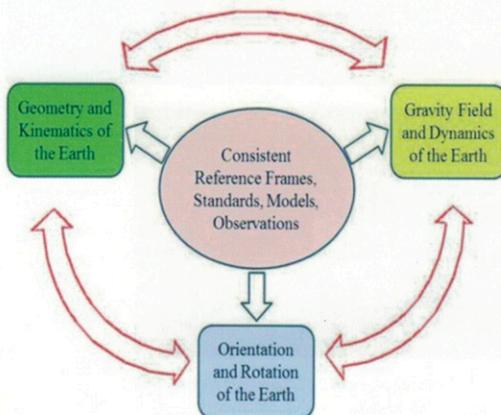
surface scanning

gravity measurement



Fundamental Requirement for Monitoring Global Change

The study, understanding and modelling of the effects of global change require precise, consistent and stable reference frames, standards and models for the three geodetic parameter groups: Earth geometry and kinematics, Earth gravity field and dynamics, Earth orientation and rotation.

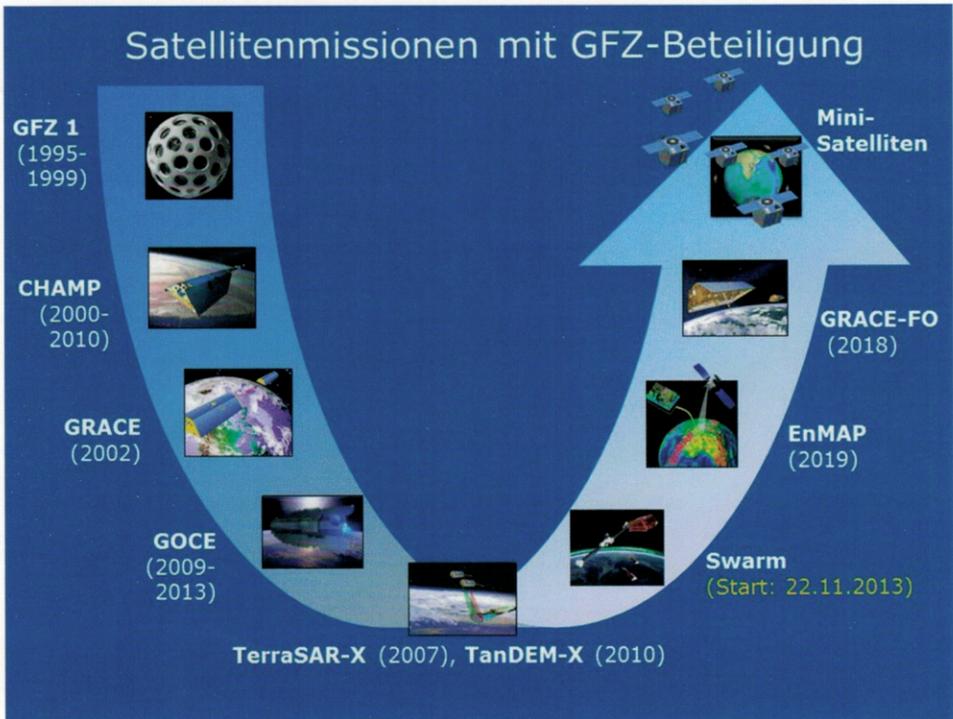


The reference frames must fulfil the following conditions:

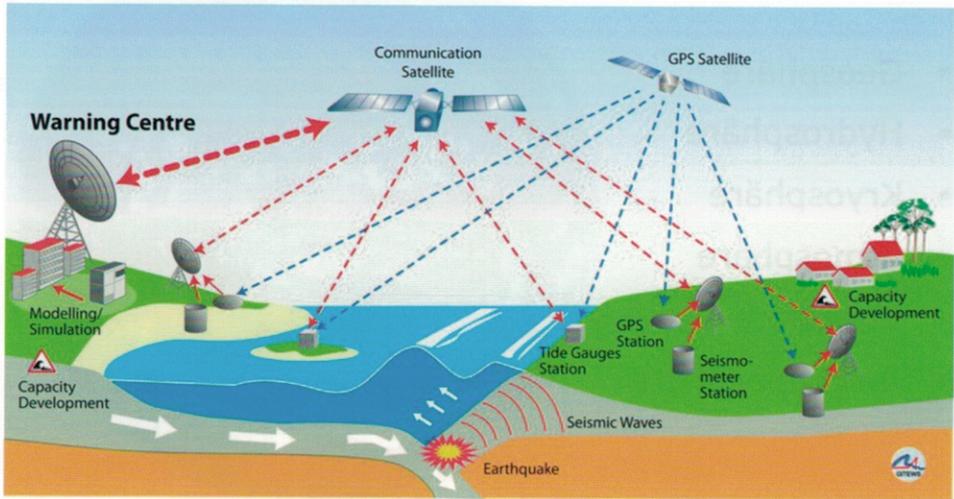
- One order more precise than the magnitude of the phenomena to be analysed
- Globally consistent and reliable (high precision at any place of the Earth's surface)

Das System Erde

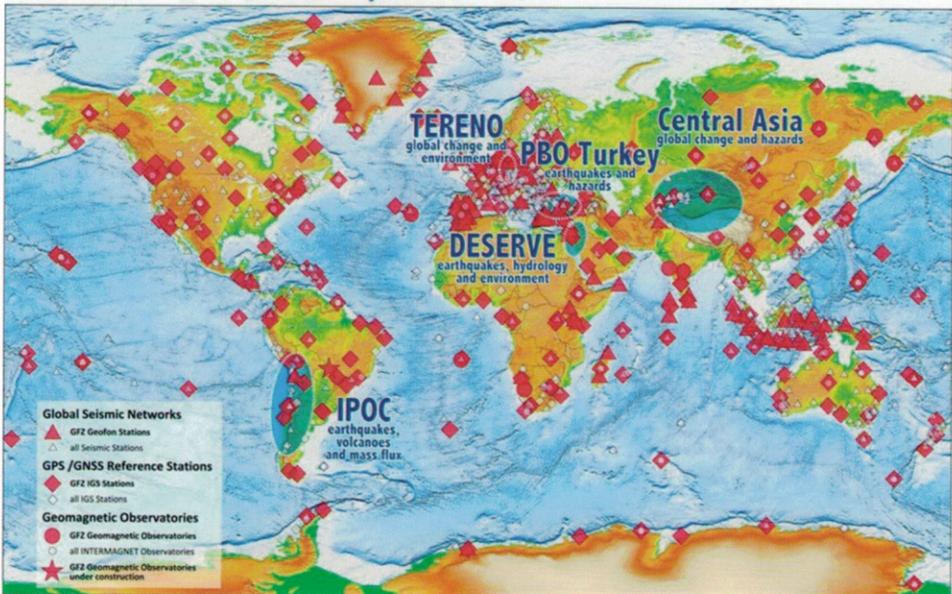
- Geosphäre
- Hydrosphäre
- Kryosphäre
- Atmosphäre
- Biosphäre
- Anthroposphäre



Tsunami Early Warning System



Earth System Observatories



Department 1 Geodesy



- some highlights from the 5 sections -

Section 1.1: Space Geodetic Techniques

Main areas

- GNSS atmospheric sounding
- GNSS real-time
- GNSS reflectometry
- Analysis Center of the IGS (International GNSS Service)
- Galileo, multi-GNSS
- VLBI (ITRF, ICRF, Analysis Center of the IVS)
- VLBI for space applications
- Combination of space geodetic techniques (project GGOS-SIM)

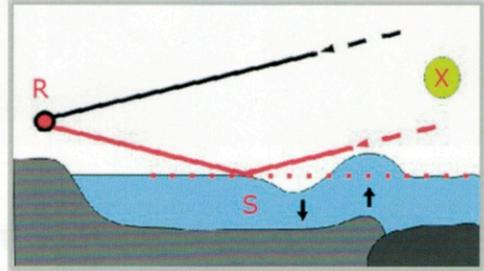


Section 1.1: Space Geodetic Techniques

Reflectometry using GNSS

GNSS Interferometry

- reflected signal (red) is delayed w.r.t. direct signal (black)
- interference is received
- measurement of water surface



Applications (general)

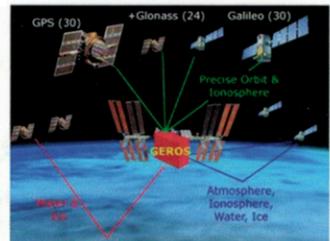
- tsunami wave measurement
- ocean tides and currents
- lakes and rivers

Sektion 1.1: Space Geodetic Techniques

GNSS-Reflectometry

Applications of GNSS reflectometry at GFZ

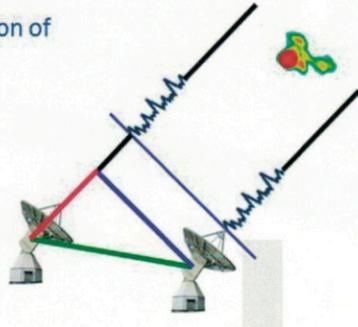
- experiments on HALO (Mediterranean Sea)
- monitoring Mekong delta (relative accuracy: few cm)
- GEROS-ISS: the only selected project (of 32) of ESA call „Climate change related research aboard ISS“



Sektion 1.1: Space Geodetic Techniques Very Long Baseline Interferometry (VLBI) at GFZ

1. Classical VLBI (operational)

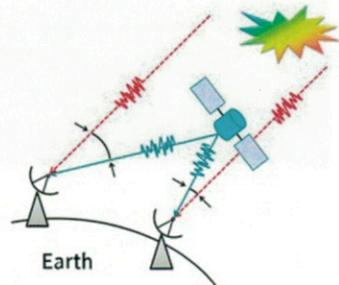
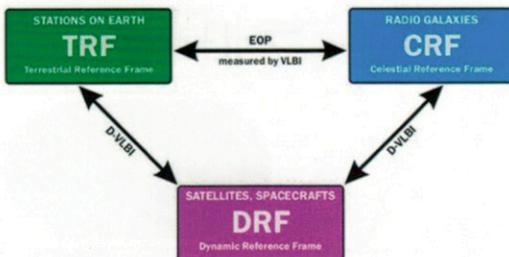
- Geodetic parameters (TRF, EOP, CRF)
- Atmosphere parameters (troposphere and ionosphere)
- IVS activities (associate AC, combination of troposphere products)



Sektion 1.1: Space Geodetic Techniques VLBI at GFZ

2. Space VLBI (research-oriented)

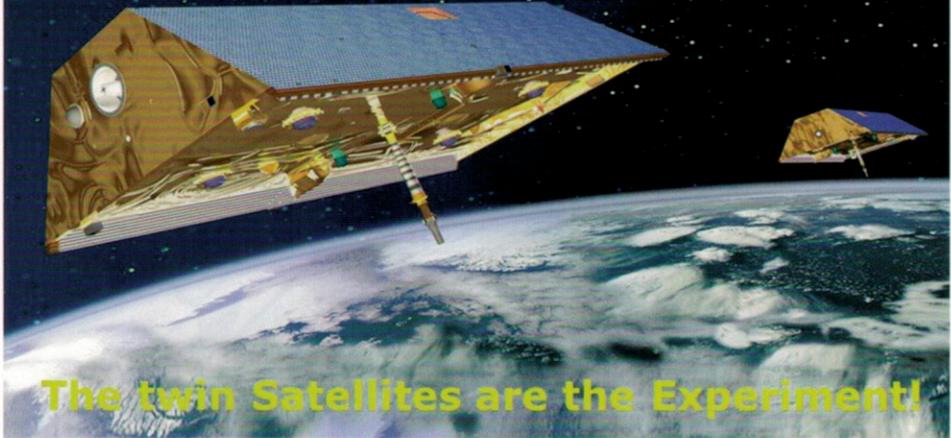
- Differential VLBI (D-VLBI) (radio source - spacecraft)
- Co-location in space (VLBI-transmitter, GNSS receiver, SLR retroreflector, ..., on same satellite)
- Observation of GNSS satellites with VLBI equipment



GRACE and GRACE-FO Twin Satellite Missions

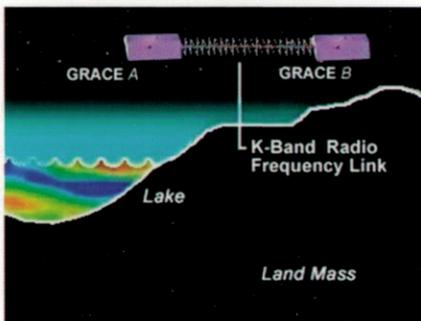
GRACE = Gravity Recovery and Climate Experiment
(NASA/DLR MOU, 17.3.2002-today)

GRACE-FO (NASA/GFZ MOU, launch in Jan 2018)



Section 1.2: Global Geomonitoring & Gravity Field GRACE Measurement Principle

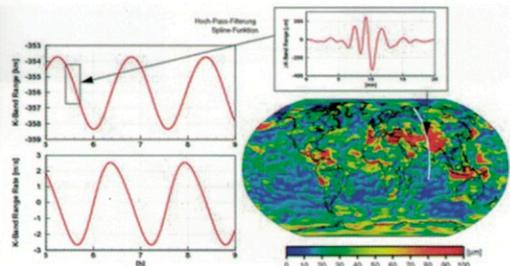
$$s = 220 \pm 50 \text{ km}$$



$\sigma_s = \text{few } \mu\text{m}$
(a tenth of the thickness of a human hair)
resp.
 $\sigma_s/dt = 100 \text{ nm/s}$

Left: 1/rev separation change (primarily flattening of the Earth): $\pm 2 \text{ km}$

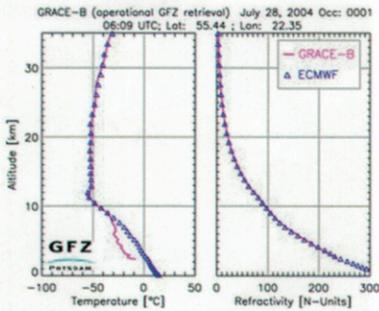
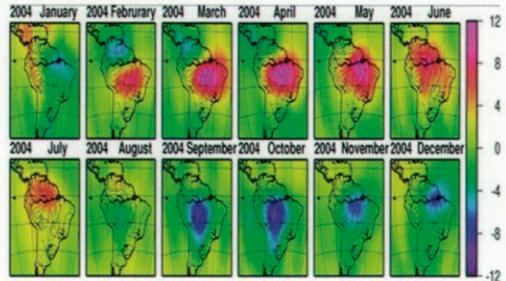
Right: Observed mass change related distance variation: $\pm 200 \mu\text{m}$



Section 1.2: Global Geomonitoring & Gravity Field

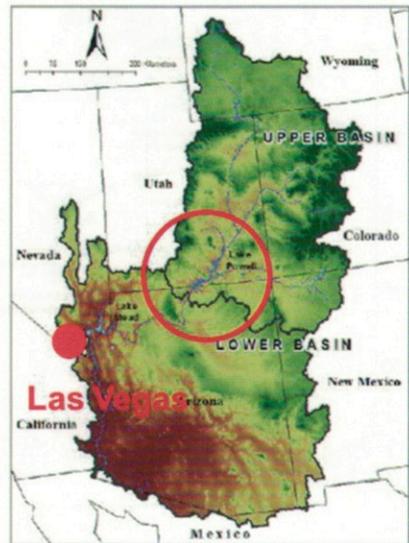
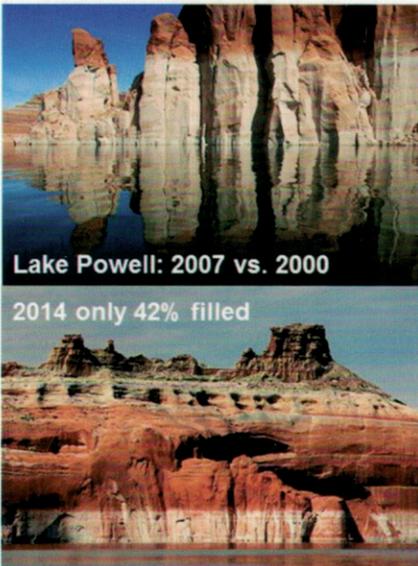
GRACE Objectives

Prime Mission Goal: Observation of the time variable gravity field (on monthly/weekly scales) for interdisciplinary research (Hydrology, Oceanography, Glaciology, Geophysics, Geodesy)



Secondary Mission Goal: Operational sounding of the atmosphere by radio occultation technique (ca. 150 globally distributed vertical profiles for weather services and climate research)

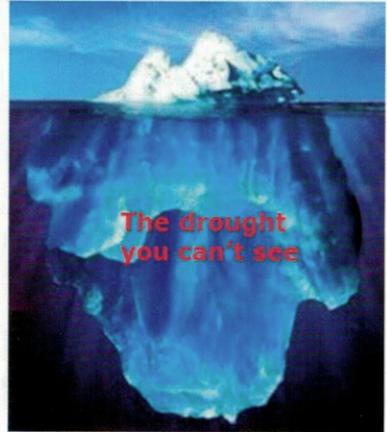
Example 2: TWS, Drought and Groundwater Depletion in the Colorado River Basin from GRACE



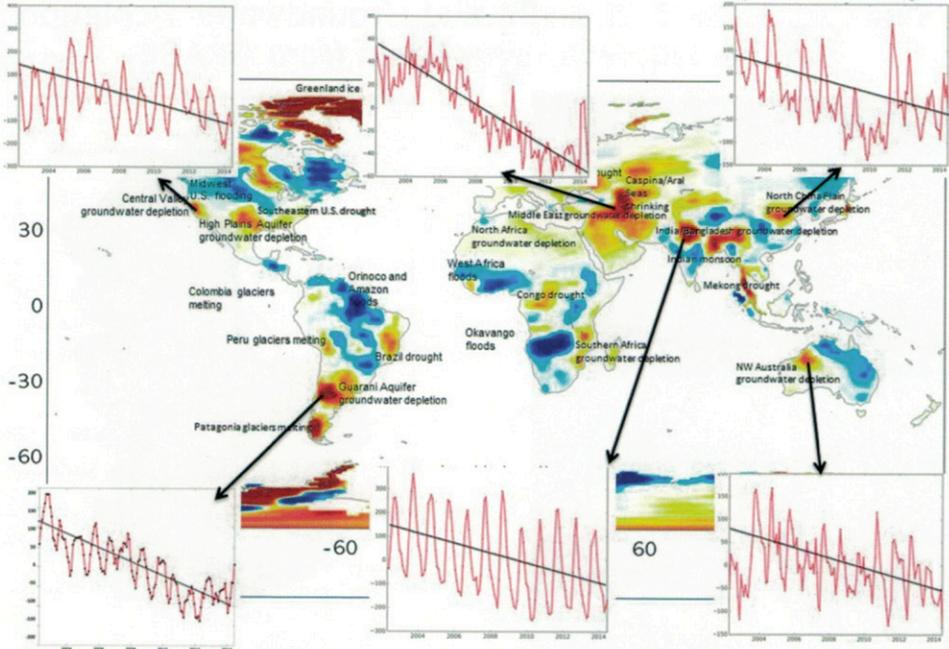
Courtesy: Castle et al. (2014)

Monthly TWS & GW Anomalies 2003-2014 from GRACE

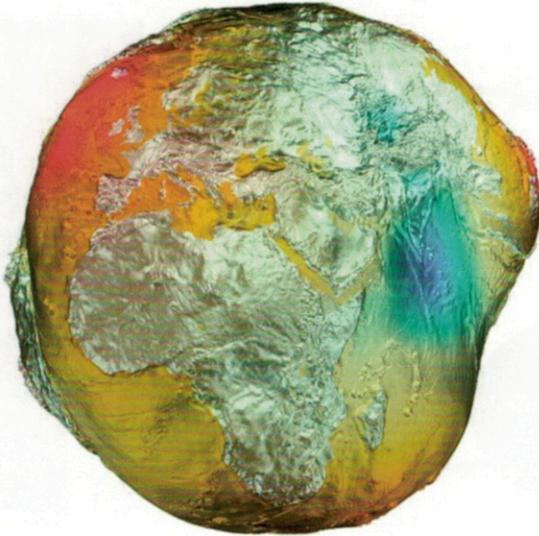
- Dramatic change in TWS/GW trends since 2/2010
- During this period of sustained drought, **groundwater accounted for 50.1 km³ of the total 64.8 km³** (1,5 times volume of Lake Konstanz) of freshwater loss!
- The rapid rate of depletion of groundwater storage ($5.8 \pm 0.9 \text{ km}^3/\text{yr}$) **far exceeded the rate of depletion of Lake Powell and Lake Mead.**
- **GW** is a strategic reserve, **loss impacts public water supply** (e.g. Las Vegas)



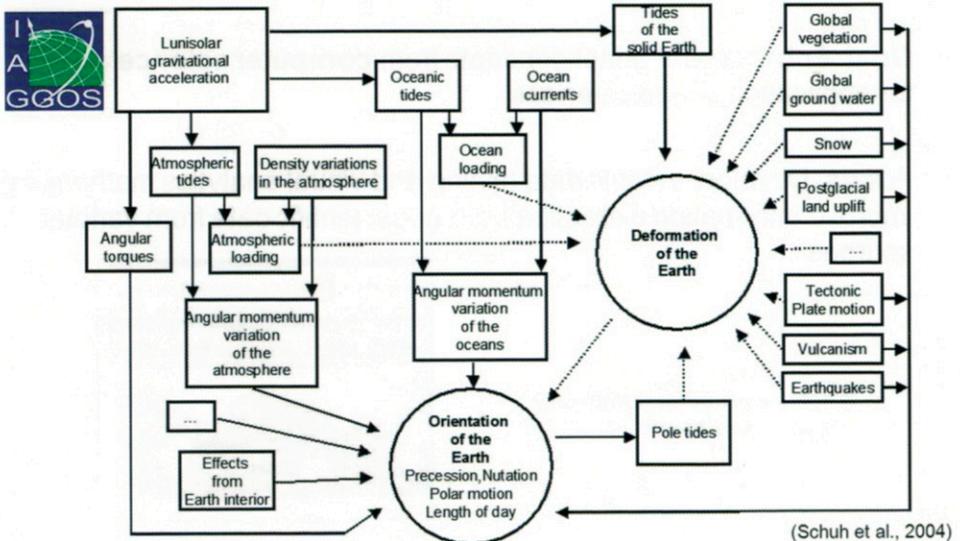
Trends in Freshwater Availability from GRACE (2002-2014)



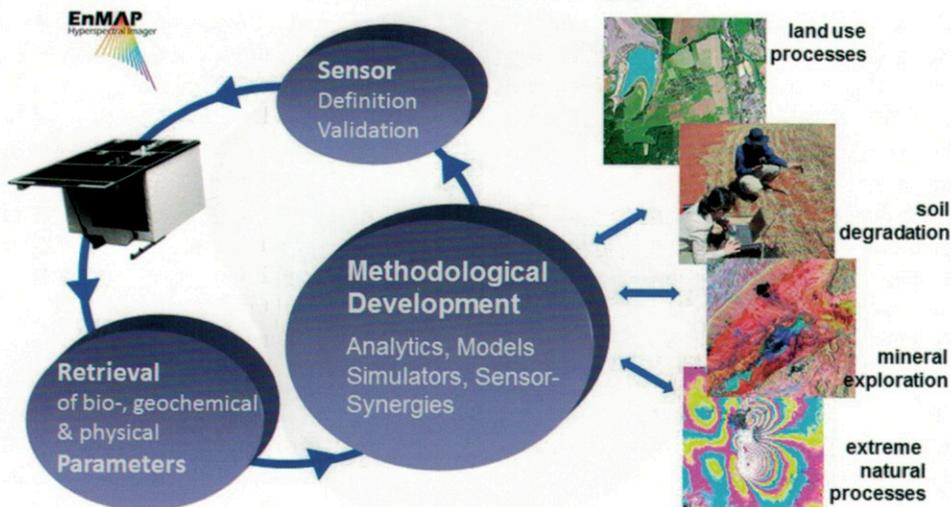
Potsdamer Schwerekartoffel



Section 1.3: Earth System Modelling Example Earth Rotation: Earth System Parameters



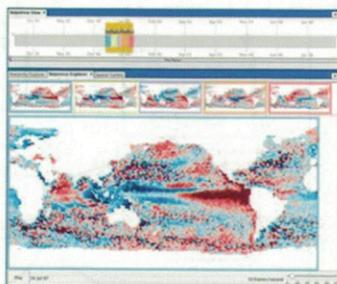
Section 1.4: Remote Sensing General Strategy



Section 1.5: Geoinformatics

- **Goal:** Enhance and adapt concepts from **computer science** for application in **geosciences**
- **Focus:** Develop suitable data mining and visual analytics methods to improve information extraction from geoscientific data from various sources

What are prominent patterns in space and time?



Autoren:

Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Christoph Reigber

Jahrgang 1939

Christoph Reigber studierte Geodäsie an der TU München und promovierte (1969) und habilitierte (1974) sich an der gleichen Universität. Nach 10 Jahren als Dozent und als Projektleiter im Sonderforschungsbereich „Satellitengeodäsie“ an der TU München wurde er 1980 Direktor der Abteilung „Theoretische Geodäsie“ des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts in München und 1982 apl. Professor an der TU München. 1992 wurde er als Direktor des Departments „Geodäsie und Fernerkundung“ an das neu gegründete GeoForschungsZentrum GFZ der Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Telegrafenberg in Potsdam berufen und zum ordentlichen Professor am Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam ernannt. Nach seiner Emeritierung Ende 2004 war er bis 2010 in einem deutschen KMU Raumfahrtunternehmen und als Co-Direktor des Zentralasiatischen Instituts für Angewandte Geowissenschaften in Bischkek/Kirgistan tätig.

An der Entwicklung, Nutzung und internationalen Koordination von Satellitenverfahren für die Geodäsie und Geodynamik war Christoph Reigber während seiner 40jährigen Dienstzeit in München und Potsdam vielfältig beteiligt. Er war Projektleiter von mehreren geowissenschaftlichen Großprojekten - dem Präzisionspositionierungssystem PRARE auf den Satelliten METEOR 7.3 und ERS-2 und den Schwerefeldmissionen GFZ-1, CHAMP und GRACE – und war u.a. Vorsitzender der IAG/COSPAR Kommission für die „Internationale Koordination von Raumfahrttechniken der Geodäsie und Geodynamik“, sowie Vorsitzender des Führungsgremiums des Internationalen Erdrotationsdienstes IERS und des Leitungsgremiums des Internationalen GPS Dienstes IGS.

Christoph Reigber ist Mitglied der Academia Europaea, korrespondierendes Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Alexander v. Humboldt Preisträger und erhielt eine Reihe weiterer Auszeichnungen nationaler und internationaler Organisationen, Institutionen und Raumfahrtagenturen.

Anschrift:

Hauptstraße 8, D-82229 Seefeld

reigber@web.de

Professor Dr.-Ing. Karl Heinz Ilk

Jahrgang 1944

Karl Heinz Ilk erlernte den Beruf des Katastertechnikers von 1958 bis 1962, studierte anschließend Geodäsie an der Fachhochschule für Bau- und Vermessungstechnik in München und von 1965 bis 1970 an der Technischen Universität München. Seine berufliche Laufbahn begann er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität München, wo er 1976 aus einem Thema aus der Satellitengeodäsie promovierte. Von 1978 bis 1990 war er Assistent und Dozent für Astronomische und Physikalische Geodäsie. Im Jahre 1983 habilitierte er sich. Er hatte von 1990 bis 1995 eine außerordentliche Professur für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der Technischen Universität München inne. In den Jahren 1987 bis 1992 hielt er sich insgesamt etwa 2 Jahre als „Senior Geodetic Expert“ in Indonesien zur Schaffung eines Nivellement- und Schwerenetzes auf. Von 1995

hatte er bis zu seiner Pensionierung die Professur für Astronomische, Physikalische und Mathematische Geodäsie an der Universität Bonn inne. Seine wissenschaftliche Tätigkeit in dieser Zeit bezog sich vor allem auf die Schwerefeldbestimmung mit modernen Satellitenmethoden und dessen Nutzung zur Erforschung der Massenbewegungen im System Erde.

Anschrift:

Wißmannstr. 2, D-81929 München,

kh_ilk@gmx.de

Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Wolf-Dieter Schuh

Jahrgang 1957

Nach dem Schulbesuch in Oberschützen (Burgenland), wo er 1975 die Matura ablegte, begann er an der Technischen Universität in Graz das Studium des Vermessungswesens und legte 1981 die zweite Diplomprüfung mit Auszeichnung ab. Schon seit 1979 war er am Institut für „Theoretische Geodäsie“ an der TU Graz in Vollzeit als Studienassistent und später als Universitätsassistent bei den Professoren Meissl und Sünkel tätig.

Bereits ab 1983 wurde er als Lehrbeauftragter mit eigenverantwortlicher Lehre in den Bereichen „Geodätisches Rechnen“, „Programmierung“, „Numerische Methoden“ und „Geodätischer Optimierung“ betraut. Im Jahre 1984 dissertierte er an der TU Graz. Parallel zur Vollzeitbeschäftigung als Universitätsassistent der TU Graz arbeitete er halbtags als Ingenieurkonsultenanwärter in einer privaten Vermessungskanzlei und legte 1991 die Ingenieurkonsultenprüfung ab. Ebenfalls 1991 wurde er zum Assistenzprofessor an der TU Graz ernannt und definitiv gestellt. Nach der Habilitation (Lehrbefugnis „Theoretische Geodäsie“) wurde er im Jahre 1996 zum außerordentlichen Universitätsprofessor an der TU Graz ernannt. Im Jahre 2000 folgte die Berufung zum C4-Professor für „Theoretische Geodäsie“ an die Universität Bonn, wo er die Nachfolge der Professoren Wolf und Koch antrat.

Seine Forschungsschwerpunkte bilden die Statistik und Ausgleichsrechnung, Signalverarbeitung und Stochastische Prozesse, Optimierung und das Hochleistungsrechnen. Gerne sieht er sich als „rechnender Geodät“.

Anschrift:

Gudenuer Weg 66, D-53127 Bonn

Dr.-Ing. habil. Joachim Höpfner

Jahrgang 1938

Joachim Höpfner studierte von 1957 bis 1962 Geodäsie an der Technischen Universität Dresden. Nach dem Studium war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Observator am Geodätischen Institut und ab 1970 am Zentralinstitut für Physik der Erde in Potsdam tätig. In den Jahren 1962 bis 1984 waren seine wissenschaftlichen Arbeitsgebiete Zeit- und Breitendienst, Erdrotation und Polbewegung. Am Beobachtungsprogramm zur Überwachung des Rotationsverhaltens der Erde war er durch simultane astronomisch-geodätische Zeit- und Breitenbestimmungen beteiligt. Von 1985 bis 1991 beschäftigte er sich mit

Themen zur Automatisierung in der Kartographie, zur digitalen Bildverarbeitung und Geoinformatik.

Er promovierte 1970 zum Dr.-Ing. und 1983 zum Dr. sc. techn. an der Technischen Universität Dresden zu Themen der Geodätischen Astronomie. 1991 erhielt er die *Facultas Docendi* und den Dr.-Ing. habil. von der Technischen Universität Dresden.

Von 1992 bis 2003 arbeitete er als Wissenschaftler am GeoForschungsZentrum Potsdam. Sein wissenschaftliches Tätigkeitsfeld in dieser Zeit waren Zeitreihenanalysen, speziell geodynamische Untersuchungen zu Polbewegungen und zur Erdrotation.

Seit Mitte der 1990er Jahre hat er verschiedene Themen zur Geschichte der Geodäsie und des Geodätischen Instituts Potsdam bearbeitet.

Anschrift:

Charlottenstr. 70/17, D-14467 Potsdam

joachimhoepfner@t-online.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Harald Schuh

Jahrgang 1956

Harald Schuh studierte Geodäsie an der Universität Bonn und promovierte dort 1986 zum Thema Radiointerferometrie auf langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry, VLBI). Bis 1988 war er an der Universität Bonn weiterhin als Dozent und anschließend als Programmwissenschaftler beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln tätig. Von 1995 bis 2000 war Harald Schuh Leiter der Abteilung Erdrotation am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut in München. Anschließend wechselte er an die Technische Universität Wien, wo er einen Lehrstuhl für Höhere Geodäsie innehatte und ab 2003 Direktor des Instituts für Geodäsie und Geophysik war. Seit 2012 ist er der Direktor des Departments Geodäsie am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ und Professor für Satellitengeodäsie an der Technischen Universität Berlin.

Seit über 30 Jahren widmet sich Harald Schuh weltraumgeodätischen Fragen mit dem Schwerpunkt VLBI und Erdrotation. Er war von 2007 bis 2013 Vorsitzender des Internationalen VLBI-Dienstes für Geodäsie und Astrometrie (IVS) und ist seit 2015 Präsident der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG). Harald Schuh ist Autor oder Koautor von etwa 350 Publikationen und Editor von mehr als einem Dutzend wissenschaftlicher Bücher und Tagungsbänden zu seinen Hauptthemen VLBI, Erdrotation, Geodynamik, geodätische Referenzrahmen, Troposphäre und Ionosphäre. Zu Harald Schuhs Auszeichnungen zählen der Descartes-Preis der Europäischen Union für das Projekt ‚Non-rigid Earth nutation model – Pinpoint positioning in a wobbly world‘ im Jahr 2003 und die Vening-Meinesz-Medaille der European Geosciences Union (EGU) im Jahr 2011. Eine Ehrendoktorwürde erhielt Harald Schuh 2009 von der Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie in Sofia/Bulgarien.

Anschrift:

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,

Telegrafenberg, D-14473 Potsdam

schuh@gfz-potsdam.de