

Dabei stellten *Bruns* und *Helmert* fest: Es ist „die Abweichung des der Meeresfläche entsprechenden Niveausphäroids vom Rotationsellipsoid gleicher Abplattung eine so geringe, daß der Gebrauch der Geodäten gerechtfertigt erscheint, das Geoid, abgesehen von den Verbiegungen lokalen und kontinentalen Charakters, als abgeplattetes Rotationsellipsoid anzusehen“¹⁾. Die „Verbiegungen“ werden durch sogenannte störende Massen hervorgerufen, von denen *Clairaut* noch absah. Ihr Potentialwert ist im Glied T enthalten. — Die Niveauläche $W = \text{constans}$ ist dann bestimmt, wenn die Schwerkraft g in jedem Punkt der Fläche bekannt ist. Für ein Niveausphäroid besteht nach dem Clairautschen Theorem ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Koordinaten eines Punktes und der dort herrschenden Schwerebeschleunigung. Die Differenz zwischen der beobachteten und nach dem Clairautschen Theorem errechneten Schwerkraft eines Punktes ist die Schwereanomalie. Aus ihr kann der Abstand N zwischen Niveauläche und Niveausphäroid abgeleitet werden (Theorem von *Bruns*, vgl. Bild 10). — Die Schwierigkeit liegt allerdings darin, daß die Entwicklung des Potentials $W = U + T$ nur für den oben angegebenen Punkt P „außerhalb“ streng gültig ist; das heißt so lange außerhalb des Geoids Massen liegen, ist eine eindeutige Bestimmung des Geoids aus Schweremessungen nicht möglich. Die Wirkung der außerhalb des Geoids liegenden Massen kann aber naturgemäß nur genähert berücksichtigt werden, zumal eine Verlagerung dieser Massen in den vom Geoid begrenzten Erdkörper im allgemeinen eine Verschiebung der Niveauläche des Geoids bewirkt.

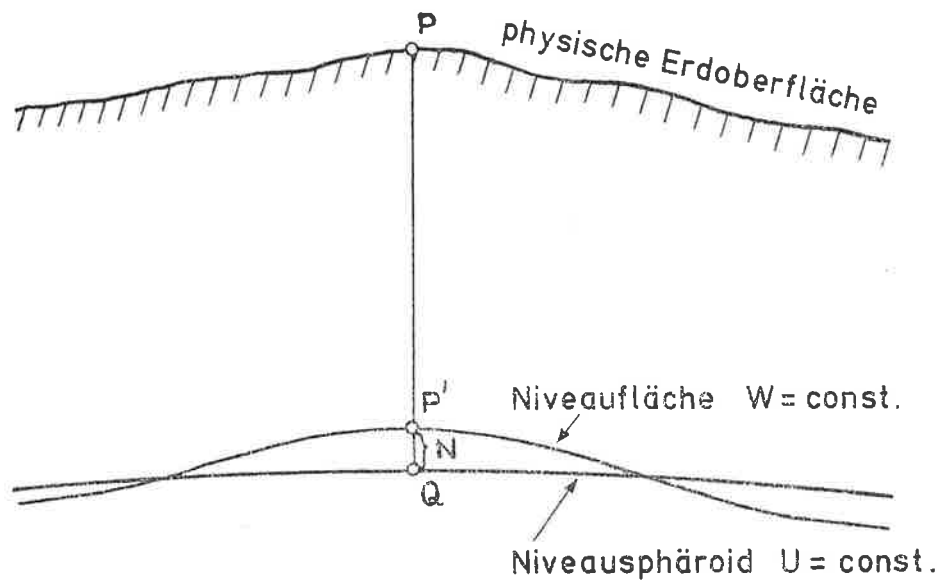


BILD 10

6.2. Die Messung der Schwerebeschleunigung auf dem Festland

Die Abhängigkeit der Schwerebeschleunigung von der geographischen Breite wurde von einem Mitglied der Pariser Akademie der Wissenschaften, *J. Richer*, entdeckt. *Richer* stellte 1672 in Cayenne, 5° nördlich des Äquators, fest, daß seine auf Pariser Zeit eingestellte Pendeluhr täglich um zwei Minuten hinter der astronomisch bestimmten Ortszeit zurückblieb²⁾. *Richer* selbst zog daraus den Schluß, daß die Erde am Äquator angeschwollen sei, und *Newton* und *Huygens* bauten darauf ihre Theorie vom abgeplatteten Sphäroid. — Die ersten systematischen Pendelmessungen

1) *Fr. R. Helmert*: Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie, Bd. II, Leipzig 1884, S. 91.

2) *J. Richer*: Observations astronomiques et physiques faites en l'isle de Cayenne, Paris 1679.

wurden im 18. Jahrhundert durchgeführt, unter anderem in London, Paris, Toulouse, Wien, Gotha, Petersburg, in Peru, Lappland und auf Jamaika. Zu Anfang des 19. Jahrhunderts rüsteten Engländer, Franzosen und Russen mehrere Schiffsexpeditionen aus, um die Größe der Schwerkraft in entfernt liegenden Gegenden der Erde zu bestimmen. Es sind zu nennen ¹⁾:

Beobachter	Beobachtungs-jahr	Anzahl der Stationen	geogr. Breite der Stationen
<i>L. de Freycinet</i> , franz. Kapitän	1817—1820	9	— 51° bis + 50°
<i>E. Sabine</i> , britischer Kapitän	1822—1824	13	— 15° bis + 80°
<i>F. B. v. Lütke</i> , russisch. Admiral	1826—1829	9	— 55° bis + 60°
<i>H. Foster</i> , britischer Kapitän	1828—1831	14	— 65° bis + 51°

Die IE bezeichnete nun bereits auf ihrer ersten Sitzung 1864 die „vollständige Untersuchung der Wirkungen der Schwerkraft“ als eine ihrer Aufgaben. Während die genannten Kapitäne einfach konstruierte, invariable Pendel benutzten, empfahl sie das Reversionspendel und beauftragte die Hamburger Firma *J. Repsold*, derartige Pendelapparate zu bauen. *W. Bessel* hat die notwendigen Bauelemente beschrieben, nachdem *J. Bohnenberger* bereits 1811 in seinem Lehrbuch der Astronomie das Grundprinzip des Reversionspendels angegeben hatte ²⁾. Dabei wurde das Schwerependel im allgemeinen auf die Schwingungsdauer einer Zeiteinheit abgestimmt und aus dem Schneidenabstand die Länge des mathematischen Pendels ermittelt.

In den Jahren nach 1864 entfaltete sich bezüglich der Pendelmessungen ein reger Austausch der Erfahrungen: Etwa um das Jahr 1870 wurde die Koinzidenzmethode eingeführt, das ist der Vergleich der Pendelschwingungen mit den Schwingungen einer genau gehenden Pendeluhr. Die 4. A. C. 1874 beauftragte eine Kommission mit der Untersuchung verschiedener Pendelapparate, wobei besonderer Wert gelegt wurde auf die Lagerung der Schneiden und die Zurückführung der Pendelschwingungen auf unendlich kleine Schwingungen eines physikalischen Pendels. — 1875 regte die P. C. an, verschiedene Pendelapparate im Normaleichungsamt in Berlin untereinander und mit dem von *Bessel* 1826 ermittelten Fundamentalwert zu vergleichen.

Im Verlaufe derartiger Prüfmessungen entdeckte *C. S. Peirce*, Mitarbeiter des U. S. Coast and Geodetic Survey, daß sich die Schwingungen des Pendels auf das Pendelstativ übertragen. *Peirce* ließ sein Pendel abwechselnd an der Wand oder auf einem Stativ schwingen und stellte fest, daß die Meßergebnisse durch das Mitschwingen des Stativs verfälscht werden, und zwar bis zu 0,016 cm/sec².

In der Folgezeit entwickelten sich lebhafte Diskussionen darüber, wie dieses Mitschwingen beseitigt werden könne: Der Direktor der Sternwarte zu Genf, *E. Plantamour*, wies nach, daß auch das Fundament des Stativs einen störenden Einfluß auf die Schwingungen des Pendels ausübt. — Der Präsident des Längenbüros in Paris, *H. Faye*, äußerte 1877 den Gedanken, daß zwei entgegengesetzt schwingende Pendel das unerwünschte Mitschwingen kompensieren. — Der Genfer Mathematikprofessor *Ch. Cellérier* schlug vor, zwei Pendel gleicher Form, aber verschiedenen Gewichtes auf demselben Stativ nacheinander schwingen zu lassen; ein Verfahren, das *G. Defforges*, Bataillonschef im Geographischen Amt der Armee zu Paris, bei seinen zahlreichen Schweremessungen benutzte. — Die Europäische Gradmessung setzte Studienkommissionen ein. *Cellérier*, *Peirce* und *Th. v. Oppolzer*, Professor für Astronomie und Geodäsie in Wien, entwickelten Formeln, die den störenden Einfluß des Mitschwingens erfassen sollten. — In Berlin wurden verschiedene Pendelapparate verglichen. — Durchgreifende Verbesserungen erbrachten aber erst die Erfindungen von *R. v. Sterneck*.

¹⁾ *J. B. Listing*: Konstanten des Erdkörpers, Göttingen 1878.

²⁾ Vgl. *Astronomische Nachrichten* Nr. 697, Bd. 30, 1850.

Dieser österreichische Offizier baute in den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts einen Pendelapparat, um den Schwereunterschied zweier Orte allein aus dem Unterschied der Schwingungsdauer eines in beiden Orten schwingenden Pendels abzuleiten, unabhängig von der Länge des Pendels. Er leitete damit die Epoche der relativen Pendelmessungen ein. *Sterneck* konstruierte invariable Halbsekundenpendel und setzte für die Zeitbestimmung nach der Koinzidenzmethode Chronometer mit elektrischem Kontakt ein. — Nach ersten Vorversuchen, unter anderem 1882 im 1 000 m tiefen St. Adalbert-Schacht des Pflbramer Silberbergwerkes, setzte *v. Sterneck* seinen Apparat 1887 auf Wunsch der P. C. auf der Nivellementsline Innsbruck—Bozen ein¹⁾. Mit Hilfe einer eigens errichteten astronomischen Station in Brixen und mittels telegraphischer Zeitübertragung überprüfte er täglich zweimal den Gang seiner Uhr. Für die Messung eines Standpunktes benötigte er jeweils nur einen Nachmittag. Dies war für damalige Verhältnisse eine ungewohnt kurze Beobachtungszeit.

R. v. Sternecks handlicher Pendelapparat, der in Einzelheiten noch verbessert wurde, erlaubte eine außerordentlich schnelle Ausdehnung der Schweremessungen. Kannte man 1884 Schwerewerte nur an 120 verschiedenen Stationen, so waren es 1892 bereits 500 Punkte, 1900 etwa 1 400 und 1912 mehr als 2 500 Orte, an denen die Schwerkraft, meist nach *v. Sternecks* Verfahren, gemessen worden war. — *R. v. Sterneck* selbst führte bis 1900 an 270 Orten Schweremessungen durch. Die österreichische Marine rüstete mehrere Schiffe mit Pendelapparaten aus und bestimmte zwischen 1892 und 1897 Schwerewerte an 72 über die ganze Erde verteilten Küstenpunkten. Das ZB ermittelte bis 1912 an 200 Stationen in Preußen und 21 Orten im Ausland die Größe der Schwerebeschleunigung relativ zu Potsdam. Es übernahm die Überprüfung der Beobachtungsinstrumente und bildete laufend Wissenschaftler aus aller Welt in der Technik der relativen Schweremessung aus. Ebenso unterstützte es deutsche, britische und französische Expeditionen, sofern dieselben Pendelmessungen in Afrika und der Antarktis durchführten.

Die IE setzte für die Schweremessungen Berichterstatter ein, die die Schweredaten sammelten. *Helmert* stellte in den Verhandlungen der 13. A. C. 1900 alle bis dahin bekannt gewordenen relativen Pendelmessungen zusammen und lieferte eine genaue Beschreibung der zur Anwendung gekommenen Verfahren. Sein Bericht bildete die Grundlage für alle weiteren, von der IE veröffentlichten Schweremessungsberichte.

Der Pendelapparat *v. Sternecks* diente zum Aufbau eines großräumigen Schwerenetzes. Für das spezielle Studium der Krümmungsverhältnisse eignete sich der Apparat jedoch nicht. Hierfür konstruierte *R. v. Eötvös*, Physikprofessor in Budapest, die Dreh- oder Torsionswaage, die zwar nicht die Schwerebeschleunigung selbst liefert, dafür aber eine sehr genaue Bestimmung der räumlichen Schwereänderungen sowie der Abweichungen der Niveauläche von der Kugelgestalt ermöglicht²⁾. — *Eötvös* setzte seine Drehwaage 1901 zum ersten Mal auf der Eisdecke des Plattensees ein. Bis 1905 besetzte er 248 Stationen in Ungarn. Hatte man bisher angenommen, die Krümmungsradien des Geoids liegen zwischen 6 500 km und 6 800 km, so stellte man nun Radien zwischen 3 000 km und 200 000 km fest. Die Messungen mit der Drehwaage gaben übrigens auch zum ersten Mal Aufschluß über die Anordnung von Massen verschiedener Dichte.

Eine weitere Förderung erfuhren die Schweremessungen in den 20er Jahren durch die Erfindung der statischen Gravimeter. Sie fanden Verwertung bei der Prospektion von Bodenschätzen und wurden daher sehr rasch zu großer Vollkommenheit entwickelt. Die AIG machte sich diesen Umstand insofern zunutze, als sie 1948 den zahlreichen Prospektionsfirmen empfahl, mit der AIG zusammenzuarbeiten, im Rahmen der Prospektionsarbeiten alle zehn Kilometer Schwerewerte zu bestimmen und dieselben mit allen erforderlichen Einzelheiten dem Bureau Central, später einem Bureau Gravimétrique, mitzuteilen. Die AIG ihrerseits wollte für den Aufbau eines Eichsystems sorgen.

Der Einsatz statischer Gravimeter ermöglichte eine bis dahin ungeahnt rasche Ausdehnung und Verdichtung des Schwerenetzes. Man ersieht dies aus der Tatsache, daß es heute allein in Deutschland mehr als 100 000 gravimetrisch bestimmte Punkte gibt. Waren nämlich früher mittels

1) *R. v. Sterneck*: V. d. P. C. 1887, Anhang VIIId; vgl. auch Abschnitt 3.4.

2) V. d. 13. A. C. 1906, S. 337; Wiedemanns Annalen, Bd. 59, 1896, S. 354 ff.

der Pendelmessungen Beobachtungszeiten von einem halben bis zu einem vollen Tag pro Station notwendig, so können heute bei Benutzung geländegängiger Wagen 20 bis 30 Gravimeterpunkte pro Tag in einem weitmaschigen Netz besetzt werden. Dabei erzielen Gravimeter eine Genauigkeit, die 20 bis 50 mal größer ist als sie ein selbst zwei Tage schwingendes Pendel liefert. — Die AIG fördert die Entwicklung der Gravimeter dadurch, daß sie eine Studiengruppe für Beobachtungsverfahren mit Gravimetern auf fester Erde unterhält.

6.5. Die Messung der Schwerebeschleunigung auf dem Meer

Eine vollständige Lösung der Aufgabe, die Figur der Erde zu bestimmen, erfordert Schwerewerte, die über die gesamte Erdoberfläche verteilt liegen. Das Schwerenetz muß also nicht nur über die Kontinente ausgebreitet werden, sondern auch über die Meere. Zwar hatten zu Anfang des 19. Jahrhunderts britische und französische, später auch deutsche und österreichische Kapitäne an verschiedenen Küsten und auf verschiedenen Inseln Pendelmessungen durchgeführt. Die Anzahl der Messungen war aber verhältnismäßig gering. Zudem bestand die Frage: Sind die auf Inseln beobachteten Schwerewerte repräsentativ für die Ozeane, die mit ihren Tiefen bis zu 10 000 m, massenmäßig gesehen, wie große Löcher in der Erdkruste anmuten? Sind auch die Tiefen der Weltmeere durch unterirdische Massenüberschüsse isostatisch ausgeglichen? — Aber auf welche Weise konnten auf bewegtem Wasser Schweremessungen durchgeführt werden? Pendelmessungen schienen dazu nicht geeignet. Auch der Elastizitätsapparat, das Bathometer, mit dem *William Siemens* 1875 eine Beobachtungsreihe für die Schwerkraft auf dem Meer anstellen ließ, lieferte keine befriedigenden Ergebnisse.

Zum ersten Mal gelang es *O. Hecker*, einem wissenschaftlichen Mitarbeiter des ZB, die Größe der Schwerebeschleunigung auf offener See zu bestimmen. *Hecker* unternahm im Sommer 1901 mit finanzieller Unterstützung der IE eine Schiffsreise von Hamburg nach Rio de Janeiro und zurück. Er führte dabei vier Quecksilberbarometer mit, deren Quecksilberhöhen er von Zeit zu Zeit an einer Skala ablas beziehungsweise photographisch registrierte. Um den Einfluß des wechselnden Luftdruckes auf die Quecksilbersäulen eliminieren zu können, bestimmte er laufend die Größe des Luftdruckes mit Hilfe von sechs Siedethermometern. Damit gelang es ihm, die Größe der auf die Quecksilberbarometer wirkenden Schwerkraft zu errechnen. Die Vibrationen des Schiffskörpers versuchte *Hecker* mittels Filsplatten und durch kardanische Aufhängung der Geräte zu kompensieren. Außerdem registrierte er die Ausschläge einer Spiralfeder, die die Instrumente mit dem Schiffskörper verband. An den Küstenstationen führte er Pendelmessungen durch und eichte damit seine Quecksilberbarometer¹⁾.

Die Genauigkeit der Schwerkraftbestimmung auf dem Meer betrug zwar nur $\pm 0,030 \text{ cm/sec}^2$, während Pendelapparate eine Genauigkeit von $\pm 0,002 \text{ cm/sec}^2$ erreichten²⁾, *Heckers* Ergebnisse waren aber sehr ermutigend. Die 4. A. C. 1903 beschloß denn auch, für eine weitere Erforschung des Schwerefeldes auf dem Meer einen Geldbetrag von 21 000 Mark auszusetzen.

Hecker traf daraufhin die Vorbereitungen zu einer zweiten Schiffsexpedition, die ihn 1904 von Bremerhaven durch das Rote Meer über den Indischen Ozean nach Melbourne, weiter über den Stillen Ozean nach San Francisco und zurück über Honolulu, Tokio, Zi-ka-wei, Hongkong, Bangkok, Rangoon, Kalkutta und Colombo führte. *Hecker* registrierte diesmal die Höhen der Quecksilbersäulen nur noch photographisch. Er sorgte für gute Dämpfung der Schiffsvibrationen und möglichst genaue Ermittlung der Schiffsbewegungen. Seine auf dem Schiff erhaltenen Schwerewerte, insgesamt 165, schloß er mittels Pendelmessungen an bekannten Küstenstationen an. — Als Ergebnis wertete *Hecker*: „Die Schwerkraft ist sowohl auf dem Indischen wie auch auf dem Großen Ozean annähernd normal und entspricht der Helmhertschen Schwereformel von 1901. Es hat sich also für diese beiden Weltmeere ebenso wie früher für den Atlantischen Ozean die Prattische Hypothese von der isostatischen Lagerung der Massen der Erdkruste als zutreffend erwiesen, so daß man sie jetzt als ein, abgesehen von lokalen Anomalien, allgemein gültiges Gesetz ansehen kann“³⁾.

1) Veröff. d. P. G. I., Neue Folge Nr. 11, Berlin 1903.

2) ZB d. IE: Neue Folge Nr. 16 d. Veröff., Berlin 1908.

3) ZB d. IE: Neue Folge Nr. 16 d. Veröff., Berlin 1908, Vorwort.