

# Von der Pendelmessung zur GRACE-Mission

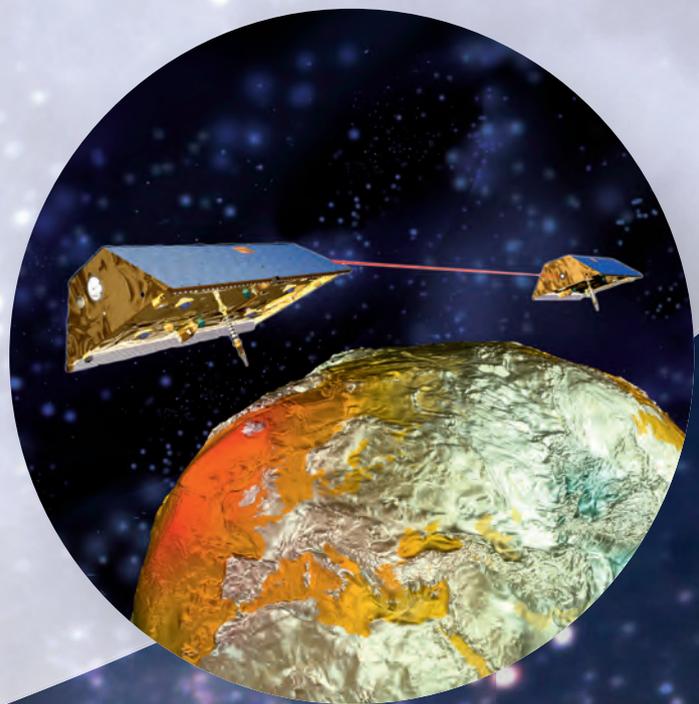
Zur Geschichte der Geodäsie auf dem  
Telegrafenberg in Potsdam



Rückblick auf ausgeführte  
Arbeiten und wissenschaftliche  
Leistungen des Geodätischen  
Instituts Potsdam

Begleitheft zur Ausstellung

Ausstellung anlässlich des  
150. Jubiläums der Gründung der  
„Mittleuropäischen Gradmessung“  
als Vorläufer der Internationalen  
Assoziation für Geodäsie (IAG)



**GFZ**  
Helmholtz Centre  
POTSDAM

**Impressum:**

**Herausgeber:**

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam  
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

**Texte:**

Dr. Joachim Höpfner

**Redaktion:**

Dr. Sibylle Itzerott

**Umschlag:**

Grit Schwalbe

**Druck:**

Druckerei Arnold, Großbeeren

## **Thema 1: Geschichte des Institutes**

### **Baeyers Idee von der Gradmessung**

Im Jahre 1857 schied Generalleutnant Johann Jakob Baeyer (1794-1885) als Chef der Trigonometrischen Abteilung im Preußischen Generalstab mit 63 Jahren aus dem aktiven Dienst aus. Vom Preußischen König Friedrich Wilhelm IV. (1795-1861) mit seinem bisherigen Gehalt zur Disposition (z. D.) gestellt, wendet er sich wissenschaftlichen Fragen zu.

Bereits in Jahren 1831 bis 1834 hatte J. J. Baeyer mit Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), Professor für Astronomie und Direktor der Sternwarte in Königsberg, Gradmessungsarbeiten in Ostpreußen durchgeführt. Weitere Vermessungen, an denen er als Generalstabsoffizier teilgenommen hatte, waren: 1837-1842 Ostsee-Küstenvermessung, 1835 Trigonometrisches Nivellement Swinemünde-Berlin, 1846/1847 Basismessungen bei Berlin und Bonn, 1849 Trigonometrisches Nivellement Berlin-Brocken-Inselsberg. Um Größe und Figur der Erde genau zu bestimmen, legte er im April 1861 seinen Plan in der Denkschrift "Entwurf zu einer mitteleuropäischen Grad-Messung" beim Preußischen Kriegsministerium vor. Schon am 20. Juni 1861 erließ der König von Preußen Wilhelm I. (1797-1888) eine Kabinettsorder mit seinem Befehl Baeyers Plan "durch Verbindung der geodätischen Messungen in denjenigen Ländern, welche mit Deutschland zwischen gleichen Meridianen liegen, eine mitteleuropäische Gradmessung herzustellen". Im gleichen Jahr noch publizierte J. J. Baeyer seine ausführliche wissenschaftlich begründete Abhandlung "Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung", worin er den damaligen Stand auf dem Gebiet der Gradmessung analysierte und die Möglichkeiten einer Fortführung der Arbeiten darlegte. Ziel war es, die Landestriangulationen zu homogenisieren und zu verbinden, diese Ergebnisse geodätisch-astronomischen Lotrichtungsmessungen gegenüberzustellen und auf diese Weise Strukturen des Geoids zu untersuchen.

### **Gründung der gemeinsamen Gradmessung und des Institutes**

Vom 24. bis 24. April 1862 fand die Gründungskonferenz zur Mitteleuropäischen Gradmessung in Berlin statt. J. J. Baeyer empfing als Kommissar der Königlich-Preußischen Regierung die Regierungsbeauftragten von Österreich und Sachsen, um sich vorläufig über die Einleitung zu den Arbeiten einer Mitteleuropäischen Gradmessung zu besprechen. Dabei wurde bewusst das Ziel verfolgt, möglichst bald weitere Staaten einzubeziehen. Auf der ersten Allgemeinen Konferenz der Mitteleuropäischen Gradmessung vom 15. bis 22. Oktober 1864 in Berlin nahmen dann bereits Bevollmächtigte von 13 Staaten teil. Als ausführendes Organ wurde ein Zentralbüro beschlossen und zum Präsidenten des Zentralbüros Generalleutnant z. D. J. J. Baeyer gewählt. Nach der Bereitstellung der Mittel durch die Preußische Regierung im Jahre 1866 wurde das Zentralbüro, das auch den Preußen betreffenden Anteil der Arbeiten zu leisten hatte, eingerichtet. 1867 fand die zweite Allgemeine Konferenz in Berlin mit 3 weiteren europäischen Staaten als Konferenz zur europäischen Gradmessung statt. Wegen des großen Arbeitsaufwandes im Zentralbüro mit wachsender Anzahl Teilnehmer-Länder hatte zu dieser Zeit J. J. Baeyer bereits bei der Preußischen Regierung die Gründung eines wissenschaftlichen Instituts beantragt. Diese wurde im Jahre 1869 genehmigt. Mit Wirkung vom 1. Januar 1870 wurde die Gründung des Königlich-Preußischen Geodätischen Instituts mit Sitz in Berlin vollzogen, und J. J. Baeyer wurde zu dessen Präsident ernannt. Das Institut war in Privathäusern zuerst in der Lützowstr. 42 und ab Oktober 1886 in der Genthiner Str. 34 untergebracht.

Wegen der Beengtheit der Räumlichkeiten war schon ab 1875 der Bau eines eigenen Laboratoriums vorgesehen, was an einem geeigneten Bauplatz in Berlin scheiterte. Der wissenschaftliche Beirat des Instituts (Ch. A. F. Peters, F. R. Helmert, A. Auwers, L. Kronecker, W. Siemens und H. Bruns) machte deshalb 1878 den Vorschlag, im Gelände auf dem Telegrafenberg bei Potsdam ein neues Institutsgebäude zu errichten, wo das Hauptgebäude des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam im Bau war. J. J. Baeyer lehnte aber ab, da „an diesem Orte das Institut fern von Berlin in eine wissenschaftliche Isolierung gerathen werde“.

Im September 1885 starb General-Lieutenant z. D. J. J. Baeyer mit 91 Jahren. Ab 1. Januar 1886 übernahm Prof. Dr. Friedrich Robert Helmert (1843-1917) die Funktionen Baeyers als Direktor des Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung. Bald nach seinem Amtsantritt gelang es ihm, das Bauvorhaben für ein neues Hauptgebäude mit Geodätisch-Astronomischem Observatorium auf dem Telegrafenberg bei Potsdam in Gang zu bringen. Am 3. Juni 1886 wurde der Bauplatz in der Örtlichkeit festgelegt. Die Baupläne, die der Architekt und Oberbaudirektor Paul Emmanuel Spieker (1826-1896) nach Vorschlägen von Helmert entworfen hatte, wurden am 29. September 1886 im Preußischen Kultusministerium beraten. Auf der 8. Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung Ende Oktober 1886 erhielt F. R. Helmert Unterstützung dafür, den Plan für Verlegung des Geodätischen Instituts außerhalb Berlins zu forcieren und durch die Neubauten ausreichende und fachgerechte Arbeitsbedingungen zu schaffen. Nachdem das Preußische Finanzministerium die Pläne genehmigt hatte und Gutachten vom Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Herrmann von Helmholtz (1821-1894) sowie Wilhelm Julius Foerster (1832-1921) und Arthur Auwers (1838-1915) vorlagen, wurde das Projekt im Frühjahr 1888 dem Preußischen Landtag zur Bewilligung eingereicht. In den 1889 bis 1892 wurde das Hauptgebäude des Geodätischen Instituts Potsdam (A17) auf dem Telegrafenberg errichtet. Das dazugehörige Geodätisch- Astronomische Observatorium mit Beobachtungshäusern für Breiten- und Zeitbestimmungen und dem Turm für Winkelmessungen (heute: Helmert-Turm, A7) wurde von 1892 bis 1893 gebaut. 1891/1892 erfolgte der Umzug des Geodätischen Instituts und des Zentralbüros der Internationalen Erdmessung von Berlin nach Potsdam.

### **Die wissenschaftlichen Erfolge des Institutes**

Die heutig gültige Definition der Geodäsie geht auf die beiden Aussagen von Helmert und Bruns zurück, die die Geodäsie einerseits als „... die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“ (Helmert 1880) ansehen, andererseits konstatieren, dass „... das Problem der wissenschaftlichen Geodäsie ist die Ermittlung der Kräftefunktion der Erde“ ist (Bruns 1878), womit das Schwerefeld gemeint ist.

Die auf Baeyers Idee von der Verknüpfung der Gradmessung beruhende Gründung der IAG und des Geodätischen Institutes hat sich sehr bald als fruchtbringend für das Wissenschaftsfeld der Geodäsie herausgestellt. Die nachfolgende Zusammenstellung nennt die wichtigen Resultate der ersten sechs Jahrzehnte:

- Die 2. Allgemeine Konferenz 1867 hat mit ihrem Wirken erreicht, dass die Regierungen einheitlich das Meter als Einheit der Länge einführten und eine internationale Institution für Maß und Gewicht geschaffen wurde.

- Die Autorität der Gradmessungsorganisation war auf der Meridiankonferenz von 1883 die ausschlaggebende Kraft, die die Wahl des Meridians von Greenwich als Nullmeridian bewirkte.
- Es erfolgten ausgedehnte Höhenmessungen, es wurden nationale Höhen-Normalpunkte angelegt und die NN-Höhen eingeführt.
- Die Triangulationen der Teilnehmerländer wurden in großem Umfang homogenisiert, in ihrer Genauigkeit gesteigert und verbunden. Von 1870 bis 1950 war der Punkt Berlin/Rauenberg der Zentralpunkt des Deutschen Hauptdreiecksnetzes. 1950 wurde das Europäische Datum ED50 eingeführt mit Potsdam/ Helmertturm als Zentralpunkt.
- Die Begriffe Helmert-Transformation für eine Methode der Umrechnung von Koordinaten eines Punktes von einem in ein anderes Koordinatensystem und Helmert-Ellipsoid für die von ihm 1906 schon sehr genau beschriebene Erdform sind zentrale mathematische Anwendungen in der Geodäsie.
- In dem Begriff der Gauß-Krüger-Projektion ist das Wirken von Louis Krüger für die Vereinheitlichung der Koordinatensysteme in Mitteleuropa verewigt. Die Fortführung der grundlegenden Ideen von Gauß durch ihn führte zu der nach beiden benannten Abbildungsvorschrift der gekrümmten Erdoberfläche auf Landkarten.
- Engmaschige Schweremessungen an verschiedensten Orten wurden vorgenommen und erbrachten gute Informationen über das Erdschwerefeld und seine Anomalien.
- Es wurden engmaschig Lotabweichungen (Richtung der Schwerkraftwirkung) bestimmt, so dass Baeyers Ziel, auf die Geoidform schließen zu können, in großem Umfang erreicht werden konnte.
- Es konnten erstmals erfolgreich Schweremessungen auf Ozeanen durchgeführt werden.
- In Potsdam gelang eine sehr genaue Messung des Absolutwertes der Schwere (Kühnen und Furtwängler 1898 –1904) von  $981,274 \text{ cm/s}^2$ . Ein Messpfeiler des Geodätischen Instituts wurde daraufhin Welt-Schwerebezugspunkt. Er realisierte bis 1971 das "Potsdamer Schweresystem" als Welt-Bezugssystem. Wiederholte derartige Messungen in den Jahren 1968 bis 1970 waren die genauesten jemals ausgeführten Pendelmessungen. Sie haben den systematischen Fehler der Ursprungsmessung korrigiert und resultierten in  $g = 981,2601 \text{ cm/s}^2$ .
- Es wurden regelmäßige Wasserstandsbeobachtungen an Küsten durchgeführt.
- Periodische Schwankungen der Polhöhe (geographische Breite) als Widerspiegelung von Schwankungen der Erdachse im Erdkörper wurden entdeckt. 1895 wurde daraufhin ein Internationaler Breitendienst geschaffen. Sein Zentralbüro war zunächst im Geodätischen Institut in Potsdam. Der Dienst existiert – natürlich modernisiert – heute noch als *International Earth Rotation Service* (IERS) in Paris.
- In der Messkammer des Tiefbrunnens gelang weltweit erstmals der Nachweis der Gezeitenwirkung auf das Festland durch Messungen der Schwankungen der Lotrichtung (O. Hecker) und der Schwereintensität (W. Schweydar).

## Thema 2: Basismessungen, Basisvergrößerungsnetze und Triangulationen

### Einführung

Anfang des 19. Jahrhunderts wurden Landestriangulationen ausgeführt, um auf deren Grundlage Grundsteuerkataster aufzubauen und topographische Karten aufzunehmen. Eine **Triangulation** überdeckt ein Gebiet durch ein Dreiecksnetz. Zur Festlegung des Maßstabes dient dabei eine genau gemessene Basis. Friedrich Magnus Schwerd (1792-1871) publizierte im Jahre 1822 die wichtige Erkenntnis, dass es zweckmäßig ist, eine kleine gemessene Basis über ein **Basisvergrößerungsnetz** auf eine Hauptdreiecksseite zu übertragen.

1829 gab es ein Ersuchen der russischen Regierung auf Veranlassung des Generals Carl Friedrich von Tenner (1783-1859) an die preußische Regierung für eine Gradmessung in Ostpreußen zur Verbindung von preußischen und russischen Dreiecksketten. Die preußische Regierung war dazu bereit und beauftragte den Direktor der Königsberger Sternwarte Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) unter Mitwirkung von Johann Jacob Baeyer, diese Aufgabe auszuführen. Von 1832-1836 erfolgten die geodätischen und astronomischen Arbeiten, deren Ergebnisse in der 452 Seiten umfassenden Veröffentlichung **Gradmessung in Ostpreußen** erschienen sind. Diese Arbeit diente über viele Jahrzehnte als Vorlage für Gradmessungen.

Die gemessene **Dreieckskette** umfasst 17 Stationen und die Anschlüsse im Westen an die Linie Trunz - Wildenhof (Tennersche Vermessung) und im Osten an Memel - Lepaizi und Lepaizi - Algeberg (Struvesche Vermessung) und Anschluss an die Sternwarte Königsberg. Ferner wurde eine **Basislinie** erkundet, die in der Flur zwischen den Dörfern Mednicken und Trenk liegt. Ihre Messung erfolgte mit **Besselschem Basisapparat** in 2 Absätzen je 2fach. Länge: 935 Toisen = 1.822,35 m; Mittlerer Fehler einer Messung von 1 km Länge:  $\pm 2,2$  mm. Die Basis diente über das gemessene Basisvergrößerungsnetz zur Ableitung der Hauptdreiecksseite Galtgarben - Condehnen.

### Messungen mit dem Besselschen Basisapparat

Der von Bessel 1830 für die ostpreußische Gradmessung konstruierte Basisapparat umfasst 4 Messstangen mit 2 Toisen Länge (1 Toise = 1,949 m). Jede Messstange ist ein Eisenstab, belegt mit einem etwas kürzeren Zinkstreifen, der an einem Ende auf den Stab geschraubt und gelötet ist. Die Enden der Stäbe haben Stahlschneiden. Zur Messung der Neigung der Stangenlagen dienen Röhrenlibellen mit Neigungsschrauben. Die Messstangen sind mittels Rollen auf einer starken Tragstange in Schutzkästen aus Holz gelagert. Aus den Kästen ragen nur die Schneidenenden und die Libellenschraube hervor. Bei den Basismessungen werden die Stangen nicht auf Stoß angelegt, sondern auf einen kleinen Zwischenraum. Dieser wird mit einem aus Glas geschliffenen, etwa 10 cm langen Messkeil gemessen. Zur Erfassung von Änderungen der Messstangenlänge durch Temperaturänderungen werden mit einem Messkeil die Abstände zwischen einer Schneide des freien Zinkstreifenendes und einer Schneide am Eisenstab (Metallthermometer) gemessen und entsprechend berücksichtigt.

**Vorarbeiten** für die Messung sind die Erkundung der Basislinie, eine Vormessung zur Festlegung der Punkte für die Basisböcke und die Errichtung von sogen. Alignierungsgalgen zur Einweisung der Messstangen. Für die **Durchführung der Basismessung** wurden etwa 15 geschulte Beobachter und 50 Gehilfen benötigt. Die Messung für eine Lage von 4 Stangen (15,6 m) betrug etwa 4 Minuten. Dabei waren folgende Ablesungen zu machen: Keilablesungen für die Stangenintervalle, Ablesungen der Libellen und Keilablesungen der

Metallthermometer. Für jede Stange war ein genauer Maßvergleich erforderlich, ferner eine Gleichung mit der Beziehung zwischen Maßwert und Metallthermometerangaben abzuleiten. Mit diesen Gleichungen waren die einzelnen Stangenlängen für jede Lage zu berechnen, nach den Libellenablesungen auf die Horizontale zu reduzieren, aufzusummieren und die Keilablesungen für die Stangenintervalle hinzuzufügen. Die so erhaltene Basislänge wurde dann noch auf die Normalnullfläche (Meeresspiegel) projiziert.

*Basismessungen, ausgeführt mit dem Besselschen Basisapparat*

Zeit	Basis	Basislänge	mittlerer Fehler für 1 km
1834	Königsberg	1,822 km ( 935 Toisen)	±2,2 mm
1838	Kopenhagen (Dänemark)		
1840	Upsala (Schweden)		
1846	Berlin	2,337 km (1199 Toisen)	±1,6 mm
1847	Bonn	2,134 km (1095 Toisen)	±1,8 mm
1851	Lommel (Belgien)		
1853	Ostende (Belgien)		
1854	Strehlen bei Breslau	2,763 km (1417 Toisen)	±2,3 mm

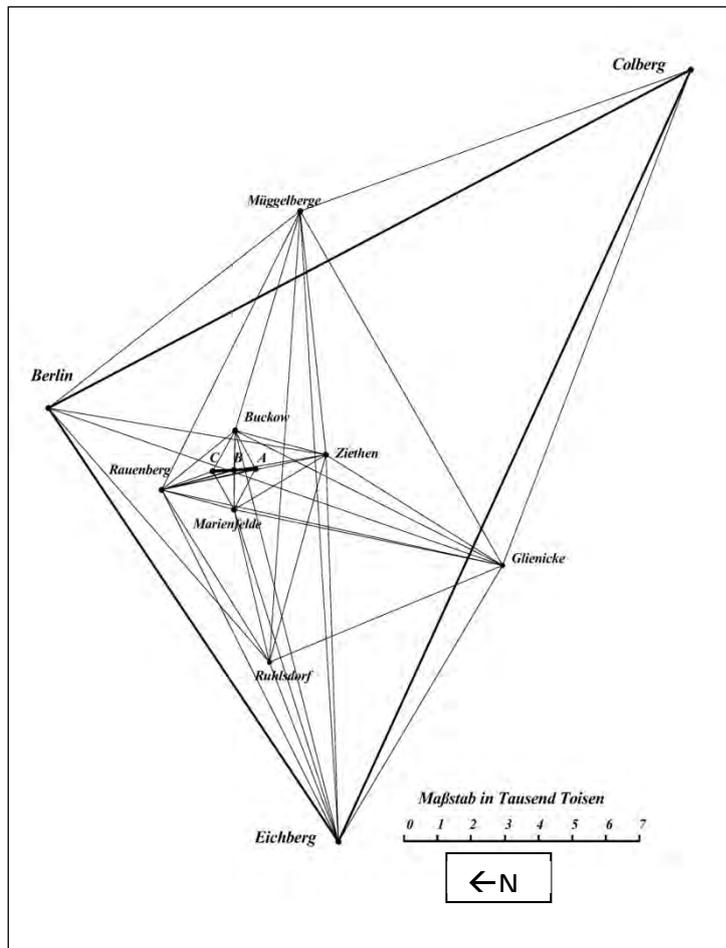
Die Messungen wurden in Preußen unter Leitung von J. J. Baeyer ausgeführt. Ferner wurde das Gerät ins Ausland verliehen.

**Basismessung und Basisvergrößerungsnetz Berlin 1846**

Die Auswahl der Örtlichkeit für die Basis fiel auf die Chaussee von Berlin nach Zossen zwischen Mariendorf und Lichtenrade. Die Basis von 1199 Toisen (2,337 km) wurde mit dem Basisapparat von Bessel in 4 Absätzen je 2fach gemessen, wobei der mittlere Fehler einer Messung von 1 km Länge  $\pm 1,6$  mm ergab. Im Bild auf der nächsten Seite ist das Basisvergrößerungsnetz Berlin 1846 dargestellt. Wie ersichtlich, war zuerst die Seite Buckow - Marienfelde, dann die Seite Rauenberg - Ziethen usw. bis hin zum Hauptdreieck Berlin - Colberg - Eichberg abzuleiten. Was die Winkelmessungen angeht, so wurde der mittlere Fehler eines Winkels zu  $\pm 0,780''$  (mit 47 Bedingungs-Gln.) bzw.  $\pm 0,730''$  (mit 86 Bedingungs-Gln.), ferner zu  $\pm 0,339''$  (weiteres Resultat) erhalten.

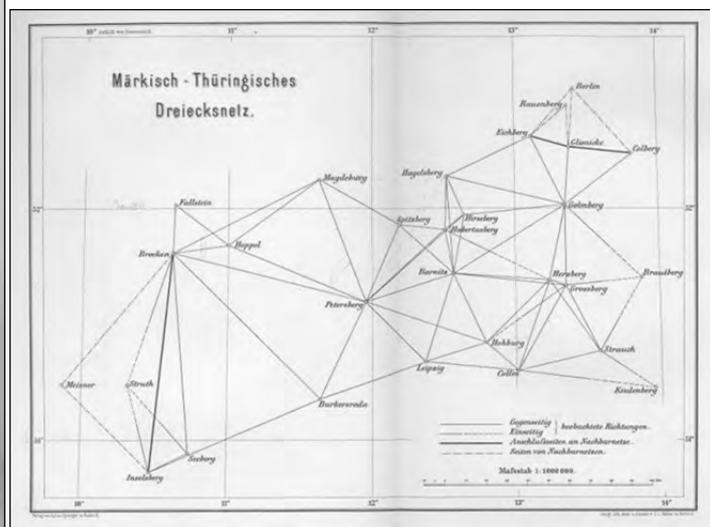
**Basismessungen 1879, 1880, 1892 und 1908**

Die Mitarbeiter des Institutes führten nur wenige Messungen mit Basisapparat der Gebrüder Brunner, Paris aus. Das Material der 4-m-Stangen war zum Einen in Platin-Iridium ausgeführt, zum anderen in Messing. 1879 erfolgte die Nachmessung der Grundlinie bei Strehlen, 1880 die Grundlinie bei Berlin (als Parallelmessung). Diese Doppelmessung ergab einen wahrscheinlichen Fehler der Länge von  $\pm 0,7$  bis  $\pm 0,8$  mm. Die Bonner Basismessung wurde 1892 mit Brunnerschem und Besselschem Apparat ausgeführt, ebenso die Berliner Basismessung 1908. Bei den Messungen mit dem einstängigen Brunnerschen Basisapparat werden Mikroskope verwendet, während es mit dem vierstängigen Besselschen Apparat Messkeile sind. Beim Brunnerschen Apparat wird die Verbindung der Platin- mit der Messingstange und beim Besselschen Apparat die Verbindung der Eisen- mit der Zinkstange als Metallthermometer benutzt. Die durchgeführten Vergleichsmessungen mit beiden Apparaten ergaben, dass die Metallthermometer bei größeren Temperaturänderungen nicht einwandfrei funktionierten. Nach den Untersuchungen haben sich Basismessungen mit Invardrähten durchgesetzt.

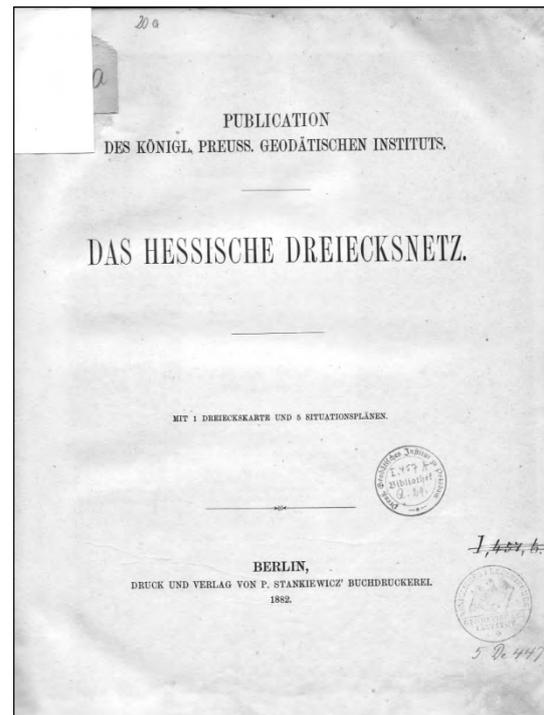
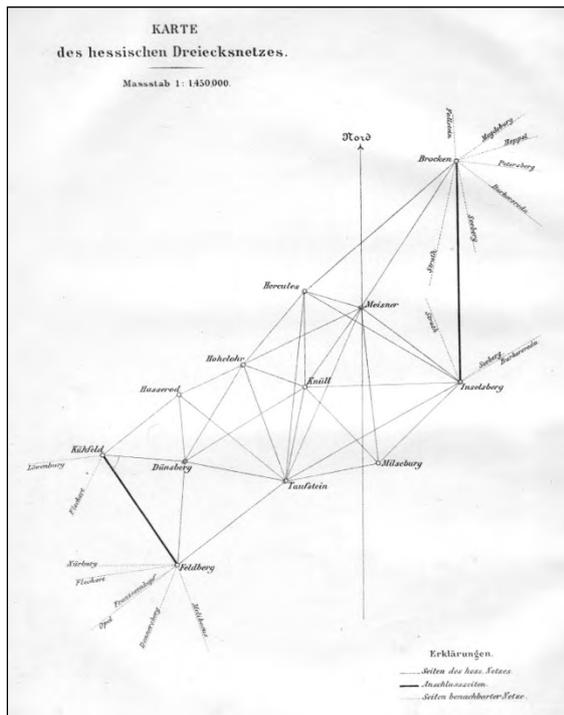


### Triangulationen

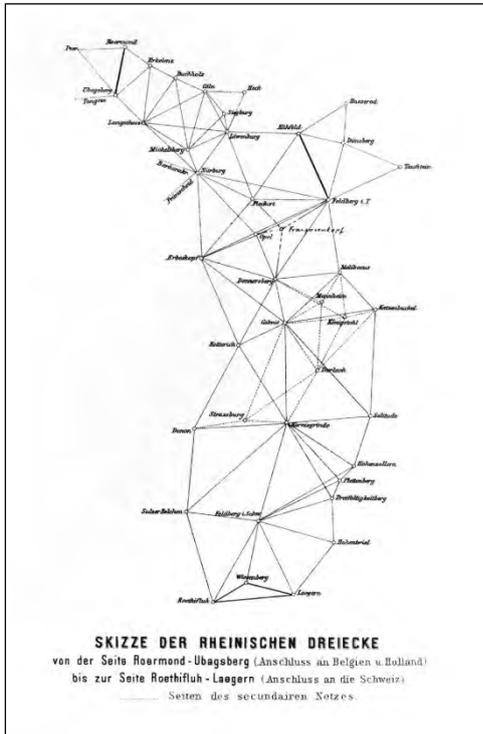
1867 war der Beginn der *Triangulationsarbeiten* mit 2 gleichen 10zölligen Universal-Instrumenten von Pistor & Martins, Berlin. Die Abbildung zeigt ein Universal-Instrument, wie es zu den Winkelmessungen zum Einsatz kam. Drei Triangulationen wurden durch Institutsmitarbeiter ausgeführt.



Das *Märkisch-Thüringisches Dreiecksnetz* (Abbildung) reichte von der Küstenvermessung bei Berlin ausgehend bis an die Dreiecksseiten von Sachsen und an die Seite Inselsberg-Brocken der Gaußschen Gradmessung. Die Resultate sind veröffentlicht in: *Das Märkisch-Thüringische Dreiecksnetz. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. Berlin 1889. 144 p. 1 Kt.* Das *Hessische Dreiecksnetz* umschloss Brocken, Inselsberg, Meissner, Herkules bei Kassel, Taufstein im Vogelsgebirge, Knüll, Milseburg, Haselohr, Hasserod, Dünsberg, Kühfeld bis zum Feldberg im Taunus. In der Abbildung ist das Triangulationsnetz dargestellt. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Titelseite der Veröffentlichung von Sadebeck, M. *Das Hessische Dreiecksnetz. Publ. Kgl. Preuß. G. I. Berlin 1882. VI.*



Das *Rheinische Dreiecksnetz* reichte von der belgisch-holländischen Grenze Rhein aufwärts bis an das Dreieck Wiesenberg-Röthfluh-Lägern der Schweizer Vermessung. Die Abbildung veranschaulicht das Rheinische Dreiecksnetz. Die Resultate der Triangulation sind publiziert in *Das Rheinische Dreiecksnetz. Heft I-III. Berlin 1876/82.* Dabei zeigt *Band I (1876) von, Bremiker, C.: Die Bonner Basis. 75 p.* die Messung der Basis und Bestimmung des Azimuts, die Winkelmessungen im Basisvergrößerungsnetz, die Ausgleichung der Dreiecke, die Berechnung der Richtungen und Entfernungen und die Zusammenstellung der Resultate bis zur Hauptdreiecksseite Siegburg – Michelsberg. *Band II (1878) von Fischer, A.: Die Richtungsbeobachtungen. 164 p.* bildet die Winkelmessungen auf 35 + 4 Stationen zwischen 1869 und 1877 ab. *Band III (1882) von Fischer, A.: Die Netzausgleichung. 207 p.* stellt die Netzausgleichung, die Anschlüsse an die Nachbartriangulationen (Belgische Dreiecke, Schweizerisches Dreiecksnetz und ältere süddeutsche Triangulationen), die Geographischen Koordinaten, den Vergleich der astronomischen mit den geodätischen Resultaten, die Azimut- und Polhöhenbestimmung auf dem Großen Feldberg im Taunus und dem Opel dar. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die durch das Geodätische Institut Potsdam beobachteten und bearbeiteten Dreiecksnetze. Triangulationsarbeiten wurden nur bis 1886 durchgeführt.



Beob.- Zeitraum	Netz	Anzahl Punkte	Anzahl Gegensichten	Winkelgl.	Seitengl.	Winkelfehler (nach Ferrero)
1867-1877	Rheinisches Haupt-	32	77	46	16	± 0,73"
	+ Nebennetz	36	93	58	24	
1867-1876	Hessisches Netz	12	64	21	11	± 0,84"
1867-1876	Märkisch-Thüring. N.	25	55	33	16	± 0,61"

### Geodätisch-astronomische Bestimmungen für die Europäische Gradmessung

Neben den Längenmessungen mit Besselschem und Brunnerschem Apparat sowie den Triangulationen gehörten zu den Vermessungsarbeiten Positionsbestimmungen von Orten sowie Streckenmessungen mit Telegraphie. Den Bedarf für die Messungen erläutert Baeyer, in seiner Schrift: *Astronomische Bestimmungen für die Europäische Gradmessung* aus den Jahren 1857-1866 (Leipzig, Verlag von Wilhelm Engelmann, 1873. 125 p.). Die Publikation *Albrecht, Th. - Formeln und Hülftafeln für geographische Ortsbestimmungen*, deren Titelseite in der Abbildung auf der Vorseite wiedergegeben ist, enthält eine ausführliche Beschreibung der geodätisch-astronomischen Beobachtungsverfahren zu Zeit- bzw. Längenbestimmungen, Pol- und Azimutbestimmungen. Deswegen und wegen der Zusammenstellung der zum Gebrauch benötigten Formeln sowie Tafeln war sie sehr hilfreich für die astronomisch-geodätischen Arbeiten und erschien bereits im Jahre 1894 in 3. Auflage.

Die **Polhöhenbestimmungen** erfolgten durch die Messung der Zenitdistanzen von Nord- und Südsterne und durch Durchgangsbeobachtungen durch den Ost-West-Vertikal.

**Azimuthbestimmungen** wurden mit direkter Winkelmessung zwischen einem polnahen Stern und der Richtung nach einem irdischen Objekt mit Universalinstrument bzw. mit Messungen nach einer oder mehreren im Vertikal der Polsterne gelegenen Marken mit Passageinstrument ausgeführt. Die **Bestimmung der Polhöhe und des Azimuts** erfolgte an 16 Stationen I. Ordnung: Seeberg, Inselsberg, Mannheim, Durlach (Richtung Mannheim), Rugard (Rügen), Hercules bei Kassel, Feldberg im Schwarzwald, Neinstedt, Gollenberg, Thurmberg, Goldaper Berg, Springberg, Moschin, Schönsee, Jauernik, Swinemünde, Kapellenberg. Die **Bestimmung der Polhöhe** erfolgte an 34 Stationen: Mühlhausen, Tettenborn, Hohegeis, Ilsenburg, Asse, Löwenburg, Kuhberg, Bornstedter Warte, Gegenstein und Regenstein, Schildberg, Osterode, Hils, Langelsheim, Mansfeld, Morraburg, Dollmar, Heldburg, Harzburg, Dienkopf, Craula, Pfarrsberg, Eckartsberga, Sachsenburg, Kyffhäuser und Lohberg, Neinstedt (ebenso Azimut), Victorshöhe und Josephshöhe, Helgoland, Blankenburg, Hüttenrode, Hasselfelde, Nordhausen. Für die Polhöhen- und Azimuthbestimmungen hatte Th. Albrecht die nachstehenden Instruktionen erarbeitet: *Albrecht, Th. Instruktion für die Polhöhen- und Azimuthbestimmungen. In: Astron.-Geodätische Arbeiten im Jahre 1875 + Astron.-Geodätische Arbeiten in den Jahren 1881 und 1882. Berlin 1876 bzw. 1883*

Die **Bestimmung der Länge des Sekundenpendels** fand an 10 Stationen statt: Bonn, Leiden, Mannheim, Gotha, Seeberg, Inselsberg, Berlin, Königsberg, Güldenstein, sowie an den sächsischen Pendelstationen Leipzig, Dresden, Freiberg.

**Längenbestimmungen** auf telegraphischem Wege erfolgten für 28 Strecken zwischen den Stationen:

- **Berlin** nach Lund, Wien, Rugard (Rügen), Strassburg, Paris, Bonn, Altona, Warschau, Swinemünde, Göttingen
- **Bonn** nach Leiden, Mannheim, Strassburg, Paris, Altona, Wilhelmshaven
- **Göttingen** nach Altona, Leipzig, Brocken
- **Altona** nach Helgoland, Wilhelmshaven
- **Leipzig** nach Mannheim, Brocken
- **Mannheim** nach Strassburg
- **Königsberg** nach Swinemünde, Warschau
- **Swinemünde** nach Kiel
- **Dangast** nach Leiden

Ebenso wie für Polhöhen- und Azimuthbestimmungen verfaßte Th. Albrecht für astronomisch-geodätische Längenbestimmungen eine Instruktion: *Albrecht, Th. Instruktion für die Längenbestimmungen. In: Astron.-Geodätische Arbeiten im Jahre 1876. Berlin 1877.* Ferner gab es einen Sternkatalog für Azimuthbestimmungen: *Albrecht, Th. Rectascensionen, Declinationen und Eigenbewegungen von 39 Polsternen. General-Bericht für 1873. Berlin 1874.*

Bestimmungen	Ordnung	Anzahl	Mittl. Fehler
Längenbestimmungen (telegraphisch)		28	$\pm 0,034$ s
Polhöhenbestimmungen	I.	16 (nach beiden Methoden)	$\pm 0,40''$ , $\pm 0,26''$
	II.	47 (nach einer Methode)	$\pm 0,5''$
	III.	3 (informativ)	
Azimutbestimmungen	I.	11 (nach beiden Methoden)	$\pm 0,79''$ , $\pm 0,56''$
	II.	16 (nach einer Methode)	$\pm 0,8''$

#### *Astronomisch-geodätische Arbeiten von 1863 bis 1885 im Königreiche Sachsen*

Nachdem am 25. Juli 1881 Prof. Dr. C. Bruhns, Direktor der Leipziger Sternwarte, verstorben war, wurde die Auswertung der sächsischen Messungen durch Prof. Dr. Th. Albrecht übernommen. Ferner hat er Polhöhen- und Azimutbestimmungen auf den Stationen Jauernick und Kapellenberg in 1882 bzw. 1884 ausgeführt. Die Resultate sind publiziert in *Bruhns, C., Albrecht, Th. Astronomisch-geodätische Arbeiten für die Europäische Gradmessung im Königreiche Sachsen. Berlin 1885. 400 p.*

Hierbei handelt es sich um:

- 16 Längenbestimmungen, nämlich zwischen Leipzig und Freiberg, Dresden, Großenhain, Dabnitz, Berlin, Breslau, Bonn, Gotha, Wien (Laaerberg), Leiden, Dangast, Mannheim, München, Brocken, Göttingen und Wien (Türkenschanze) und
- 14 Polhöhen- und Azimutbestimmungen, so auf Basiszwischenpunkt Großenhain, in Freiberg (Galgenberg), Dresden (Math. Salon), Kahleberg, Fichtelberg, Leipzig (Pleissenburg), Wachauer Denkstein, Grenzhübel, Wachberg, Markstein, Schwarzeberg, Lausche, Jauernick, Kapellenberg, auf der Pleissenburg und anderen 5 Punkten.
- 3 Bestimmungen der Länge des Sekundenpendels, nämlich Leipzig, Dresden, Freiberg.

#### **Weitere astronomisch-geodätische Arbeiten von 1923 bis 1937**

Ferner hat Mühlig in den Jahren 1923 bis 1937 astronomisch-geodätische Arbeiten I. Ordnung ausgeführt und veröffentlicht in Veröff. Preuß. G. I. N. F. Nr. 109, Potsdam 1938. Diese Arbeiten betreffen 34 Feldstationen mit 34 Längen-, 33 Breiten- und 25 Azimutbestimmungen. An die Ergebnisse wurden Korrekturen wegen Polschwankung angebracht, die mit den Polkoordinaten des Internationalen Breitendienstes nach den unten angegebenen Formeln berechnet wurden. Ihre Beträge erreichen nur 0,001 s für einige Längen, sie liegen zwischen + 0,10'' und - 0,16'' für die Breiten und zwischen - 0,01'' und - 0,33'' für die Azimute.

#### **Reduktion wegen Polschwankung**

Seitdem die Polschwankungen als Breitenänderungen bemerkt wurden, ist die Polbahn allein aus den Ergebnissen von Breitenbestimmungen abgeleitet worden. Demzufolge genügt es den mittleren Pol über die Definition mittlerer Breiten zu ermitteln.

Dadurch, dass die Richtung der momentanen instantanen Rotationsachse als Polschwankung erfasst wird und schließlich koordinatenmäßig festliegt, ist es möglich, die Ergebnisse von astronomisch-geodätischen Ortsbestimmungen mit interpolierten Gebrauchswerten auf eine mittlere Lage der Rotationsachse, die durch das gewählte Bezugssystem realisiert wird, zu reduzieren. Im Koordinatensystem zeigen die positive x-Achse in Richtung des Meridians von Greenwich und die positive y-Achse in Richtung des Meridians +90° West. Der momentane instantane Pol ist gegenüber dem gewählten mittleren Bezugspol zur Epoche T durch die Koordinaten  $(x_T, y_T)$  gegeben.

Infolge des Einflusses der Polschwankungen weichen die Ergebnisse astronomisch-geodätischer Breiten-, Zeit- und Azimutbestimmungen einer Station von ihren mittleren Werten mit dem Index o wie folgt ab:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_T - \phi_0 = x_T \cos \lambda_0 + y_T \sin \lambda_0, \\ \Delta\lambda &= \lambda_T - \lambda_0 = (x_T \sin \lambda_0 - y_T \cos \lambda_0) \tan \phi_0, \\ \Delta a &= a_T - a_0 = -(x_T \sin \lambda_0 - y_T \cos \lambda_0) \sec \phi_0\end{aligned}$$

Hierbei tritt die Abweichung für Ortszeiten durch eine Änderung der Länge des Meridians vom Beobachtungsort auf. Die obenstehenden Beziehungen gelten nur in der Annahme, dass Beobachtungsfehler und Fehlereinflüsse der Umwelt, Sternkoordinatenfehler sowie die Stationsänderungen nichtpolaren Ursprungs unwirksam sind.

## Thema 3: Zeit- und Breitenbestimmung

### Zeitmaße, Zeiteinheit und Zeitskalen

#### *Sternzeit*

Die Sternzeit  $\theta$  ist ein eindeutiges Maß für die Stellung des Sternenhimmels zum Meridian des Ortes. Sie zählt von der oberen Kulmination des Frühlingspunktes (oder Widderpunktes) von 0 bis 24 Uhr. Der Frühlingspunkt ist als der Schnittpunkt der aufsteigenden scheinbaren Sonnenbahn mit dem Äquator definiert.

#### *Sternkoordinaten*

Analog zu den Angaben eines Ortes auf der Erde, die im äquatorialen System mit den geographischen Koordinaten durch seine Länge  $\lambda$  und seine Breite  $\phi$  bestimmt sind, wird am Himmel die Position eines Sterns durch dessen Rektaszension  $\alpha$  und dessen Deklination  $\delta$  beschrieben. Die Rektaszensionen  $\alpha$  der Sterne werden vom Frühlingspunkt (vom Nordpol gesehen) im Gegenuhrzeigersinn von 0 bis 24 Uhr gezählt. Sie sind von der täglichen Erddrehung unabhängig.

Bei der Sternbeobachtung spielt der Winkel zwischen dem Stundenkreis des Sterns und dem Ortsmeridian eine Rolle, also der Stundenwinkel  $t$  des Sterns. Dieser wird im Sinne der täglichen Drehung des Sternenhimmels von 0 bis 24 Uhr gezählt. Es besteht die Beziehung zwischen der Sternzeit  $\theta$ , der Rektaszension  $\alpha$  und dem Stundenwinkel  $t$  des Sterns durch

$$\theta = \alpha + t .$$

Im Falle, daß der Stundenwinkel  $t = 0$  ist, also  $\theta = \alpha$ , befindet sich der Stern im Meridian in oberer Kulmination.

#### *Sonnenzeit*

Im bürgerlichen Leben benutzen wir den Stundenwinkel der Sonne als Zeitmaß, allerdings um 12 Stunden vermehrt, da wir den Tag von Mitternacht an zählen.

Die wahre Sonne bewegt sich ungleichförmig. Sie liefert die **wahre Sonnenzeit** (Anzeige an einer Sonnenuhr). Um einen gleichförmigen Zeitablauf zu haben, wird eine mittlere Sonne fingiert, die sich mit konstanter Geschwindigkeit im Äquator bewegt. Sie liefert die **mittlere Sonnenzeit**.

#### *Zeitgleichung*

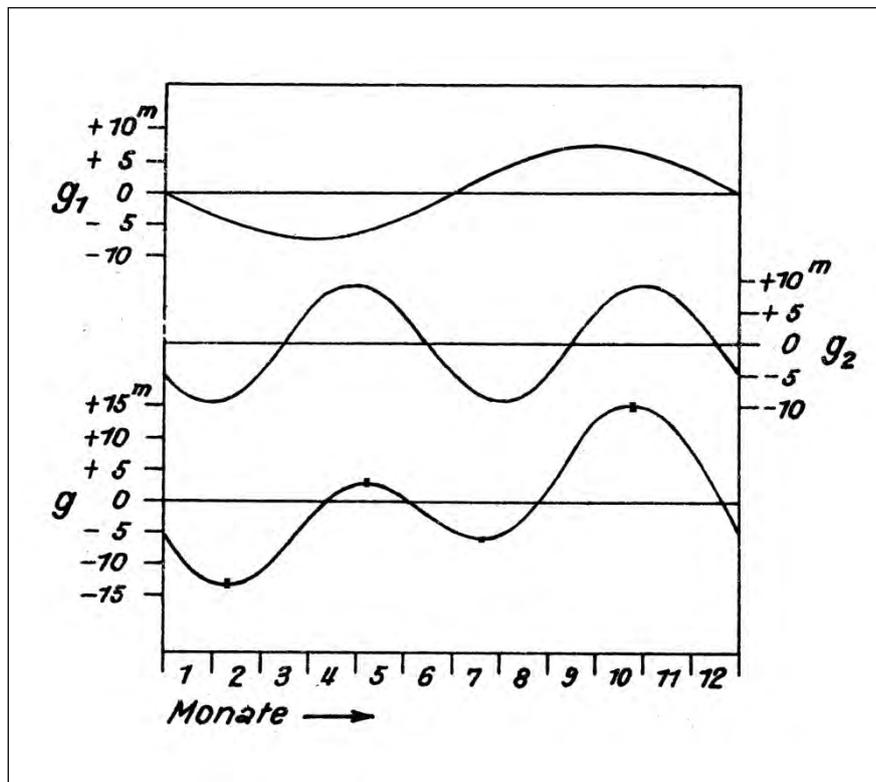
Die Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit bezeichnet man als Zeitgleichung  $g$ . Diese umfaßt 2 Anteile, nämlich

- $g_1$  - aus der Sonnenbewegung in der Ekliptik (Ebene der Erdbahn, die sich als scheinbare Sonnenbahn am Himmel abzeichnet) und
- $g_2$  - aus der Projektion dieser Bewegung auf die gegen die Ekliptik geneigte Äquatorebene.

Wie aus der Darstellung ersichtlich, zeigt der Verlauf der Zeitgleichung  $g$

- ein Hauptminimum von  $-14$  Minuten im Februar,
- ein Nebenmaximum von  $+4$  Minuten im Mai,
- ein Nebenminimum von  $-6$  Minuten im Juli und
- ein Hauptmaximum von  $+16$  Minuten Ende Oktober.

Viermal im Jahr - am 15. April, am 14. Juni, am 1. September und 24. Dezember - ist der Betrag Null. Das heißt, daß die mittlere Sonnenzeit dann mit der wahren Sonnenzeit übereinstimmt.



#### Beziehung zwischen Sternzeit und mittlerer Sonnenzeit

Die Jahreslänge ist definiert durch den Zeitabschnitt zwischen 2 aufeinander folgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den Frühlingspunkt. Sie wird als tropisches Jahr bezeichnet. Da die mittlere Sonne im Laufe eines Jahres volle 24 Stunden, also 1 Tag an Rektaszension zunimmt, hat das Jahr einen Sterntag mehr als Sonnentage. Sonach hat das tropische Jahr 365, 2422 mittlere Sonnentage oder 366,2422 Sterntage. Das heißt, daß die Sternzeit gegenüber der mittleren Sonnenzeit täglich um 3 Minuten 56,555 Sekunden vorgeht.

#### Ortszeit, Einheitszeit und Zonenzeit

In früheren Zeiten benutzte jede größere Stadt ihre eigene Ortszeit. Um deswegen Schwierigkeiten zu vermeiden, wurden zuerst im Eisenbahnverkehr Einheitszeiten eingeführt. Die Zeit diesen unhaltbaren Zustand zu beenden, war Ende des 19. Jahrhundert gekommen. Im Oktober 1884 wurde auf der internationalen Meridiankonferenz in Washington der Meridian von Greenwich bei London (Royal Greenwich Observatory) zum Nullmeridian und die dafür geltende Zeit zur Universalzeit (Weltzeit) erklärt. In der Nautik vollzog sich die Einführung am raschesten. Die Mitteleuropäische Zeit, die sich auf den 15. Längengrad östlich von Greenwich bezieht, wurde am 1. Juli 1891 intern für den Eisenbahndienst in Norddeutschland und am 1. April 1893 allgemein im Deutschen Reich als gesetzliche Zeit eingeführt. Nach einem Vorschlag von S. Fleming, Chefingenieur der kanadischen Pazifikeisenbahn, wird seit dem Jahre 1911 die Erde in 24 Zeitzonen zu je  $15^\circ$  eingeteilt.

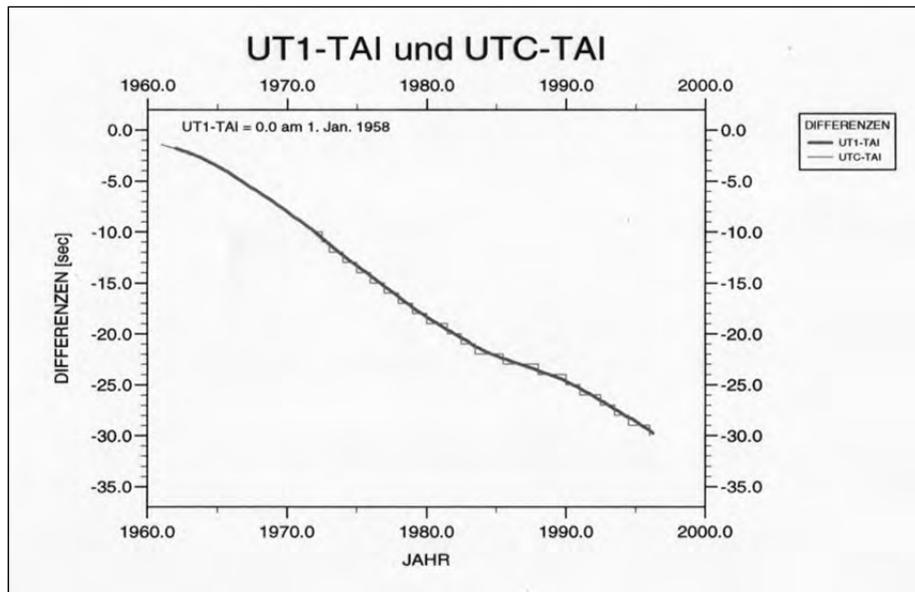
Sehr lange bevor der Meridian von Greenwich als Nullmeridian eingeführt wurde, gabe es Bestrebungen für die Erde, eine einheitliche Bezeichnung der geographischen Längen einzuführen und in Kartenwerken zu benutzen. Claudius Ptoleäus (ca. 100-180, griech. Mathematiker, Astronom und Geograph) war es, der bereits um 150 den Westzipfel der Kanarischen Insel Ferro (heute: El Hierro) als Nullmeridian benutzte. Durch europäische Seefahrer bereits lange verwendet, wurde im Jahre 1634 der Ferro-Meridian durch einen französischen Kongreß zum Nullmeridian erklärt. Diese Festlegung fand eine große Verbreitung, auch in Deutschland, wo man in amtlichen deutschen Kartenwerken den Ferro-Meridian als Nullmeridian bis zum Jahre 1884 verwendete.

### Definition der Sekunde

Nach der Unterteilung der Stunde in Sekunden definierte man um 1500 die Sekunde als 86400. Teil des mittleren Sonnentages. Das geschah in der Annahme, daß der mittlere Sonnentag ein konstantes Zeitmaß wäre. Nachdem man 1935 Unregelmäßigkeiten in der Erdrotation gefunden hatte, stimmte man für eine Revision der Sekundendefinition. Wie die Zusammenstellung Zeiteinheit und Zeitskalen zeigt, wurde 1956 die Ephemeridensekunde festgelegt.

Zeiteinheit und Zeitskalen	
Definition der Sekunde:	
A)	Sekunde = 86400. Teil des mittleren Sonnentages (um 1500)
B)	Ab 1956: Ephemeridensekunde = 31 556 925,9747. Teil des tropischen Jahres bezogen auf 0. Januar 1900, 12 Uhr Ephemeridenzeit (tropisches Jahr = 365,242198781730 mittlere Sonnentage)
C)	Ab 1968: Atomsekunde = Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes des Zäsiumatoms 133 entspricht.
Zeitskalen:	
TAI	Atomzeitskala des BIPM mit Zeitintervallen von 1 SI-Sekunde bei Meeresniveau; $UT1-TAI \approx 0$ am 1. Januar 1958
UT1	Universalzeit, d. h. die wegen Polbewegung korrigierte beobachtete Zeit UT0; mittlere Sonnenzeit, gezählt ab Mitternacht  Sie wird für Präzisions-Orts- und Zeitbestimmungen benötigt.
UTC	Koordinierte Zeit; sie differiert zur TAI um ganze Sekunden in der Weise, daß $ UT1-UTC $ kleiner als 0,9 s bleibt.  Ab 1972 werden zur Anpassung Schaltsekunden eingeführt, und zwar Ende Dezember und/oder Ende Juni.  Sie ist die im bürgerlichen Leben benutzte Zeit.
Zeitdifferenzen:	
	UT1-TAI
	UTC-TAI
	UT1-UTC

Da diese den Vorstellungen der Physiker in keiner Weise entsprach, wurde 1968 die physikalische Zeitdefinition in Übereinstimmung mit der bisherigen beschlossen. Um die Zeitdifferenzen der verschiedenen Zeitskalen TAI, UT1 und UTC zu veranschaulichen, sind sie in einer Graphik dargestellt.



### Zeitdienst am Geodätischen Institut Potsdam

Von 1892 bis 1991 wurden am Geodätischen Institut Potsdam (ab 1969 Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam) geodätisch-astronomische Zeitbestimmungen durchgeführt und ein Technischer Zeitdienst betrieben.

<b>Zeit- und Breitendienst 1889 bis 1991</b>	
<b>Zeitdienst</b>	
<b>Sept. 1892 bis 1991</b>	<b>Arbeit des Zeitdienstes</b>
1892 – 1933	4–6 Pendeluhren 10 – 40 ms / d mittl. Gangänderung
1933	Inbetriebnahme der ersten beiden Quarzuhren
1934 – 1963	2–5 Quarzuhren 0,1 – 0,3 ms / d mittl. Gangänderung
1964 – 1991	Quarzuhranlage von Rohde & Schwarz 0,01 ms / d
1972 – 1991	Normalzeitanlage mit Atomuhr rel. Unsicherheit $< 5 \times 10^{-13}$ (Siehe nachfolgende Abbildung)
<b>Breitendienst</b>	
<b>1889 bis 1923</b>	<b>permanente Breitenbeobachtungen</b>
<b>Okt. 1957 bis 1991</b>	

Hierbei wurden zur Zeitbewahrung 4 bis 6 Präzisionspendeluhren mit mittleren Gangänderungen von 10 bis 40 Millisekunden pro Tag benutzt. Ab 1933 wurden die ersten beiden Quarzuhren im Technischen Zeitdienst eingesetzt. Diese hatten mittlere Gangänderungen von 0,1 bis 0,3 Millisekunden pro Tag. Bereits 1912 wurden Zeitsignale der Küstenstation Norddeich und der Eifelturmstation aufgenommen, um Signalkorrekturen zum Potsdamer Zeitsystem zu ermitteln. Ab 1923 wurden monatlich Korrekturen für fünf empfangene Zeitsignale an vier Institutionen versandt, und im Laufe der Jahre waren immer mehr Zeitsignale zu überwachen und ihre Signalkorrekturen an immer mehr Institutionen zu senden.



Veröffentlichung des Geodätischen Institutes Potsdam

## Zeitsignale Januar 1942 und Normalfrequenz

Potsdam, Geodätisches Institut, östliches Meridianhaus: Länge  $0^{\text{h}} 52^{\text{m}} 16^{\text{s}} 058$  östl. Gr., Breite  $+52^{\circ} 22' 54''$

Korrekturen der wissenschaftlichen Zeitsignale von Nauen (DFY 18130 m, 16,55 kHz; DGZ 20,54 m, 14605 kHz; DFC 23,10 m, 12985 kHz), Rugby (GBR 18740 m, 16,00 kHz), Bordeaux (FYL 19100 m, 15,7 kHz), Monte Grande (LQC 17,0 m, 17550 kHz) und der Normalfrequenz 1000 Hz der Phys.-Techn. Reichsanstalt, werktäglich  $8^{\text{h}} 45^{\text{m}}$  Weltzeit ausgestrahlt über den Deutschlandsender 1571 m 191 kHz.

1942	DFY	DGZ	DFC	GBR	FYL	FYL	LQC	Norm. Frequ.
Jan.	12 <sup>h</sup>	12 <sup>h</sup>	12 <sup>h</sup>	10 <sup>h</sup>	8 <sup>h</sup>	20 <sup>h</sup>	11 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>
1	- <sup>3</sup> 024	—	- <sup>3</sup> 044	+ <sup>3</sup> 025	—	—	—	—
2	- 25	- <sup>3</sup> 042	- 42	+ 19	+ <sup>3</sup> 054	+ <sup>3</sup> 027	- <sup>3</sup> 006	+ 55
3	- 24	- 42	- 45	+ 17	+ 42	—	—	+ 46
4	- 18	- 32	- 34	—	—	+ 31	- 6	—
5	- 19	- 36	- 37	+ 12	+ 32	+ 49	- 15	+ 35
6*	- 16	- 45	- 48	+ 13	+ 54	- 10	+ 2	+ 34
7	- 27	- 44	—	+ 17	+ 42	+ 48	- 2	+ 29
8	- 32	- 47	- 48	+ 18	+ 30	- 98	- 8	+ 25
9	- 34	- 54	- 56	+ 16	+ 34	+ 48	- 58	+ 40
10*	- 41	- 54	- 57	+ 19	+ <sup>2</sup> 38	+ 37	+ 20	+ 28
11	- 26	- 49	- 54	—	+ 52	—	—	—
12*	- 27	- 53	- 54	+ 26	+ 48	+ 40	- 47	+ 47
13*	- 38	- 52	- 56	+ 32	+ 48	—	—	+ 43
14*	- 43	- 57	- 61	+ 30	+ 46	—	0	+ 39
15	- 46	- 61	- 62	+ 30	- 82	+ 58	+ 2	+ 25
16	- 50	- 66	- 67	+ 35	+ 68	+ 40	+ 18	+ 47
17*	- 42	- 58	- 60	+ 31	—	+ 34	—	+ 37
18	- 34	- 50	- 54	—	—	—	—	—
19	- 46	- 60	- 64	+ 18	+ 35	+ 46	+ 73	+ 29
20*	- 52	- 65	- 67	+ 16	+ 44	+ 34	+ 33	+ 10
21	- 49	- 62	- 65	+ 20	+ 32	+ 34	+ 65	+ 19
22*	- 46	- 61	- 65	+ 24	+ 39	+ 34	+ 24	+ 31
23*	- 55	- 72	- 73	+ 16	+ 52	+ 31	—	—
24	- 51	- 69	- 70	+ 20	+ 202	—	—	+ 35
25	- 53	—	—	—	—	—	—	—
26	- 48	- 69	- 71	+ 13	+ 62	—	—	+ 34
27	- 54	—	- 64	+ 3	+ 49	+ 26	—	+ 49
28	- 51	- 69	- 72	- 6	+ 35	+ 27	+ 113	+ 40
29	- 62	- 76	- 79	- 7	+ 31	—	+ 155	+ 16
30	- 48	- 64	- 67	- 4	+ 10	+ 10	+ 202	+ 34
31	- 39	- 55	- 51	- 1	+ 24	+ 24	+ 11	+ 39

\* = Tage mit Zeitbestimmungen. Die Zeitangaben sind Weltzeit. + zu spät, - zu früh.

Die Signalkorrekturen gelten für die Mitte der Aussendung und beruhen auf den Angaben der Quarzuhren des Geodätischen Institutes, deren Stände durch Ausgleichung aller Zeitbestimmungen von Ende November 1941 bis Anfang März 1942 erhalten worden sind. — Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen ist nicht berücksichtigt, die mitgeteilten Zeiten sind daher die Ankunftszeiten der Signale in Potsdam. — Die Rektaszensionen der Sterne sind dem dritten Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuches (FK 3) entnommen. Die Korrekturen der Normalfrequenz sind in Einheiten von  $10^{-9}$  gegeben; + Frequenz zu groß, - zu klein.

Die äußere Genauigkeit in der Aufnahme der Normalfrequenz beträgt etwa  $7 \times 10^{-9}$ .

### Das Potsdamer Zeitsystem auf der Basis von Quarzuhren

Das *Potsdamer Zeitsystem* wurde in der Weise berechnet, dass die in 84 Tagen erhaltenen Zeitbestimmungen einer *stark übergreifenden parabolische Ausgleichung* unterworfen wurden. Die Ergebnisse für die Mitte der Periode waren der ausgeglichene Uhrstand, der Gang der Quarzuhr und eine eventuelle Gangänderung.

Vor der Ausgleichung wurden an die ursprünglichen, aus den geodätisch-astronomischen Zeitbestimmungen in TU0 erhaltenen Uhrkorrekturen, die zunächst alle auf die Hauptuhr Q3 bezogen wurden, noch Reduktionen wegen Polschwankung (= TU1) und jährlicher Rotationsschwankungen (= TU2) angebracht. Die Ausgleichung erfolgte in äquidistanten Schritten, die in Intervallen von sieben Tagen fortschreiten, so daß die oben angegebenen Werte für jeden 7. Tag erhalten wurden.

Da die direkte Verwendung der Zeitbestimmungen keine äquidistante Ausgleichung ermöglichen würde, wurden die Mittel von jeweils zwanzig Zeitbestimmungen zu ihren mittleren Zeitpunkten graphisch aufgetragen. Aus dem so entstandenen Kurvenzug wurden die Uhrstände für die äquidistante Ausgleichung der Hauptuhr durch lineare Interpolation entnommen. Die Uhrstände für die Ausgleichung der übrigen Uhren wurden aus diesen Werten durch die Verwendung von Sieben-Tage-Mitteln der Uhrstandsvergleiche berechnet. Zur Kontrolle der Quarzuhren wurden ihre Standdifferenzen mehrmals am Tage mit Hilfe eines elektronischen Zählers verglichen. Gelegentlich auftretende Standsprünge konnten so festgestellt und definiert werden. Aus der laufenden Änderung der Standdifferenzen könnte auch die Gangdifferenz zwischen zwei Quarzuhren berechnet werden. Wegen seiner geringen Genauigkeit wurde dieses Verfahren aber nicht verwendet. Die Kontrolle der Gänge der Quarzuhren erfolgte vielmehr durch Vergleich ihrer Frequenzen am Kathodenstrahloszillographen. Dabei wurde eine Genauigkeit von ca.  $\pm 1 \times 10^{-9}$  erreicht, so daß relative Gangänderungen zweier Quarzuhren von ca. 0,1 ms/Tag festgestellt werden können. Außerdem wurde der Gangunterschied zwischen der Hauptuhr des Zeitdienstes und der die *Zeitzeichen steuernden Uhr*, die auch die Normalfrequenz lieferte, ständig mit Hilfe eines Schwebungszählers kontrolliert. Ferner wurden durch Empfang der über Rundfunk ausgestrahlten Normalfrequenzen des Deutschen Amtes für Maß und Gewicht und des englischen Senders MSF mit denen der eigenen Uhren nach der Schwebungsmethode am Oszillographen miteinander verglichen. Die Abbildung zeigt den Hauptmessraum des Technischen Zeitdienstes.



Die Zeit, die durch das Zeitzeichen bekanntgegeben wurde, war eine *extrapolierte Zeit*, da die *semi-definitive Zeit* im Moment der Ausstrahlung noch nicht zur Verfügung stand. Nach ihrer Ermittlung wurden Signalkorrekturen berechnet, die den Moment der Ausstrahlung in semi-definitiver Zeit angegeben haben. Zur Kontrolle der Zeitzeichensendungen anderer Zeitdienstinstitute wurden täglich 17 verschiedene Zeitzeichen empfangen. Die Ausstrahlungsmomente dieser Zeitzeichen wurden auf das *semi-definitive Potsdamer System* bezogen und mit den Angaben über das eigene Zeitzeichen monatlich durch Zirkulare den Interessenten und dem *Bureau International de l'Heure (BIH)* in Paris zugestellt. Vom BIH wurden aus den Angaben der verschiedenen Zeitdienstinstitute die Ausstrahlungsmomente der Zeitsignale im *definitiven Zeitsystem* berechnet und im *Bulletin horaire* veröffentlicht. Zugleich lieferten die Berechnungen am BIH die Abweichungen der semi-definitiven Zeiten der einzelnen Zeitdienste von der definitiven Zeit und gaben damit eine Aussage über die Güte der betreffenden Zeitdienste. In den BIH-Jahresberichten war die absolute Differenz zwischen dem Potsdamer Zeitsystem und dem definitiven Zeitsystem des BIH stets  $< 20$  ms, und der jährliche durchschnittliche Fehler des Potsdamer Zeitsystems betrug  $\pm 7$  ms. Sonach gehörte der *Potsdamer Zeitdienst* zu den besten Zeitdiensten der Welt.

## **Zeitbestimmung**

### *Passageinstrument zur geodätisch-astronomischen Zeitbestimmung*

Das Passageinstrument ist ein Spezialinstrument zur Beobachtung von Sterndurchgängen durch den Meridian. Die Aufstellung des Gerätes erfolgt im Meridian. Das heißt, dass das Fernrohr den Meridian der Station beschreibt. Bei permanentem Einsatz wird das Instrument so genau aufgestellt, dass das Achsazimut  $k$  kleiner als  $\pm 1$  s bleibt.

Ein Registriermikrometer ermöglicht es, einen beweglichen Faden dem Stern nachzuführen, wobei die Durchgangszeiten mit einem Chronographen registriert werden. Die Besonderheiten des Gerätes sind ein gebrochenes Fernrohr, eine Umlegevorrichtung für das gebrochene Fernrohr, eine Hängelibelle und ein Registriermikrometer am Okular.

### *Instrumentenkonstanten*

Als Instrumentenkonstanten müssen der Skalenwert  $p$  der Hängelibelle, die Kontaktbreite  $KB$  auf der Kontakttrommel und der tote Gang  $TG$  der Mikrometerschraube bekannt sein.

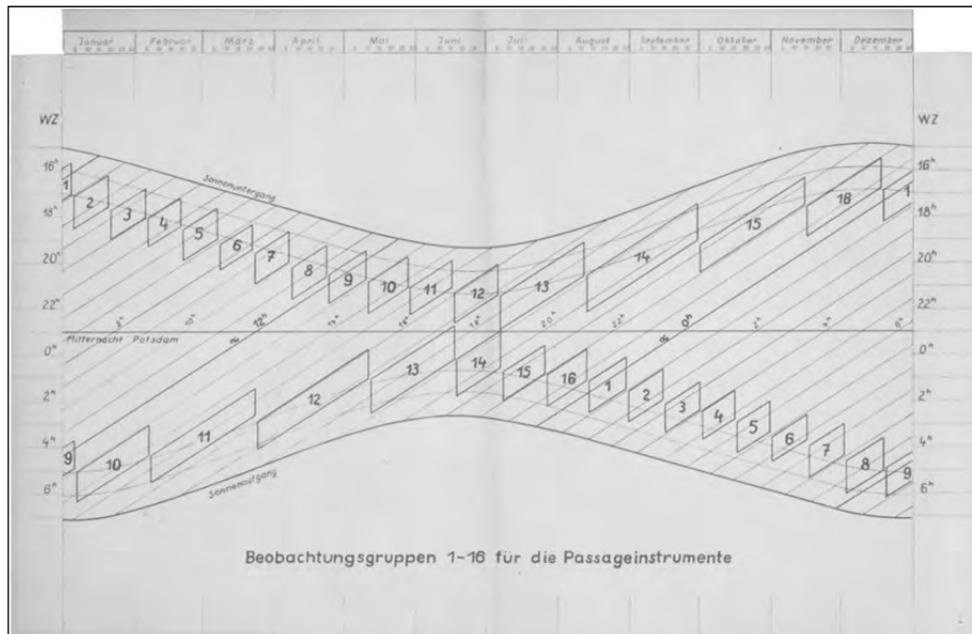
### *Beobachtung eines Sterns*

Die Beobachtung des Sterns erfolgt vor dem eigentlichen Meridiandurchgang, indem 10 Kontaktzeiten erfasst werden. Dann wird das Fernrohr umgelegt, während der Stern den Meridian passiert. Nach dem Meridiandurchgang wird die Beobachtung wiederum über 10 Kontaktzeiten durchgeführt. Der Mittelwert der Kontaktzeiten von beiden Achslagen ist die Meridiandurchgangszeit für den beobachteten Stern.

Vor Beginn und nach Abschluss jeder Sternbeobachtung werden die Blasenstellungen der Hängelibelle zur Ermittlung der mittleren Achsneigung  $i$  registriert. Durch die Beobachtung in beiden Achslagen ist der Einfluss des Kollimationfehlers eliminiert. Die beobachteten Meridiandurchgangszeiten sind wegen Kontaktbreite, toten Ganges und täglicher Aberration zu korrigieren. Ferner wird die Neigung  $i$  der Kippachse berücksichtigt. Da das Achsazimut  $k$  unbekannt bleibt, muss es neben der Uhrkorrektur als zweite Unbekannte bestimmt werden.

### Beobachtungsprogramm

Feste Gruppen mit 12 bis 15 Sternen (Zeitsterne mit einer Zenitdistanz zwischen 30° Süd und 15° Nord und 2-3 Polsterne mit der Deklination > 70°), 16 Gruppen im Verlaufe des Jahres, Beobachtungsdauer einer Gruppe ca. 1,5 Stunden. Das Beobachtungsprogramm wurde nur aus Sternen des Fundamentalkatalogs (FK) zusammengestellt. In der nachstehenden Tabelle sind folgende Angaben einer Gruppe des Beobachtungsprogramms aufgeführt: FK4-Nr. mit der Anmerkung OK bzw. UK bei Polsternen, die Helligkeit (Mag), Rektaszension und Deklination, der Sekans der Deklination (sec  $\delta$ ), die Achslage Okular Ost (E) oder West (W) für den Beginn der Sternbeobachtung und die Zenitdistanz (Einstellwert am Vertikalkreis).



### Gruppe des Beobachtungsprogramms zur Zeitbestimmung

Nr.	FK4	Mag	$\alpha$	$\delta$	sec $\delta$	Achslage	Zenitdistanz
1	317	3.5	8h27,5m	+60°50'	+2,1	E	8°27' N
2	323	6.0	8 36,8	52 50	1,7	W	0 27 N
3	915 UK	5.7	8 45,2	82 24	7,6	E	45 13 N
4	335	3.1	8 56,9	48 11	1,5	W	4 12 S
5	340	5.7	9 01,5	54 25	1,7	E	2 02 N
6	346	5.3	9 11,6	43 22	1,4	W	9 01 S
7	358	3.3	9 30,6	51 50	1,6	E	0 33 S
8	363 OK	5.7	9 39,4	69 24	2,8	W	17 01 N
9	368	3.9	9 48,6	59 12	2,0	E	6 49 N
10	374	5.2	9 55,6	41 13	1,3	W	11 10 S
11	1259	5.7	10 02,4	54 03	1,7	E	1 40 N
12	383	3.5	10 15,1	43 05	1,4	W	9 18 S

Anm.: Die Zenitdistanzen gelten für die Beobachtungsstation Potsdam ( $\varphi = 52^{\circ}23'$ ).

Für die Auswertung der Meridianzeitbestimmung werden die scheinbaren Rektaszensionen der beobachteten Sterne benötigt. Im Astronomischen Jahrbuch sind diese für jede zehnte

obere Kulmination Greenwich gegeben. Die kurzperiodischen Nutationsglieder sind in den Koordinaten nicht enthalten. Für den Beobachtungstag waren die Rektaszensionen der Sterne mit 2. Differenzen auf die Kulminationen im Stationsmeridian bei Berücksichtigung einer Korrektur wegen der kurzperiodischen Nutationsglieder zu interpolieren.

Die wahren Ortssternzeiten für die Epochen der Meridiansterndurchgänge sind die scheinbaren Rektaszensionen  $\alpha$  der Sterne. Die korrigierten beobachteten Meridiandurchgangszeiten differieren zu ihnen um die Uhrkorrektur  $\Delta U$  und um die Achsazimutkorrekturen für die Sterne. Deshalb ergibt sich die lineare Verbesserungsgleichung  $v$  zu:

$$v = \Delta U + K k - l$$

mit dem Ausdruck für die Azimutkoeffizienten

$$K = \sin(\phi - \delta) / \cos \delta$$

und mit dem Absolutglied der Beobachtung

$$-l = -[\alpha - U_{\text{korr}}].$$

### Auswertung

Die Auswertung erfolgt durch Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit 2 Unbekannten: der Zeit (Uhrkorrektur) und dem Achsazimut (Abweichung aus dem Meridian).

### Ungenauigkeit der Zeitbestimmung

Der innere mittlere Fehler beträgt  $\pm 8$  bis  $10$  ms ( $1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s}$ , d. h. etwa  $30 \text{ cm}$  in Ost-West-Richtung für die Potsdamer Breite von  $52^\circ 23'$ ), der äußere mittlere Fehler etwa  $\pm 15$  ms.

Passage-Instrument Nr.

Bemerkungen: Datum  Beobacht. Nr.   
 Jul. Datum  Beobachter   
 Gr. Nr.  Mitte d. Beob.   
 Chronograph  Mitte d. Beob.   
 Hauptuhr  n

Anfang	WZ	SZ	x	y	Wind R	Wind n/S	Wetter	Böe	Windstärke
Ende									
Mitte									

FK 4 Nr.	k	g	gk	gk'	z	gkL	gkL'	z	+	-	gk	gk'	gkL	gkL'	gk	gk'	gkL	gkL'	
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			

W = \_\_\_\_\_ z = \_\_\_\_\_ v<sub>0</sub> = ± 0,0 \_\_\_\_\_  
 Q<sub>1</sub> = \_\_\_\_\_ v<sub>1</sub> = ± 0,0 \_\_\_\_\_ n<sub>1</sub> = ± 0,0 \_\_\_\_\_ P<sub>1</sub> = \_\_\_\_\_  
 Q<sub>2</sub> = \_\_\_\_\_  
 Q<sub>3</sub> = \_\_\_\_\_

FORMELN

$z = (z_0' - z_0) / \cos \delta = (z_0' - z_0) / \cos \delta$   
 $W = (z_0' - z_0) / \sin \delta$   
 $Q_1 = \frac{z_0' - z_0}{n_1} - Q_2 = \frac{z_0' - z_0}{n_1} - Q_2$   
 $Q_2 = \frac{z_0' - z_0}{n_2} - Q_1$   
 $z_0' = \frac{z_0' - z_0}{n_1} + z_0$   
 $z_0 = \frac{z_0' - z_0}{n_2} + z_0$   
 $z_0 = \frac{z_0' - z_0}{n_1} + z_0$   
 $z_0 = \frac{z_0' - z_0}{n_2} + z_0$   
 1. Probe:  $z_0' - z_0 = 0$  2. Probe:  $z_0' - z_0 = 0$

WETTER

1. klar 2. teilweise wolkig 3. stark wolkig 4. Schauerregen  
 5. Dase 6. Bodennebel 7. Nebel 8. Regen

gemessen:

FK 4 Nr.	1	2	3	4	5	6
Lib.						
Abt.						
Bemerk.						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						
gk						
gk'						
gkL						
gkL'						
z						
g						

### *Beobachtungs- und Auswerteformulare*

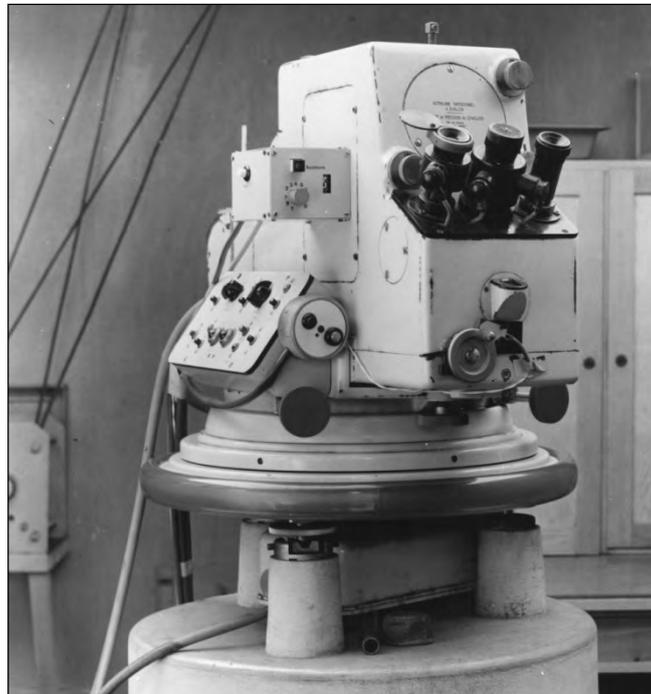
Bei Zeitbestimmungen am Passageinstrument wurden Beobachtungs- und Auswerteformulare benutzt, wie das vorstehende zweiseitige Muster bildlich veranschaulicht. Das Graphik-Feld diente dabei dazu, die Absolutglied-Werte als Funktion von den Azimutkoeffizienten  $K$  darzustellen. Die durch die Punkte gelegte Gerade zeigte dann an, falls Beobachtungen mit größeren Fehlern behaftet sind. Als Näherungswerte der Unbekannten ist die gesuchte Uhrkorrektion durch den Abschnitt auf der Ordinatenachse und das gesuchte Achsazimut durch die Steigung der Geraden bestimmt. Im Formular sind auch die Formeln zur Berechnung der Unbekannten und der mittleren Fehler zusammengestellt.

### **Zeit- und Breitenbestimmung**

#### *Astrolab Danjon zur simultanen Zeit- und Breitenbestimmung*

Ein Astrolab ist ein Spezialinstrument zur Beobachtung von Sterndurchgängen durch den Almukantarat (Parallelkreis zum Horizont des Beobachtungsortes) mit einer Zenitdistanz von  $30^\circ$ . Die Besonderheiten des Gerätes sind:

- eine Vorrichtung zur Einstellung des Azimuts des Sterns am Horizontalkreis
- das Sucherfernrohr
- ein horizontales Fernrohr mit gleichseitigem Prisma
- ein Quecksilberhorizont
- ein doppelt symmetrisches Wollastonprisma im Strahlengang
- ein Motor mit automatischer Geschwindigkeitsreglung



#### *Vorarbeiten*

Vorarbeiten für die Messung mit dem Astrolab sind die Bestimmung der Nullstellung des Wollastonprismas (mit Spiegel statt Prisma), die Autokollimation, d. h. die senkrechte Ausrichtung der Hinterfläche des Prismas zur optischen Achse, das Aufsetzen des

Quecksilberhorizonts auf das Instrument und die Ablesungen von Temperatur, Luftdruck und relativer Feuchtigkeit.

#### *Funktionsweise des Gerätes*

Das Sternenlicht verläuft einmal direkt durch das Prisma und zum anderen nach Reflektion am Quecksilberhorizont durch das Prisma. Beide Strahlen werden vom Objektiv in der Brennebene gebündelt und erzeugen 2 Bilder. Während sich der Stern dem Almukantarat nähert, laufen die vertikal übereinander stehenden Bilder aufeinander zu. Sie fallen zusammen, wenn der Stern den Almukantarat passiert. Die Koinzidenzmoment ist als Durchgangszeit zu registrieren. Indem ein Wollastonprisma im Strahlengang des Astrolabs Danjon bewegt wird, wird die Koinzidenz über einen Almukantaratbereich von etwa  $\pm 2,5'$  Koinzidenz erzeugt und aufrechterhalten. Hierbei werden durch eine Kontaktvorrichtung 24 Zeitmomente registriert. Die rotierende Mikrometerschraube und die Bewegung des Wollastonprismas müssen der Geschwindigkeit der Höhenbewegung des Sterns in den verschiedenen Azimuten entsprechen, was eine motorangetriebene Vorrichtung zur automatischen Geschwindigkeitsreglung besorgt.

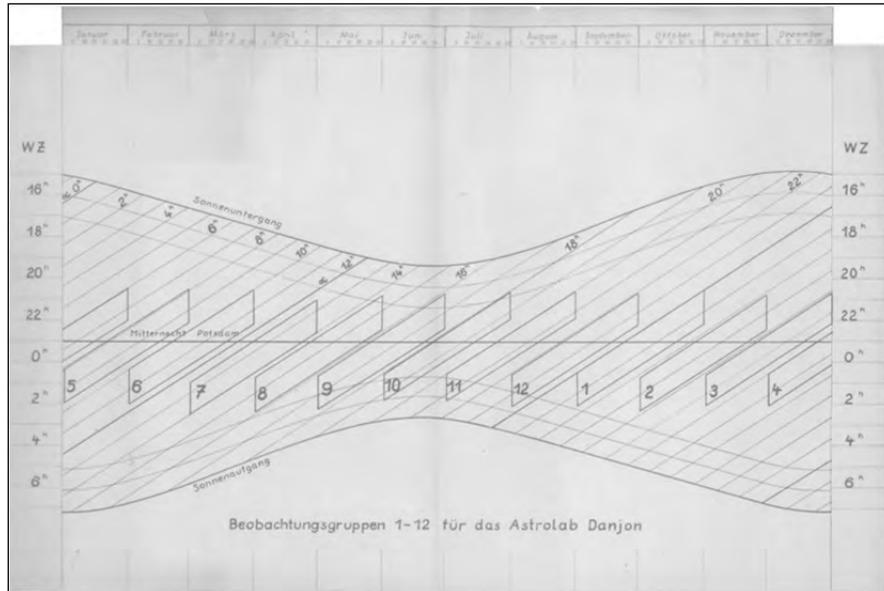
#### *Beobachtung eines Sterns*

Aufgabe des Beobachters ist es, zuerst das Wollastonprisma von Hand mit Hilfe einer Kurbel in die entsprechende Endstellung zu bewegen, je nachdem, ob die Beobachtung des Sterns im Ostdurchgang oder im Westdurchgang erfolgt. Wenn der Stern im Sucherfernrohr erscheint, ist im Hauptgesichtsfeld der Koinzidenzmoment der beiden Sternbilder zu erfassen. Das heißt, der Beobachtungsvorgang ist zu starten. Sonach wird das Wollastonprisma automatisch bewegt. Dabei kann der Beobachter mit Hilfe eines Handrades den Vorgang korrigieren und hat ihn nach dem Ertönen eines Signaltons zu beenden.

#### *Beobachtungsprogramm*

Feste Gruppen mit 24 bis 29 Sternen, die möglichst gleichmäßig über die Azimute verteilt sind. Dies wurde erreicht, indem die Gruppen so zusammengestellt wurden, daß in jeder Gruppe für die Sterne  $[\sin A] < 2$ ,  $[\cos A] < 2$ ,  $[\sin A \cos A] < 2$  und  $[\sin^2 A] \sim [\cos^2 A]$  sind. 12 Gruppen im Verlaufe des Jahres, Beobachtungsdauer einer Gruppe ca 1,5 Stunden.

Das Beobachtungsprogramm wurde nur aus Sternen des Fundamentalkatalogs (FK3) bis zur Helligkeit (Mg) 6.2 zusammengestellt. Insgesamt sind es 246 Sterne, wobei 66 Sterne zur Beobachtung im Ost- und Westdurchgang ausgewählt werden konnten. Das heißt, daß z. B. der Stern mit der FK-Nr. 374 (Mag 5.2) in Gr. 4, Nr. 20 als Ostdurchgang (SZ = 7 h 09,0 min; Azimut = 95,0°) und in Gr. 7, Nr. 4 als Westdurchgang (SZ = 12 h 41,2 min Azimut = 265,0°) zu beobachten war. Die Angaben zur Beobachtung und Auswertung speziell für die Gruppe 7 sind in der beigefügten Tabelle gegeben.



### Auswertung

Die Auswertung erfolgt durch Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit 3 Unbekannten: der Zeit (Uhrkorrektion), der Breiten-Korrektion und der Zenitdistanz-Korrektion.

Für Almukantarats-Durchgangsbeobachtungen zur simultanen Zeit- und Breitenbestimmung lautet die lineare Verbesserungsgleichung

$$v = x \sin A + y \cos A - \Delta z + \delta h,$$

mit  $x$ ,  $y$  und  $\Delta z$  für die Unbekannten, d. h. Korrekturen für die Näherungswerte Zeit, Breite und Zenitdistanz und  $\delta h$  für das Beobachtungsglied.

Das Beobachtungsglied ist nach der Formel

$$\delta h = 15 \sin A \cos \phi_0 (T_{\text{obs}} - T_{\text{cal}}) \text{ (in arcsec)}$$

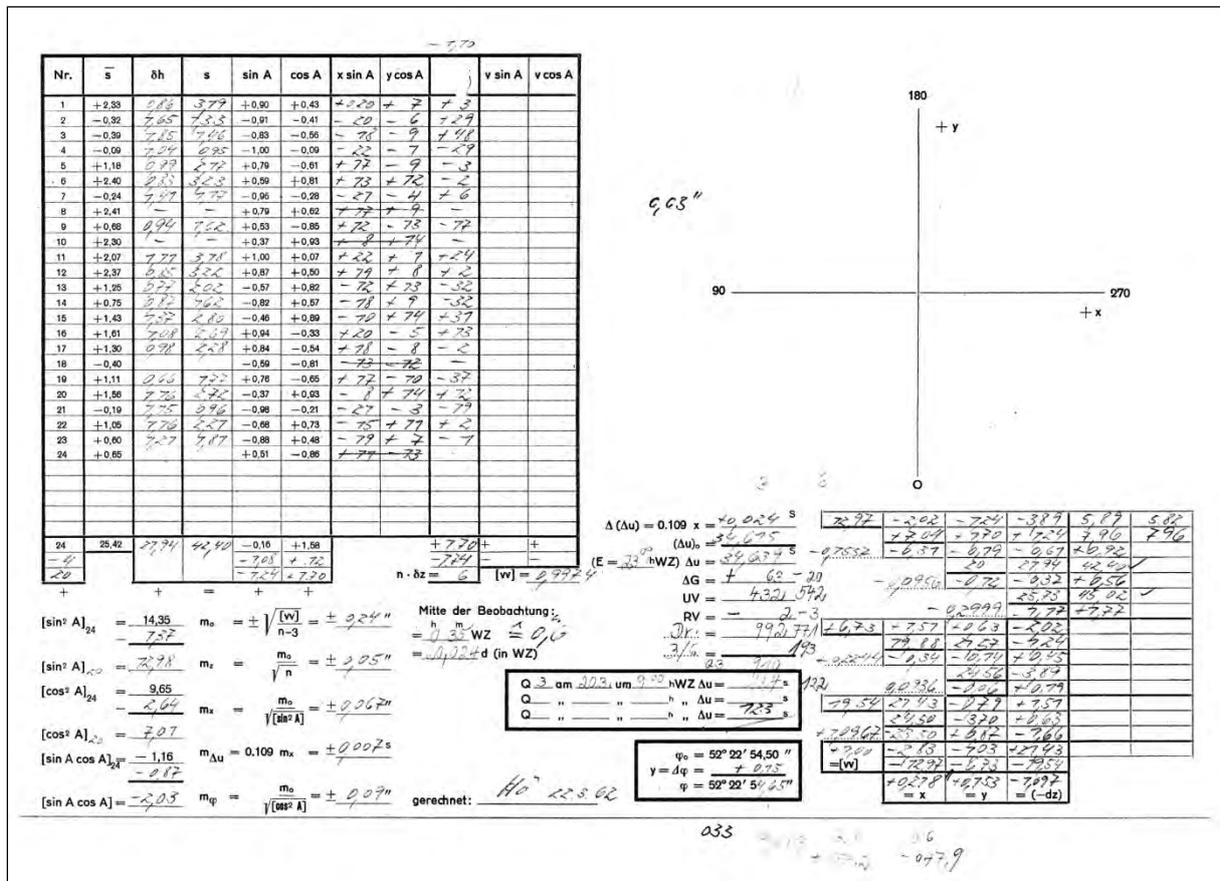
mit  $T_{\text{obs}}$  = beobachtete Durchgangszeit und  $T_{\text{cal}}$  = vorausberechnete Durchgangszeit zu berechnen. Hinzu kommen nachstehende anzubringende Korrektionsglieder:

- Korrektion wegen der kurzperiodischen Nutationsglieder  $d\psi$  und  $d\epsilon$
- Berücksichtigung des Einflusses der Krümmung der Sternbahn  $A(X)$
- Berücksichtigung des Einflusses der Krümmung des Almukantarats  $B(A)$  und
- Korrektion wegen Refraktion und Nullstellung des Wollastonprismas  $\epsilon$ .

Die beobachteten Durchgangszeiten  $T_{\text{obs}}$  sind die Mittelwerte der 20 mittleren registrierten Kontaktzeiten. Die Berechnung der Durchgangszeiten  $T_{\text{cal}}$  hat mit den Ephemeriden  $\alpha$  und  $\delta$  der FK-Sterne zu den Epochen der Almukantaratdurchgänge in Potsdam zu erfolgen. Dabei wird der Einfluss der täglichen Aberration berücksichtigt, indem der konventionelle Wert der geographischen Länge, der in die Berechnung von  $T_{\text{cal}}$  eingeht, dementsprechend reduziert wird. Am Beispiel der beobachteten Gruppe 7 vom 19. März 1962 sollen einige Auswerteformulare zeigen, wie anfänglich die Auswertung von Astrolab-Beobachtungen erfolgte.







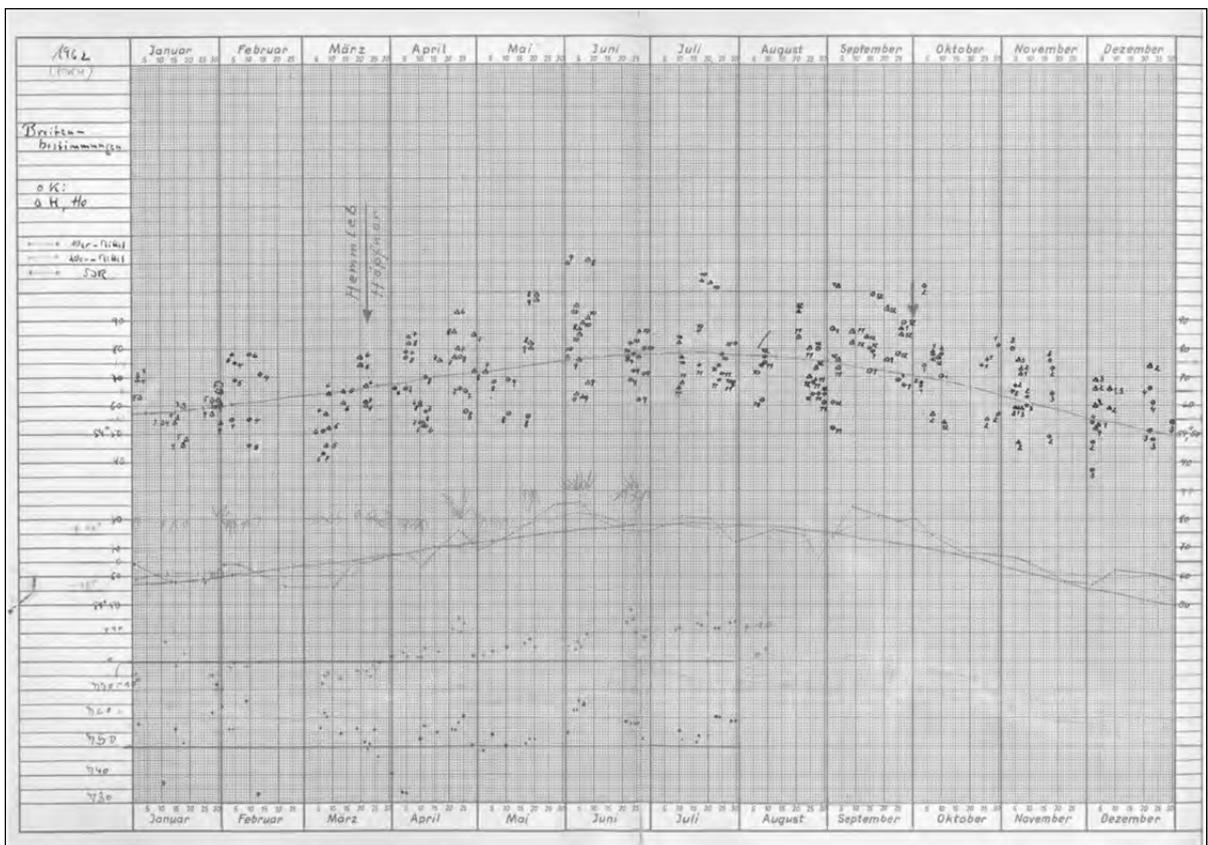
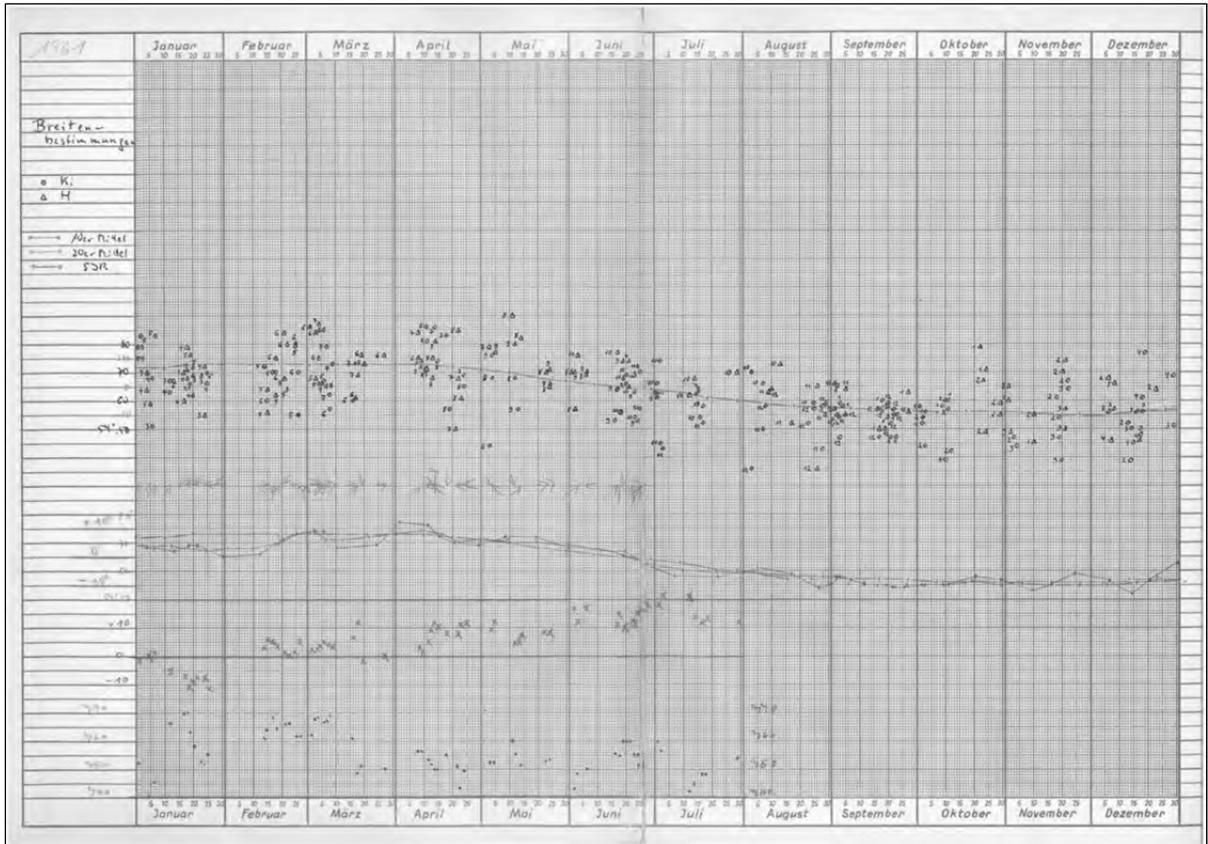
Für eine graphische Lösung sind die  $\delta h$ -Werte als Funktion des Azimuts für die beobachteten Sterns aufzutragen. Dann paßt man den Punkten einen Kreis optimal an und erhält mit den Koordinaten des Mittelpunktes die Zeitkorrektur in x- und die Breitenkorrektur in y-Richtung. Der Kreisradius ist eine Größe für die Zenitdistanzkorrektur.

### Ungeauigkeit der Zeit- und Breitenbestimmung

Der innere mittlere Fehler beträgt für die Zeit etwa  $\pm 6$  ms (1 ms = 0,001 s, d. h. etwa 30 cm in Ost-West-Richtung für die Potsdamer Breite von  $52^\circ 23'$ ), und für die Breite etwa  $\pm 0,1''$ , der äußere mittlere Fehler für die Zeit etwa  $\pm 11$  ms und für die Breite etwa  $\pm 0,1''$ .

### Zeit- und Breitenbestimmungen am Astrolab Danjon von 1957 bis 1986

Am Geodätischen Institut Potsdam wurden seit Anfang Oktober 1957 Beobachtungen zur Zeit- und Breitenbestimmung am Astrolab Danjon durchgeführt. Für die Jahre 1961 und 1962 sind die erhaltenen 231 bzw. 203 Breitenwerte graphisch dargestellt. Im Zeitraum von 1957 bis 1986 waren 6 Beobachter beteiligt, die insgesamt 4045 Zeit- und Breitenbestimmungen beobachtet haben.



## Breitenbestimmungen

### *Das visuelle Zenitteleskop*

Für die Stationen des Internationalen Breitendienstes (ILS) wurden die Beobachtungsinstrumente 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.

Die Besonderheiten des Gerätes sind:

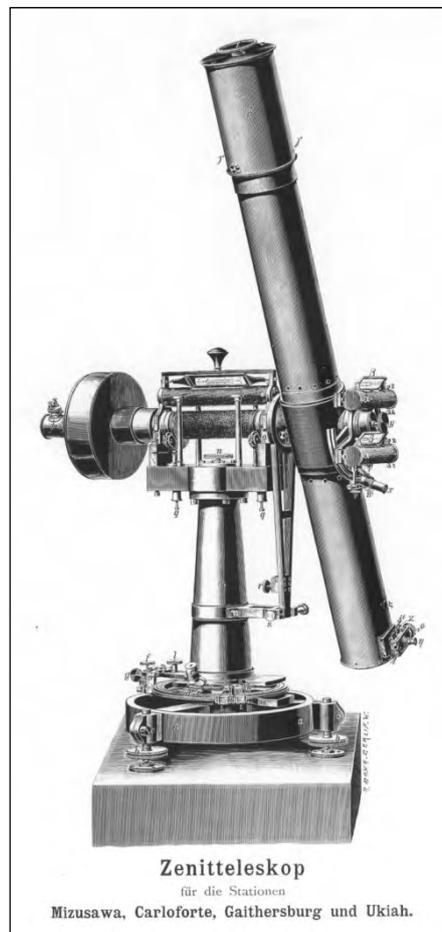
- das exzentrische Fernrohr mit Zenitdistanz-Einstellungskreis
- ein gebrochener Okularauszug mit Okularmikrometer (Revolutionswert 40“)
- ein Fadennetz mit 11 festen Fäden
- 2 Horrebow-Libellen (Sekundenlibellen)
- eine Aufsatzlibelle.

### *Instrumentenkonstanten*

Als Instrumentenkonstanten müssen die Skalenwerte  $p$  der Horrebow-Libellen (in Einheiten der Schraubenrevolution), der Schraubenrevolutionswert und die Fadendistanzen bekannt sein.

### *Beobachtungsmethode*

Gemäß dem Bericht über die Vorbereitung des Internationalen Breitendienstes von Helmert und Albrecht waren die Breitenbeobachtungen nach der Horrebow-Talcott-Methode auszuführen.



### Formeln zur Breitenbestimmung

Im Meridian gilt, wie aus dem Bild ersichtlich,

$$\phi = \delta_S + z_S \quad \text{für einen Südstern in oberer Kulmination}$$

$$\phi = \delta_N - z_N \quad \text{für einen Nordstern in oberer Kulmination (zwischen Pol und Zenit)}$$

$$\phi = 180^\circ - \delta_N - z_N \quad \text{für einen Nordstern in unterer Kulmination (Zirkumpolarstern)}.$$

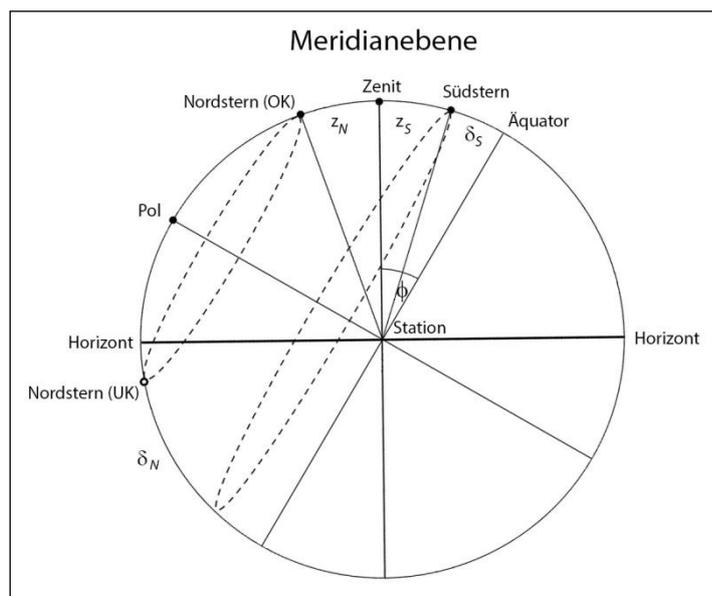
### Horrebow-Talcott-Methode

Es werden Sternpaare, aufeinanderfolgend ein Südstern und ein Nordstern (oder in umgekehrter Reihenfolge) in oberer Kulmination in verschiedener Lage der Kippachse (Drehung der Stehachse um  $180^\circ$ ) beobachtet. Somit ergibt sich aus obigen Gleichungen:

$$2\phi = \delta_S + z_S + \delta_N - z_N$$

$$\phi = \frac{1}{2} (\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2} (z_S - z_N).$$

Die Zenitdistanzdifferenz ( $z_S - z_N$ ) kann mit dem unten am Fernrohr angebrachten Okularmikrometer gemessen werden, wenn die beiden Sterne so ausgewählt wurden, dass der Unterschied kleiner als das Gesichtsfeld des Fernrohrs ist.



$\phi$  Breite der Station,  $\delta, z$  Deklination und Zenitdistanz eines Sterns

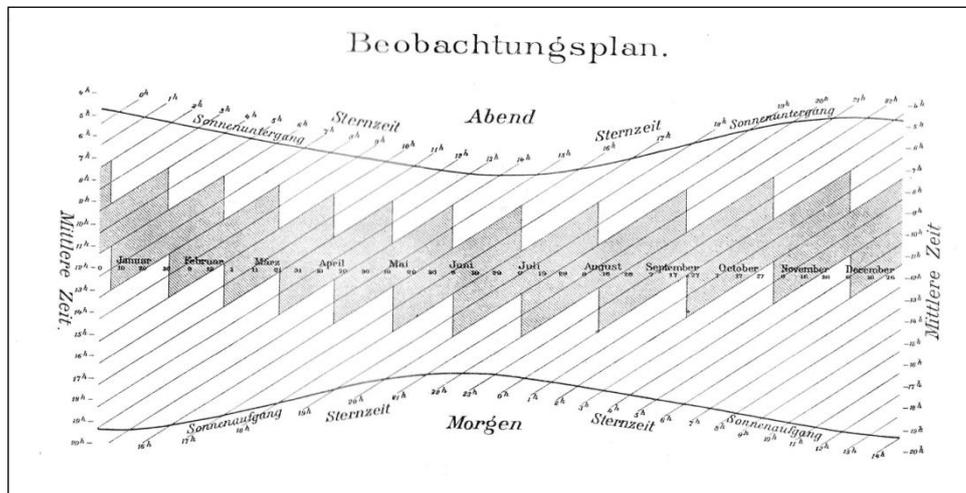
### Beobachtungsprogramm

Das erste Beobachtungsprogramm auf den ILS-Stationen wurde von Sept. 1899 bis Dez. 1905 beobachtet. Es umfasst 12 Gruppen mit jeweils 8 Sternpaaren, speziell 6 Breitenpaare (Zenitdistanz bis  $24^\circ$ ) und nach einem Vorschlag von Helmert 2 Refraktionspaare (Zenitdistanz von etwa  $60^\circ$ ).

Die Grundlage des Sternprogramms war die Bonner Durchmusterung, wobei die Auswahl der Sterne nach folgenden Kriterien erfolgte:

- Zeitintervall zwischen den beiden Sternen des Paares: 4 bis 15 Minuten
- Zenitdistanzdifferenz für Breitenpaare: 10 bis 15 Bogenminuten
- Helligkeit (Magnitude) der Sterne zwischen 4. und 7. Größe.

Das Beobachtungsprogramm zählt 192 Sterne. Wie der Beobachtungsplan aussieht, zeigt seine graphische Darstellung. Die Deklinationen und Eigenbewegungen der für den ILS ausgewählten Sterne wurden aus vorhandenen Sternkatalogen von Dr. Fritz Cohn an der Königsberger Sternwarte abgeleitet.



### Beobachtung eines Sternpaares

Zunächst ist das Instrument mit der vorgesehenen Achslage E ( oder W) in Meridianstellung zu bringen und die aus den Deklinationen berechnete mittlere Zenitdistanz des Sternpaares einzustellen. Die Beobachtung des ersten Sterns ist vorbereitet. Dann sind die Horrebow-Libellen auf Niveau einzuspielen. Der bewegliche Faden wird entsprechend der Zenitdistanzdifferenz und der Fernrohrlage annähernd auf den Revolutionswert am Mikrometer eingestellt, die Stellungen der Horrebow-Libellen sind abzulesen. Anschließend sind vier Einstellungen des Mikrometers werden abgelesen, nämlich zu gegebenen Stellen des festen Fadennetzes. Die Stellungen der Horrebow-Libellen sind nochmals abzulesen. Dann erfolgt die Drehung des Instruments um  $180^\circ$ , und die Horrebow-Libellen werden zum Einspielen gebracht. Weiter wird die Beobachtung des zweiten Sterns des Paares in analoger Weise fortgesetzt. Zu den Beobachtungen einer Gruppe sind Luftdruck- und Temperaturablesungen zu notieren.

### Der internationale Breitendienst ILS

Die Beobachtungen an verschiedenen Observatorien ergaben, dass durch Polbewegungen Variationen der ermittelten Breitenwerte auftreten. Um das Problem der Polbewegung zu untersuchen, wurde 1899 der Internationale Breitendienst (ILS) als erste weltweite wissenschaftliche Kooperation begonnen und an den auf gleicher Breite (N  $39^\circ 08'$ ) liegenden Stationen Mizusawa (Japan), Tschardjui (Rußland), Carloforte (Italien), Gaithersburg (USA), Cincinnati (USA) und Ukiah (USA) Breitenbestimmungen mit visuellen Zenitteleskopen vorgenommen. Von 1899 bis 1922 befand sich das Zentralbureau des ILS am Geodätischen Institut Potsdam, wo die Beobachtungen ausgewertet worden sind.

Das Protokoll der ersten Beobachtungen (Beobachter: Dr. Emilio Bianchi) von 6 Sternpaaren (Gruppe XII) auf der ILS-Station Carloforte in Italien am 24. Okt. 1899 ( $\phi = +39^\circ 08' 09''$ ) wird gezeigt. Der Vollständigkeit halber wird die Gruppe XII des Sternprogramms aufgelistet.

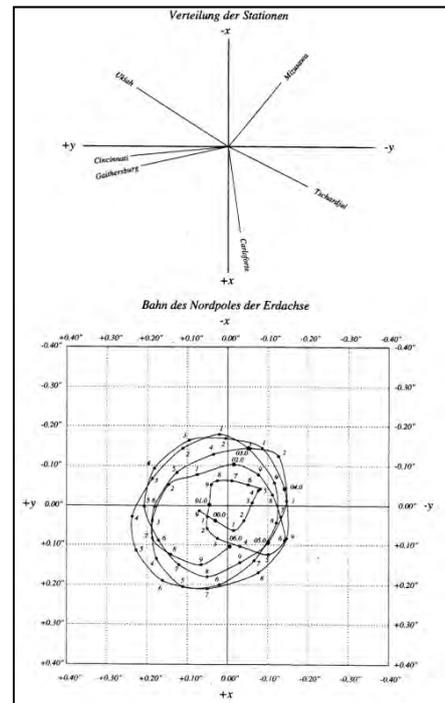
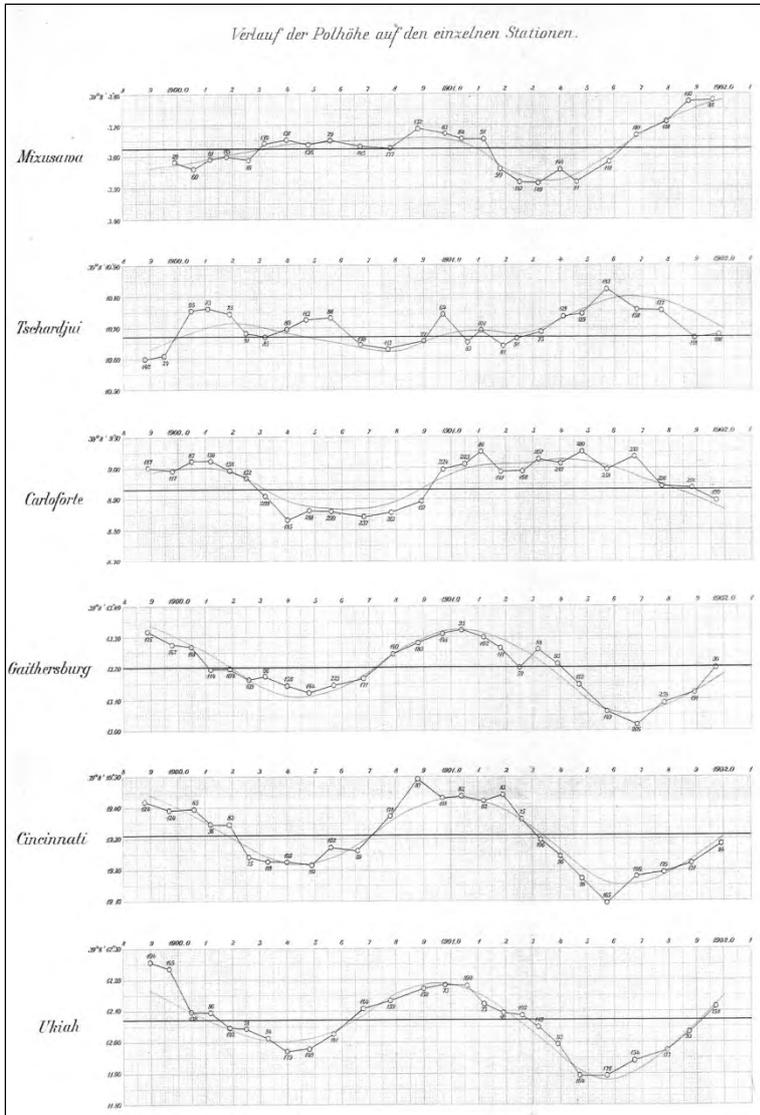
Datum (astr.) 24. Oktob. 1899

Gruppe	Runt	Kreislage		Kreislage	Kreislage		Bemerkungen			
		Dist. I ooster — II — Dist. I nader — II —	Dist. I ooster — II — Dist. I nader — II —		Dist. I ooster — II — Dist. I nader — II —	Dist. I ooster — II — Dist. I nader — II —				
VII	1	W	9.6	32.2 18	096	E	9.7	32.3 16	492	
			56.3	84.6	109		56.7	82.0	92	
					21				92	
			9.6	32.1	35		9.7	32.3	87	
B.			56.3	81.6	419		56.8	82.0	353	
2	E		14.0	36.8 15	421	W	14.8	37.4 13	556	+10.0+58.9
			61.3	86.8	04		61.8	87.1	54	-18.9-47.8
					00				52	
			14.3	37.0	06		14.8	37.4	48	
3	W		61.6	87.0	31		61.7	87.0	210	
3	E		10.0	32.7 19	820		9.7	32.2 12	871	ti = 10:7
			56.8	82.1	18		56.4	81.8	50	te = 19:8
					22				79	
			10.0	32.7	27		9.7	32.3	54	
4	E		56.8	82.1	87		56.6	82.0	264	
4	E		11.6	34.2 21	086	W	11.6	34.2 18	197	+17.0+16.0
			58.5	83.9	97		58.1	83.5	98	-12.1-44.0
					78				207	
			11.6	34.2	78		11.6	34.1	14	
5	W		58.7	84.0	539		58.1	83.5	813	
5	E		11.9	34.5 16	188		12.1	35.0 12	872	
			59.0	84.4	90		59.2	84.5	54	
					89				56	
			11.9	34.6	82		12.3	35.0	57	
6	E		59.0	84.4	349		59.4	84.7	259	
6	E		11.6	34.1 10	722	W	11.3	34.0 15	443	
			58.2	83.6	31		58.1	83.5	43	
					16				52	
			11.6	34.2	12		11.2	34.0	59	
7	E		58.2	83.6	81		58.0	83.4	207	

### Gruppe XII

Paar	Nr.	Mag	$\alpha_{1900.0}$	J.Ä.	$\delta_{1900.0}$	J.Ä.	Zenitdistanz
89	177N	5.9	21 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup>	+2.4	+44°10'03"	+17.3	5° 02'
	178 S	5.5	22 08 22	+2.6	+34 06 41	+17.7	
90	179 S	7.3	22 20 20	+3.3	-20 44 40	+18.2	59 52
	180 UK	6.3	10 25 44	+6.5	+81 00 36	-18.4	
91	181 N	6.5	22 31 44	+2.5	+49 33 10	+18.6	10 23
	182 S	5.0	22 37 04	+2.8	+28 47 08	+18.7	
92	183 N	5.6	22 45 38	+2.5	+55 22 20	+19.0	16 17
	184 S	7.1	22 57 28	+2.9	+22 48 09	+19.4	
93	185 UK	7.0	11 02 13	+5.5	+82 16 42	-19.6	58 34
	186 S	7.0	23 11 42	+3.2	-19 25 07	+19.6	
94	187 S	7.2	23 16 33	+2.9	+35 57 11	+19.7	03 12
	188 N	5.9	23 22 18	+2.9	+42 21 40	+19.8	
95	189 S	6.9	23 27 29	+2.9	+34 24 02	+19.8	04 45
	190 N	6.1	23 32 39	+2.9	+43 52 33	+19.9	
96	191 N	6.3	23 42 35	+3.0	+46 16 37	+20.0	07 14
	192 S	6.8	23 53 43	+3.0	+31 49 31	+20.1	

Aus den gleichgearteten Messungen an allen Stationen ließ sich die Polbewegung nachweisen. Die Abbildung zeigt den Vergleich des Verlaufs der Polhöhe an den einzelnen Stationen. Daraus ließ sich die Polbewegung (nächste Abbildung) für die Jahre 1899 bis 1906 ableiten. Oben ist die Verteilung der Stationen dargestellt, unten die Bewegung des Pols der Erdachse.



## Thema 4: Messungen der Erdschwere

### Absolute Schweremessungen mit Reversionspendeln

#### *Begriffe und physikalische Grundlagen*

##### *Pendel*

Das Pendel ist ein drehbar aufgehängter Körper, der unter der Wirkung der Schwerkraft Schwingungen um seine Ruhelage ausführt.

##### *Mathematisches Pendel*

Das Mathematische Pendel ist eine Idealisierung, bei der man sich die gesamte schwingende Masse in einem Punkt vereinigt denkt, der am Ende eines masselosen, unausdehnbaren Fadens befestigt ist (Fadenpendel).

##### *Pendelgesetze*

Die Pendelgesetze lassen sich wie folgt formulieren:

1. Die Schwingungsdauer  $T$  ist unabhängig von der Masse des Pendelkörpers.
2. Für kleine Schwingungen ist sie unabhängig von der größten Auslenkung aus der Ruhelage, der Schwingungsweite oder Amplitude.
3. Die Schwingungsdauer  $T$ , welche die Zeit eines Hin- und Hergangs bedeutet, ist

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

wobei  $l$  die Pendellänge und  $g$  die Erdbeschleunigung sind.

##### *Physikalisches Pendel*

Bei dem Physikalischen Pendel ist die räumliche Ausdehnung des schwingenden Körpers zu berücksichtigen. Schwingungsmittelpunkt bis Abstand vom Drehpunkt: Das ist die reduzierte Pendellänge.

##### *Das Sekundenpendel*

Die halbe Schwingung eines Sekundenpendels dauert eine Sekunde. Seine Pendellänge  $l$  ist rd. 99,4 cm. Die hierfür umgeformte Formel lautet:

$$l = T^2 \frac{g}{4\pi^2}$$

mit  $T = 2\text{s}$  und  $g = 9,81\text{m/s}^2$ .

##### *Das Halbsekundenpendel*

Die halbe Schwingung eines Halbsekundenpendels dauert eine halbe Sekunde. Mit der Schwingungsdauer  $T = 1\text{s}$  ist seine Pendellänge  $l$  ist rd. 24,9 cm.

##### *Das Reversionspendel*

Die Besonderheit von Reversionspendeln besteht darin, dass die *zwei Aufhängepunkte* so eingestellt werden, dass sie exakt dieselbe Schwingungsperiode besitzen. Damit wird das

schwierige Problem umgangen, den Schwerpunkt des Pendels zu bestimmen, um die Pendellänge genau zu bestimmen. *Die Aufgabe reduziert sich auf die Messung der Distanz zwischen den beiden Schneiden, deren Wert die in die Schwingungsformel einzugebende Pendellänge ist.*

#### *Erdbeschleunigung oder Schwere*

Die Formel zur Berechnung der Erdbeschleunigung lautet:

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$$

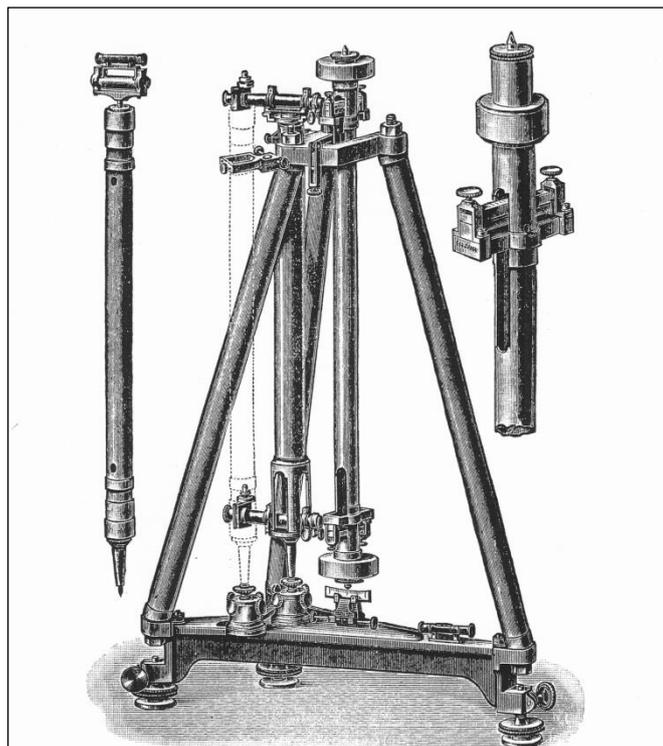
Die Erdbeschleunigung wird auch Erdschwerebeschleunigung oder kurz Schwere genannt. Verwendete Maßeinheiten für die Schwere sind:

$$\text{m/s}^2, 1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2, 1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2, 1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2.$$

#### **Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch F. Kühnen und Ph. Furtwängler**

##### *Einführung*

Schweremessungen haben für die Bestimmung der Gestalt der Erde eine grundlegende Bedeutung. Deshalb wurden bereits von 1869 bis 1871 absolute Schwerebestimmungen mit dem *Repsoldschen Pendelapparat* auf 10 Stationen in Preußen und Sachsen durch das Zentralbüro der Europäischen Gradmessung und das Geodätische Institut ausgeführt. In der Abbildung ist ein solcher Apparat dargestellt. Das Reversionspendel ist ein hohler Messingzylinder von ca. 4 cm Durchmesser und von 1,25 m Länge. Zwischen den Gewichten, die an den Enden angebracht sind, hat die Stange zwei Ausschnitte zur Aufnahme der Schneiden.



Da der Transport des großen Pendelapparates zu den Feldstationen große Schwierigkeiten bereitete, wurde 1874 auf der 4. Allgemeinen Konferenz der Europäischen Gradmessung in Dresden eine Pendelkommission unter dem Vorsitz von J. J. Baeyer gebildet. Ihre Aufgabe bestand darin, ein sicheres und rationelles Verfahren zur Messung in Schwerenetzen zu ermitteln. Wichtige Erkenntnisse und Empfehlungen wurden im Kommissionsbericht von Baeyer gegeben. Dabei wurde die beste Lösung für die Messungen darin gesehen, zunächst nur an wenigen Stationen die absolute Schwere mit einem verbesserten Reversionspendel zu bestimmen. An diese Stationen werden dann weitere Stationen durch relative Messungen mittels eines invariablen Pendels angeschlossen.

1885 starb J. J. Baeyer und 1886 wurde Friedrich Robert Helmert (1843- 1917), Geodät und Begründer der mathematischen und physikalischen Theorien der modernen Geodäsie, sein Nachfolger als Direktor des Geodätischen Instituts. 1889 bis 1892 wurde das *Hauptgebäude des Geodätischen Instituts Potsdam (GIP)*, heute Helmert-Haus des GeoForschungsZentrums (GFZ) errichtet. F. R. Helmert selbst hatte maßgeblich Einfluss darauf genommen, wie das Bauprojekt gemäß den künftigen Anforderungen auszuführen war, speziell der *Pendelsaal* als temperaturstabilisierter Raum im Innern des Gebäudes mit einem Doppelpfeiler für absolute Reversionspendelmessungen und drei weiteren Pfeilern für Messungen mit Relativpendelgeräten.

#### *Voruntersuchungen*

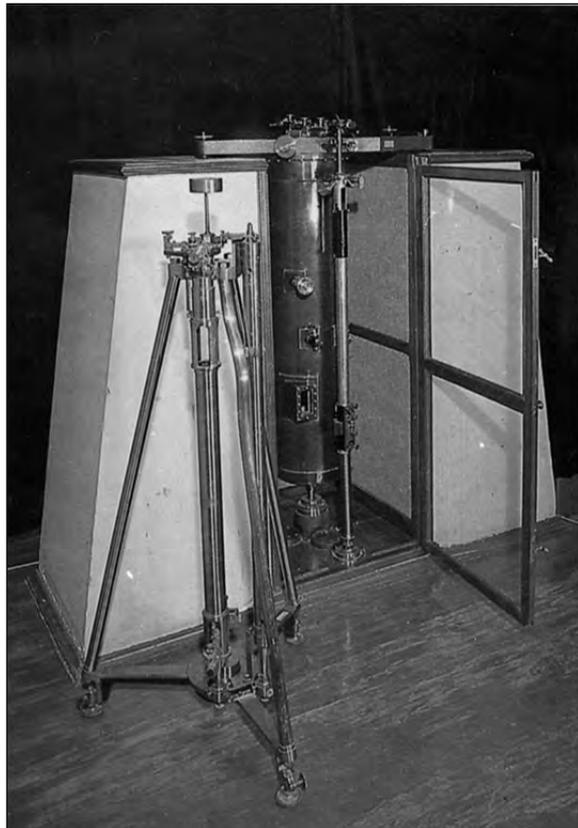
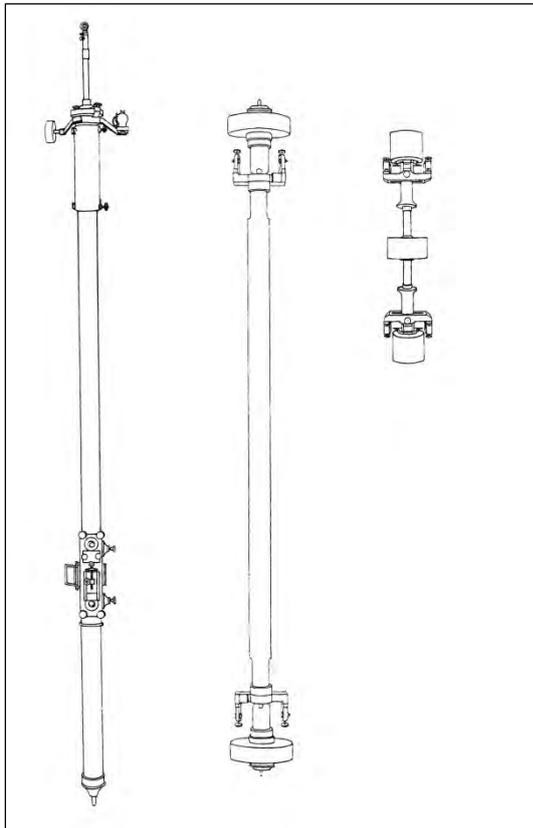
F. R. Helmert und Richard Schumann (1864-1945, Astronom, Geodät und Geophysiker), später auch Friedrich J. Kühnen (1858-1940, Mathematiker, Physiker und Geodät) und Philipp Furtwängler (1869-1940, Mathematiker und Physiker) stellten Untersuchungen zur Verbesserung der Reversionspendelmethode an. 1898 erschien die Publikation „Beiträge zur Theorie des Reversionspendels“ von F. R. Helmert. 1902 entwickelte Ph. Furtwängler grundlegende Formeln zum Mitschwingen des Stativs.

#### *Hauptmessungen*

1898-1904 wurde der Absolutwert der Schwere mit Reversionspendeln im Pendelsaal des Geodätischen Instituts Potsdam durch Friedrich Kühnen und Philipp Furtwängler bestimmt. Für die Messungen wurden 5 *Reversionspendel aus Messing*, angefertigt von Repsold, verwendet:

1. Ein altes *Sekundenpendel* des GIP (erworben 1869, Masse von 5,57 kg)
2. Ein Sekundenpendel des Osservatorio astronomico zu Padua (5,87 kg)
3. Ein schweres Sekundenpendel des K. und K. Militärgeographischen Instituts Wien (6,23 kg)
4. Ein leichtes Sekundenpendel des K. und K. Militärgeographischen Instituts Wien (2,86 kg)
5. Ein *Halbsekundenpendel* des GIP (erworben 1892, 3,53 kg).

Ein *Fadenpendel* diente zur Kontrolle des Mitschwingens von Stativ und Pfeiler. Sein Faden ist ein 0,04 mm dicker Messingdraht und sein Pendelkörper hat ein Messinggewicht von 40 g. Das Fadenpendel schwingt in einer Messingröhre. Zur Beobachtung der Schwingbewegung hat die Röhre an den betreffenden Stellen Ausschnitte. Die Abbildung links veranschaulicht das Fadenpendel, ein Sekundenpendel und das Halbsekundenpendel.



Der *Reversionspendelapparat* ist in der rechten Abbildung zu sehen. Ferner gehörten zur Pendelausrüstung ein *Koinzidenzapparat nach Sterneck* und ein *neuer Maßstab*.

Der Koinzidenzapparat funktioniert in der Weise, dass ein beweglicher Spalt durch einen Elektromagneten, indem dessen Erregungsstrom in Sekundenintervallen der Uhr geschlossen und geöffnet wird, an einem festen Spalt vorbeigeführt und durch eine Feder wieder zurückgeführt wird. Durch den festen Spalt fällt der Lichtstrahl einer Beobachtungslampe im Takt des Uhrpendels. Man hat die Reflektion des Strahles in einem Spiegel am Pendel zu beobachten und so die Koinzidenzmomente von Uhrpendel und Beobachtungspendel zu bestimmen.

Die Koinzidenzbeobachtungen zur Bestimmung der Schwingungsdauer erfolgten nach folgendem Schema:

- für *schweres Gewicht unten* zweimal 16 Koinzidenzen, nämlich bei großer Amplitude (etwa 26' bis 15') und dann bei kleiner Amplitude (etwa 9' bis 6') und
- für *schweres Gewicht oben* (die Amplitude nahm doppelt so schnell ab) zweimal 8 Koinzidenzen, wieder bei großer Amplitude und dann bei kleiner Amplitude.

Die *Schwingzeitmessungen* wurden für zwei lange Serien, in denen jeweils Schneiden und Lager vertauscht wurden, ausgeführt. Dabei standen 5 Schneiden-Lager-Paare teils aus Achat und teils aus Stahl zur Verfügung. In der *ersten Serie*, in der die Pendel mit Schneiden auf ebener Unterlage schwangen, wurden die *Koinzidenzen nach der elektrischen Methode von Sterneck* beobachtet. In der *zweiten Serie*, in der die Pendel mit ebenen Flächen auf feststehender Schneide schwangen, wurde eine *optische Koinzidenzmethode* verwendet. Die Beobachtungen wurden nach den Methoden von Helmert reduziert, die in seinen „Beiträgen zur Theorie des Reversionspendels“ veröffentlicht sind: *Aus den abgeleiteten Koinzidenzintervallen  $c$  wurden die unreduzierten Schwingungsdauern  $T$  berechnet.*

Für die benutzten Sekundenpendel lautet die Formel

$$T = 1 + 1 / (c - 1)$$

und für das Halbsekundenpendel

$$T = \frac{1}{2} + 1 / 2 (2c - 1) .$$

An die Resultate wurden folgende Reduktionen angebracht:

- wegen Aufhängung
- Amplitudenreduktion (Ausschlag)
- Temperaturreduktion
- Reduktion wegen variabler Luftdichte
- Reduktion auf Sternzeitsekunden (Uhrang)
- wegen des Mitschwingens der Pendelunterlage (Formeln nach Furtwängler)
- wegen elastischer Biegung und Dehnung des Pendels und
- Reduktion wegen Unsymmetrie des Pendels.

Nach Reduktion der Beobachtungen wurde eine Ausgleichung nach einem Ansatz von Helmert ausgeführt. Das Endergebnis lautet:

Länge des einfachen Sekundenpendels  $(994,239 \pm 0,003)$  mm und damit der Schwerewert

$$g = (981274 \pm 3) \text{ mGal},$$

das sich auf den Absolutpfeiler SO mit den geographischen Koordinaten  $52^\circ 22,86'$  nördlicher Breite und  $13^\circ 04,06'$  östlicher Länge und der Höhe 87,00 m im Pendelsaal bezieht.

1906 erschien die Veröffentlichung „Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln“ von F. Kühnen und Ph. Furtwängler. Von 1909 bis 1971 wurde der abgeleitete Schwerewert weltweit als internationaler Bezugswert des Potsdamer Schweresystems verwendet.

### **Andere Messungen und die weitere Entwicklung**

Andere Messungen zeigten, dass der Potsdamer Schwerewert einen systematischen Fehler zwischen  $-20,0$  und  $-12,8$  mGal hat. Nach dem 2. Weltkrieg setzte eine starke Aktivität auf dem Gebiet der absoluten Schweremessungen ein. Dabei wurden zunächst Pendel- und Fallmethoden nebeneinander angewandt. Bedingt durch die Entwicklung der Kurzzeitmesstechnik, hat man aber schließlich den Fallmethoden den Vorzug gegeben. Am GIP erfolgten die Vorarbeiten zur Neubestimmung der absoluten Schwere, als über erste Versuche und Pläne mit Fallmethoden berichtet wurde, aber eine Wertung dieser Verfahren noch nicht möglich war.

**Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch R. Schüler, G. Harnisch, H. Fischer und R. Frey**

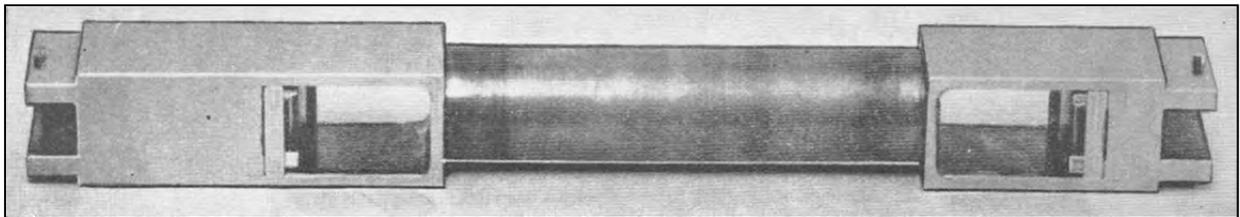
1956 begannen *Vorarbeiten* für die Messungen auf Initiative und unter Leitung von Karl Reicheneder (1903-1981, Physiker). An den Arbeiten der absoluten Schweremessungen waren die Wissenschaftler Rudi Schüler (1925-2004, Physiker), Günter Harnisch (geb. 1936, Geophysiker), Harald Fischer (geb. 1939, Physiker) und Reiner Frey (geb. 1938, Geodät) beteiligt. Es wurden *zwei Messeinrichtungen mit Reversionspendeln* entwickelt:

- ein Reversionspendelgerät mit 25 cm langen Messingpendeln und
- ein Quarzpendelgerät mit drei Pendelpaaren verschiedener Länge

Bei beiden Geräten wurde das *Zweipendelverfahren* angewandt.

#### *Das 25-cm-Reversionspendelgerät*

Es wurde speziell für ein Paar Messingpendel mit pendelfesten Schneiden und einer reduzierten Pendellänge von 25 cm eingerichtet. Die Masse der Pendel beträgt 4 kg. Die Abbildung zeigt, wie beide Messingpendel aufgebaut sind.



Das 25-cm-Reversionspendelgerät hat ein doppel-T-Förmiges Stativ mit vier Lagerflächen, die den Pendelschneiden zugeordnet sind. Was die Reversion betraf, so erfolgte die Drehung der Pendel im Vakuumbehälter zusammen mit dem Stativ, wobei ein Vakuum von etwa  $1 \times 10^{-4}$  Torr erhalten bleibt. Schneiden und Lagerflächen sind auswechselbar für verschiedene Materialpaarungen von Achat und Stahl.

Die *Messung von Schwingungsdauern* für beide Pendel wurde mit zwei getrennten *elektronischen Zählern* ausgeführt, wobei die Vorwahl der Anzahl von Pendelschwingungen 1000 Schwingungen war. Die Schwingzeitmessungen begannen, indem der Schwingungsvorgang elektromagnetisch ausgelöst wurde; die Schwingungsamplituden betragen etwa  $14'$  und wurden photographisch registriert. Die Phasendifferenz zwischen beiden Pendeln wich beim Start um nicht mehr als  $4^\circ$  vom Sollwert  $180^\circ$  ab. Die Schwingzeitmessungen waren wegen unterschiedlicher Krümmungsradien der Schneiden in mindestens zwei Schneidenlagen auszuführen.

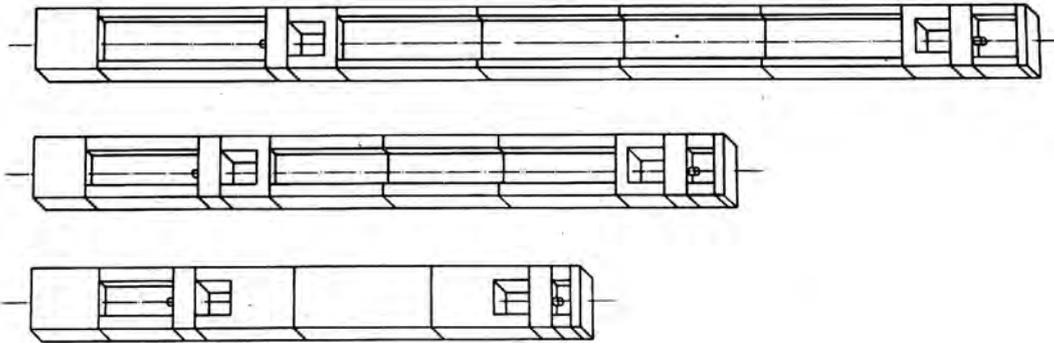
Die *Bestimmung der Pendellänge* (Abstand der einander zugekehrten Schneidenkanten) erfolgte

- durch den *interferometrischen Vergleich* der Schneidenrückflächen mit zwei Quarzetalons, die im Vakuumbehälter neben den Pendeln angeordnet sind, und
- durch Messung der Schneidenhöhen auf einem Interferenzkomparator außerhalb des Pendelgerätes, Länge in Arbeitslage; zum Längenvergleich war keine Belüftung nötig.

Das Mitschwingen des Stativs wegen großem Mitschwingkoeffizienten (geringe mechanische Stabilität wegen Revertierbarkeit) war zu berücksichtigen. Schwingzeit- und Längenmessungen sind wegen des großen Temperaturkoeffizienten von Messing sehr stark temperaturabhängig; deshalb wurde ein Thermometerpendel im Gerät benutzt. Eine Temperaturänderung von  $0,02$  Grad ruft eine Längenänderung von  $0,1 \mu\text{m}$  hervor.

### Das Quarzpendelgerät

Die Messungen am Quarzpendelgerät wurden mit drei Reversionspendelpaaren verschiedener Länge, aber gleicher Masse durchgeführt. Die reduzierten Pendellängen betragen 75 cm, 50 cm und 37,5 cm. Eine schematische Darstellung der Pendel zeigt die Abbildung.



Angaben zu Material und Form der Pendel sind nachstehend aufgelistet:

- optisches Quarzglas bis auf kleine Abstimmuschrauben
- Doppel-T-Profil (große Biegesteifigkeit!)
- ebene, parallele Schwingflächen, mit denen sie auf feststehenden Schneiden schwingen (Messung der Pendellängen mit größerer Genauigkeit)
- Bedampfung der Pendel mit Aluminiumschicht zur Vermeidung elektrostatischer Aufladung

Der Pendelapparat ruht auf einem massiven Doppelpfeiler aus Granit. Das ist der Pfeiler S12 im NO-Keller des Institutsgebäudes (keine Mitschwingeffekte sind zu berücksichtigen). Zu beiden Seiten des Pendelapparates gab es eine Autokollimationseinrichtung zur Justierung der Pendel und zur Bestimmung der Pendelamplitude (etwa 20'). Bei der Reversion müssen die Pendel herausgenommen und in der neuen Lage wieder justiert werden.

Zur Schwingzeitmessanlage gehörten eine unter dem Pendelapparat angeordnete Autokollimationseinrichtung und mehrere elektronische Zähler und Messwertdrucker. Die *Schwingzeitmessungen* wurden mit jeweils zwei Pendeln gleicher Länge, die mit einer Phasendifferenz von 180° schwingen, im evakuierten Pendelapparat bei  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  Torr ausgeführt. Zur Genauigkeit der Messungen der Schwingungsdauer sei gesagt, dass bei einer Messdauer von 1000 Pendelschwingungen die Schwingungsdauer auf  $10^{-8}$  genau erhalten wurde. Quarz hat nur eine geringe Wärmeausdehnung, deshalb ist der Temperatureinfluss nur gering und kann sicher erfasst werden.

### Längenmessung der Pendel

Verwendung fand ein Vakuuminterferometer mit einem Strahlengang nach Dowell, wobei der Abstand der Schwingflächen der Pendel mit Quarzendmaßen entsprechender Länge verglichen wird (Ansprengen von Planspiegeln nötig). Die erreichte Vergleichsgenauigkeit war 0,01 bis 0,02  $\mu\text{m}$ .

Die Ergebnisse der Messungen lauten:

$g_1 = (981\,260,89 \pm 0,83)$  mGal für das 25-cm-Reversionspendelgerät und  
 $g_2 = (981\,259,86 \pm 0,29)$  mGal für das Quarzpendelgerät und daraus

$g = (981\,260,1 \pm 0,3)$  mGal als Gesamtergebnis der Messungen mit beiden Geräten.

Die Schwerewerte beziehen sich auf den Doppelpfeiler S0 im Pendelsaal und die Bezugshöhe 87,00 m. 1971 erschien die Veröffentlichung „ Absolute Schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam 1968 – 1969“.

#### *Vergleich von Ergebnissen*

Die neuen Absolutmessungen der Schwere in Potsdam sind die genauesten jemals ausgeführten Reversionspendelmessungen:

$g = (981\,260,1 \pm 0,3)$  mGal ist das Gesamtergebnis der Messungen 1968 –1969.

Der Vergleich mit den Ergebnissen anderer moderner Absolutgravimeter zeigt, dass der neue Schwerewert keinen systematischen Fehler innerhalb der erreichten Genauigkeit enthält.

Die Schwerebeschleunigung ist orts-und zeitabhängig. Die Ortsabhängigkeit entsteht wegen der Zentrifugalbeschleunigung, der Abplattung der Erde durch Erdrotation, der Höhe und der Massenverteilung im Erdkörper (Bei mGal-Einheiten sind das die Variationen in der 1. bis 4. Stelle vor dem Komma). Die Zeitabhängigkeit resultiert aus den Gezeiten der festen Erde, dem Luftdruck, der Polbewegung, Grundwasser- und Bodenfeuchteänderungen und Höhenänderungen (Bei mGal-Einheiten sind das die Variationen in der 1. bis 4. Stelle nach dem Komma).

*Neue Geräte für solche Messungen sind transportable Absolutgravimeter, die nach dem Prinzip des freien Falls oder des senkrechten Wurfs arbeiten. Diese erreichen Genauigkeiten in der Größenordnung von wenigen Mikrogal.*

### **Relative Schweremessungen**

#### *Grundlagen*

Die Schwere  $g_A$  einer Station A berechnet sich aus Pendelmessungen nach der Formel

$$g_A = 4 \pi^2 l / T_A^2$$

mit  $l$  = reduzierte Pendellänge (Abstand zwischen Drehpunkt und Schwingungsmittelpunkt) und  $T_A$  = Schwingungsdauer.

Bei relativen Pendelmessungen bestimmt man an den Stationen A und B die Schwingungsdauer  $T_A$  und  $T_B$  desselben Pendels, wobei die reduzierte Pendellänge unverändert bleiben müssen. Dann ergibt sich das Verhältnis der Schwerewerte zu:

$$g_A / g_B = T_B^2 / T_A^2 .$$

Ferner kann die Schweredifferenz zwischen A und B mit der Formel, die sich aus einer Reihenentwicklung ergibt, berechnet werden:

$$g_B - g_A = -2 g_A (T_B - T_A) / T_B + 3 g_A (T_B - T_A / T_B)^2 - \dots$$

Hierbei erreicht das 2. Glied aber erst für  $(T_B - T_A) = 2071$  Einheiten der 7. Dezimale eine halbe Einheit der 5. Dezimale in  $g_B$ .

Zur Kontrolle der Unveränderlichkeit der Pendellänge werden die Messungen mit mehreren Pendeln ausgeführt. Meist werden vier Pendel benutzt. Die beobachteten Schwingungszeiten müssen auf konstante äußere Bedingungen reduziert werden, indem man die Reduktionen wegen

- Einfluß der endlichen Amplitude
- Luftdichte
- Temperatur
- elastischer Stativbewegung
- Magnetfeld und
- Uhrgang

anbringt. Dann liefern die mittleren reduzierten Schwingungszeiten die Schweredifferenzen.

#### *Relative Pendelmessungen ab 1892*

Ab 1892 wurden am Institut relative Schweremessungen mit zwei Sterneck-Pendeln als Versuchs- und Anschlussmessungen durchgeführt. 1908 folgten Messungen mit neukonstruierten Drei- bzw. Vierpendelapparaten, und zwar einem Dreipendelapparat, gebaut von Stückrath, Friedenau, mit 3 Messingpendeln und mit 3 Nickelstahlpendeln (Invarpendeln) und einem Vierpendelapparat (Abbildung unten), gebaut von Fechner im Institut.



Pendelapparat und Halbsekundenuhr „Strasser & Rohde No. 141“

#### *Zugehörige Zeitmessungen*

Zuerst wurden bis 1913 astronomische Zeitbestimmungen an den Stationen ausgeführt, um den Gang der Uhr zu ermitteln. Seit 1923 wurden funktelegraphische Zeitsignale für die Kontrolle der Stationsuhr verwendet. Für die Messungen der Schwingungsdauer wurde die elektrooptische Koinzidenzbeobachtung benutzt. Ab 1936 konnte eine photographische

Registriereinrichtung, konstruiert und erprobt von H. Schmehl, zur Schwingungzeitmessung und Signalaufnahme angewandt werden.

#### *Geodätisch-astronomische Zeitbestimmungen auf Feldstationen im Jahre 1897*

Zur Zeitbestimmung dienten ein 10zölliges Universalinstrument von Pistor & Martins oder ein kleines Bambergisches Passageinstrument. Dabei wurde das bei Anwendung eines Passageninstruments im Meridian übliche Verfahren für Durchgangsbeobachtungen von Sternen angewandt.

Unter normalen Umständen wurden am Abend 2 Zeitbestimmungen nach dem Schema 2 Zeitsterne bei Okular Ost, 1 Polstern bei Okular Ost und West, 2 Zeitsterne bei Okular West beobachtet. Als Polsterne wurden mit wenigen Ausnahmen 3 gut bestimmte Sterne von + 82,2°, + 86,6° und 87,2° Deklination verwendet. Sämtliche Sterne waren im Berliner Astronomischen Jahrbuch enthalten. Bei der Auswertung einer Zeitbestimmung wurde zunächst aus jeder Polsternbeobachtung die Kollimation, aus der Verbindung der Beobachtungen der Polsterne mit Zeitsternen das Azimut des Instruments und schließlich aus den Durchgangszeiten der Zeitsterne die Uhrkorrektion nach der bekannten Mayerschen Formel hergeleitet.

#### *Beispiel für die Bestimmung der Schwingungsdauer eines Pendels*

Eine Pendelbeobachtung wurde begonnen, wenn das Pendel, das mit einer Amplitude von 15' in Schwingung versetzt wurde, bereits mindestens 30 Minuten im Arbeitskasten schwang. Am Anfang und Ende der Beobachtung wurden notiert: Pendelausschlag, Luftdruck und Feuchtigkeit sowie Temperaturen. Zur Bestimmung der Schwingungsdauer eines Pendels wurden 2 Reihen von je 8 aufeinanderfolgenden Koinzidenzen mit der Uhr beobachtet. Der zeitliche Abstand der beiden Reihen war dem 20fachen Koinzidenzen-Intervall (20 c) gleich und betrug für die 4 verwendeten Pendel zwischen 30 und 35 Minuten. Das nachstehende Beispiel veranschaulicht das Verfahren.

Zunächst ist aus der beobachteten Koinzidenzen-Periode c die Schwingungsdauer s des Pendels in Sekunden der Koinzidenz Uhr zu berechnen. Da die Uhr stets nach Sternzeit reguliert war und die Schwingungsdauer von den benutzten Halbsekundenpendeln immer größer als eine halbe Sternzeitsekunde war, haben Uhr und Pendel nach Ablauf einer Periode c bzw. 2c – 1 Schwingungen vollführt. Folglich lautete die Formel zur Berechnung der Schwingungsdauer

$$s = c / (2c - 1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4c - 2} .$$

Die Reduktion von s lieferte die reduzierte Schwingungsdauer

$$S = s - s \cdot (\text{arc}^2 \alpha / 16) - (571^s D + 48^s T) 10^{-7} - \sigma + (s \cdot U) / 86400^s ,$$

wobei

$\alpha$ -Pendelausschlag, D-relative Luftdichte,  $\sigma$ -Einfluss des mitschwingenden Pendellagers, T-Pendeltemperatur und U-Gang der Koinzidenz Uhr gegen Sternzeit in 24<sup>h</sup> Uhrzeit bedeuten.

Station Potsdam. Datum 19. Juni 1900. Beobachter BORRASS. Pendel No. 5.

Uhrzeit	Luftdruck und Feuchtigkeit			Ausschlag		Lufttemperatur		Pendeltemperatur		
	Barom.	Temp.	Hygrom.	oben	unten	Beob.-Raum	Arbeits-Kasten	Arbeits-Kasten	Ruhe-Kasten	
Anfang	2 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>	760.6	18.9	87.5	7.8	7.8	14.0	14.14	13.80	13.84
Ende	3 3	760.5	17.1	87.5	5.9	5.9	14.2	14.15	13.84	13.94
Mittel	2 39	760.6	18.0	87.5	6.85	6.85	14.1	14.15	13.82	13.89
Korrekt.		- 5.8 + 0.2		10.4 - 3.9	13.7			- 19	+ 9	0
		755.0					13.96	13.91	13.89	

1	2 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> 24. <sup>s</sup> 4	21	2 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 12. <sup>s</sup> 6	20 c = 33 <sup>m</sup> 48. <sup>s</sup> 2	c = 101. <sup>s</sup> 421
2	18 3.9	22	51 52.2	48.3	s = 0. <sup>s</sup> 5024772
3	19 46.8	23	53 35.2	48.4	Ausschl. — 5
4	21 27.2	24	55 15.4	48.2	Luftdr. — 537
5	23 10.0	25	56 58.8	48.8	Temp. — 668
6	24 49.9	26	58 38.0	48.1	Mitschw. — 64
7	26 32.8	27	3 0 21.3	48.5	Uhr gang + 4
8	28 12.2	28	2 1.0	48.8	S = 0.5023502
				48.41	

Entfernung Spiegel-Skala 1.72 m.

Wert eines Skalenteils (2 mm) = 2'.

Der zweite Klammerausdruck in der Reduktionsformel enthält die Pendelkonstanten mit dem Luftdichtekoeffizienten und dem Temperaturkoeffizienten. Diese hängen von der Form und dem Material der Pendel ab. Sie wurden durch spezielle Untersuchungen bestimmt.

### Entwicklungsarbeiten

Das Geodätische Institut Potsdam leistete große Entwicklungsarbeit für die Messverfahren und Mehrpendelapparate. Umfangreiche Untersuchungen betrafen das Mitschwingen des Stativs, den Einfluss magnetischer Felder auf Invarpendel und Material und Form der Pendel. Zuerst wurden mehrere Pendel in einem Einpendelapparat nacheinander benutzt, um sprunghafte Änderungen der Pendellänge zu erkennen. Die Zweipendelmethode verlangte ein Stativ mit mindestens zwei Lagern zur Bestimmung des Mitschwingens. Bereits 1910 hat L. Haasemann einen Vierpendelapparat für Pendelmessungen eingesetzt, der von Max Fechner in der mechanischen Werkstatt des Instituts gebaut worden war. Bei den Messungen mit dem Vierpendelapparat schlangen je zwei Pendel gleichzeitig in zueinander senkrechten Ebenen. In den zwanziger Jahren sind ein Vierpendelhaubenapparat und ein Vierpendeltopfapparat in der Institutswerkstatt hergestellt worden. Der Topfapparat hatte eine stabilere Aufstellung als der Haubenapparat. Seine Besonderheit ist, daß an der Topfwand befestigte 4 kleine Konsolen die Pendellager tragen. Beide Apparate waren auf ca. 4 mb evakuierbar. Deshalb konnte die Beobachtungsdauer deutlich verlängert werden, wodurch sich der Einfluss der Unsicherheit des Uhrgangs verringern ließ. Die gleichzeitige Beobachtung aller vier Pendel wurde dadurch möglich, daß eine 1928 von H. Schmehl entwickelte optische Brücke zum Einsatz kam. Serienmäßig wurden von der Firma Askania, Berlin, Vierpendelapparate gebaut, denen die Potsdamer Pendelapparate-Konstruktionen zugrunde liegen.

### Relative Pendelmessungen nach 1945

Im Geodätischen Institut Potsdam wurden nach 1945 zwei Geräte mit je zwei Pendelsätzen benutzt: ein 4-Pendel-Topfapparat, gebaut von M. Fechner, und ein 4-Pendel-Haubenapparat aus Jena. Die Pendelsätze sind Halbsekundenpendel aus Invar oder Quarz. Bei der Schweremessung schwingen sie paarweise in zwei zu einander senkrechten Ebenen mit gleicher Amplitude gegeneinander. Die Beobachtung der Pendelschwingungszeiten erfolgte mit einem photographischen Registriergerät oder einer elektronischen Schwingzeitmessanlage. Die Messgenauigkeit der relativen Pendelmessungen lag bei ca.  $\pm 0,2$  mGal, das entspricht einer Genauigkeit der Schwingzeitmessung von  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  s.

Die Pendelgeräte wurden dazu benutzt, eine Gravimetereichlinie zu schaffen, die zur Prüfung der Maßstabsfaktoren von Gravimetern diente. Ferner sind die Schweredifferenzen nach Sofia (1958/59), Rom (1964), Mirny und Molodjoshnaja, Antarktika (1964/65), Helsinki und Ivalo (1966) bestimmt worden. Zu relativen Schweremessungen in Mitteleuropa und in der Antarktis sind auch die beiden Askania-Gravimeter GS-12 eingesetzt worden, die sonst hauptsächlich für die Registrierung zeitlicher periodischer Schwereänderungen am Gravimetrischen Observatorium benutzt wurden.

#### Relative Pendelmessungen, ausgeführt durch Mitarbeiter des Geodätischen Instituts Potsdam

Zeit- raum	Anzahl Statio- nen	Apparat	Bestimmung des Uhrgangs	Bestimmung des Mitschwingens	Mittl. Fehler aus Gang	Mittl. Fehler $\emptyset$
1894– 1901	114	Einpendelapparat mit 4 Messingpendeln	Astronomische Zeitbestimmung	Wippmethode	$\pm 1,0$ mGal	$\pm 3,0$ mGal
1902– 1907	73	Einpendelapparat mit 4 Messing- oder Invarpendeln, 3-Pendelapparat mit je 3 Messing- und Invar- pendeln	Astronomische Zeitbestimmung	2-Pendelmethode	$\pm 1,3$ mGal	$\pm 2,3$ mGal
1908– 1913	50	4-Pendelapparat mit 4 Invarpendeln	Astronomische Zeitbestimmung	2-Pendelmethode	$\pm 1,0$ mGal	$\pm 2,0$ mGal
1923– 1925	121	4-Pendelapparat mit 4 Invarpendeln	3-6 Zeitsignale von 3-4 Stationen	2-Pendelmethode	$\pm 0,8$ mGal	$\pm 1,4$ mGal
1930 (Ostsee- ring)	8	4-Pendeltopfapparat mit je 4 Invar- und Bronzependeln	4 Zeitsignale von 2 Stationen, Schreibchronog- graph	2-Pendelmethode	$\pm 0,3$ mGal	$\pm 0,5$ mGal
1934– 1943	293	4-Pendeltopfapparat 4-Pendelhaubenapparat mit je 4 Invarpendeln	Zeitzeichen von 3 Stationen, photogr. Registr.	2-Pendelmethode	?	$\pm 0,3-0,4$ mGal
1958/59	1	4-Pendeltopfapparat mit 2x 4 Invarpendeln	Zeitzeichen, photogr. Registr., Quarzuhren	2-Pendelmethode	$\pm 0,03$ mGal	$\pm 0,2$ mGal
1963– 1966  (1963)	3	4-Pendeltopfapparat mit 2x 4 Invarpendeln (+ 1x4 Quarzpendel) 4-Pendelhaubenapparat mit 2x4 Invarpendeln	Zeitzeichen, photogr. Registr., Quarzuhren	2-Pendelmethode	$\pm 0,02$ mGal	$\pm 0,2$ mGal

Beobachter und Bearbeiter: Borrass, E., Haasemann, L., Schumann, R., Schmehl, H., Weiken, K., Elstner, C.

### *Das Mitschwingen der Pendelunterlage*

Erfahrungsgemäß versetzt ein schwingendes Pendel das System, mit dem es durch die Drehungsachse zusammenhängt, also das Stativ, den Pfeiler und innerhalb eines gewissen Bereiches auch den Erdboden in isochrones Mitschwingen, dessen Einfluss sich in einer dem Gewichte des Pendels proportionalen Vergrößerung der Schwingungsdauer zu erkennen gibt. Deshalb bedürfen die abgeleiteten Schwingungszeiten einer Verbesserung wegen der durch die Pendelbewegung erzeugten kleinen Bewegungen der Drehungsachse.

Zur Ermittlung dieses Einflusses wurden zwei verschiedene Verfahren angewandt. Das **erste** Verfahren ist das sogenannte *Wippverfahren*. Es besteht darin, dass der Pfeiler durch Anwendung eines Zug-Dynamometers künstlich in Schwingungen versetzt wird, die sich dem Erdboden sowie dem Hauptpendel mitteilen. Beobachtet man nach einer Anzahl im Schwingungstakt des Pendels ausgeführten Zügen von gegebener Intensität den Ausschlag des Pendels, so hat man damit ein Maß für die Elastizität des Pfeilers und Erdbodens gewonnen. Bei den relativen Pendelmessungen wurden die Pfeiler auf ihr Mitschwingen untersucht. Dabei wurde um den Pfeiler herum in Abständen von je 45° gewippt. Aus den Werten wurde die Wippkonstante für jeden Pfeiler (= 12 für transportablen Pfeiler, = 8 für Pfeiler Nr. 31 im Pendelsaal) bestimmt. Diese gibt an um wie viel Einheiten der 7. Dezimalstelle die Schwingungszeit für einen Ausschlag von 1“ bei einem Stoß von 1 kg zu korrigieren ist.

Das **zweite** Verfahren (2-Pendelverfahren) beruht auf der *Anwendung eines Fadenpendels*, dessen Aufhängepunkt mit dem Stativkopfe fest verbunden und somit gezwungen ist, an den Bewegungen desselben teilzunehmen. Das Verhältnis der Amplituden des Fadenpendels zu denen des Hauptpendels gibt ein direktes Maß ab für die Vergrößerung der Schwingungsdauer des Hauptpendels durch das Mitschwingen.

Die Korrektur der Länge des Hauptpendels wegen Mitschwingens wurde nach der Formel

$$\gamma = \beta_{\max} / \alpha \cdot (l - L) / (1 + e^{(\zeta - z)t})$$

berechnet, wobei

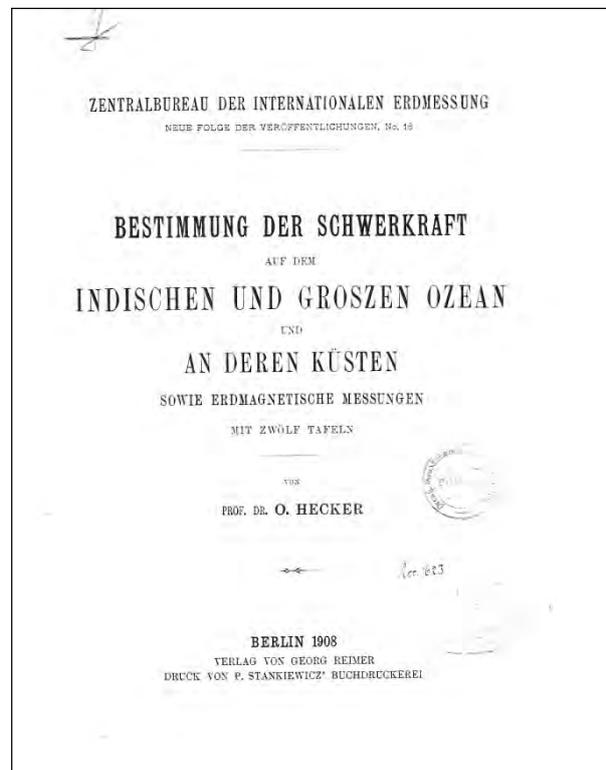
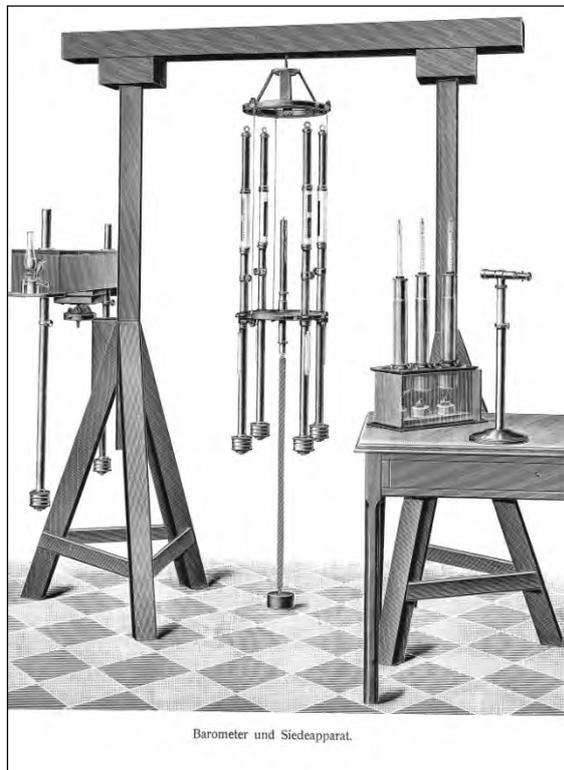
- $\beta$  - Amplitude des Fadenpendels,
- $\alpha$  - Amplitude des Hauptpendels,
- $l$  - Länge des Hauptpendels,
- $L$  - Länge des Fadenpendels,
- $e^{-\zeta t}$  - Dämpfungskoeffizient des Hauptpendels
- $e^{-z t}$  - Dämpfungskoeffizient des Fadenpendels.

### *Relative Schwerkraftbestimmungen auf Auslandsstationen*

<b>Jahr</b>	<b>Land</b>	<b>Station</b>	<b>Beobachter</b>
1894	Österreich	Wien, M.-G. I.	Kühen, F. u. a.
1898	Dänemark	Kopenhagen, Obs.	Schumann, R.
1898	Norwegen	Kristiania	Schumann, R.
1900	Österreich	Wien, Obs.	Borrass, E.
1900	Rumänien	Bukarest	Borrass, E.
1900	Rumänien	Tiglina	Borrass, E.
1901	Rußland	Pulkovo, Obs.	Borrass, E.

## Erste bedeutsame Schweremessungen auf Weltmeeren

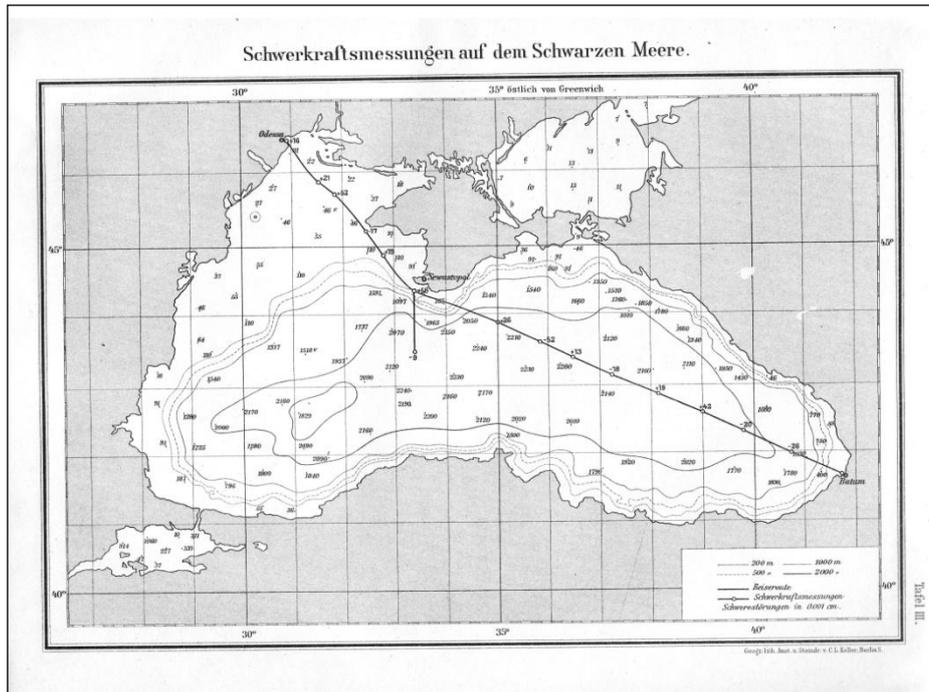
1901 erfolgte die *erste Messreise* zur Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean sowie in Rio de Janeiro, Lissabon und Madrid von Oskar Hecker. Seine baro-thermometrischen g-Messungen erreichten eine Genauigkeit von  $\pm 30$  mGal. Die als Seegravimeter verwendete Apparatur ist im Bild gezeigt, links stehen zwei photographisch registrierende Quecksilber-Seebarometer, in der Mitte vier visuell abzulesende Quecksilber-Seegravimeter und rechts der Siedeapparat mit drei Siedethermometern sowie das Fernrohr zu deren Ablesung. Die Intensität der Schwerkraft wurde bestimmt, indem die Schwerekorrektion mit der Differenz zwischen den schwerkraftabhängigen Luftdruckwerten der Quecksilberbarometer und den schwerkraftunabhängigen Dampfspannungswerten, die aus den Siedethermometerablesungen mit Hilfe der Wiebeschen Tafeln entnommen wurden, berechnet wurde. An den Orten auf dem Kontinent erfolgten die Schwerkraftbestimmungen durch relative Pendelmessungen.



1904/1905 fand die *zweite Messreise* auf dem Indischen Ozean und dem Großen Ozean und an deren Küsten statt. Es erfolgten baro-thermometrische g-Messungen. Schwerkraftbestimmungen gab es durch relative Pendelmessungen an 9 Orten: Melbourne, Sydney, San Francisco, Tokyo, Zi-ka-wei, Hongkong, Bangkok, Rangun und Jalpaiguri mit den Pendeln Nr. 16, Nr. 21, Nr. 5, Nr. 7 und Nr. 8.

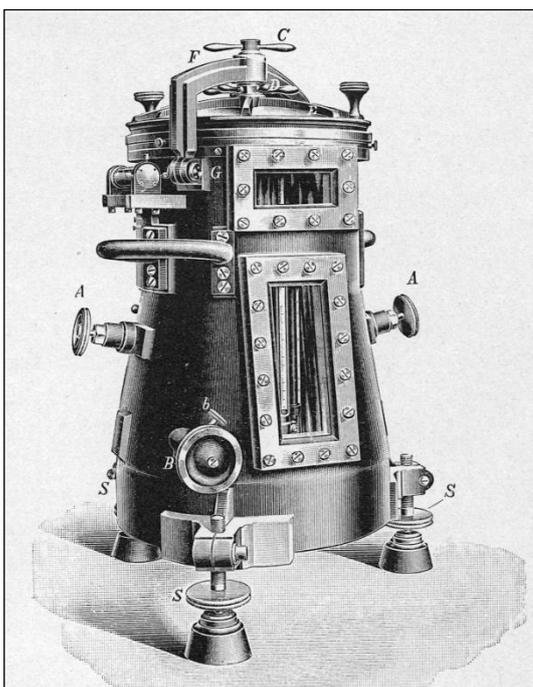
Die *dritte Messreise* führte 1909 auf das Schwarze Meer zu baro-thermometrischen g-Messungen. Dazu gab es Schwerkraftbestimmungen mit dem neuen Potsdamer Vier-Pendelapparat an Land auf den Stationen Odessa, Tiflis und Bukarest. Dabei wurden folgende Pendel verwendet: Pendel Nr. 5 aus Phosphorbronze, Pendel Nr. 7 aus Messing im Institut gefertigt, beide mit einer Periode der Koinzidenzen von rd. 30 Sekunden; Pendel Nr.

6 und Nr. 8 aus Messing von Stückrath in Friedenau mit dem Koinzidenzintervall von nahe bei 100 Sekunden. Die Ergebnisse der Messungen stützen die Theorie von der Isostasie.



### Relative Schweremessungen der Deutschen Südpolar-Expedition

1901-1903 Deutsche Südpolar-Expedition unter der Leitung von Erich von Drygalski nahm relative Schweremessungen mit einem luftdicht verschließbaren Zweipendel-Apparat, gebaut nach Angaben von F. R. Helmert durch den Mechaniker M. Fechner im Geodätischen Institut Potsdam, mit vier Stückrathschen *Halbsekundenpendeln* vor. Diese Schwere-messungen wurden auf den Stationen Porto Grande auf der Kapverdeninsel Sao Vicente, Kerguelen und im Winterlager in der Antarktis ausgeführt. Ihr Bearbeiter war L. Haasemann.



## Relative Schweremessungen mit Gravimetern

### *Prinzip eines Relativgravimeters*

Vom Prinzip her ist das Relativgravimeter eine sehr genaue und empfindliche Federwaage, die vor Temperatur- und Luftdruckschwankungen geschützt wird. Sie hat eine Feder mit einer konstanten Masse. Bei einer Messung dehnt die Masse die Feder gemäß der Schwere an der Station aus. Die Messungen auf zwei verschiedenen Stationen liefern unterschiedliche Längenausdehnungen der Feder, falls die Schwere nicht übereinstimmt. Somit ist die gemessene Längendifferenz ein Maß für die Schweredifferenz. Um das Gravimeter für Messungen einsetzen zu können, ist zuvor seine Kalibrierung nötig, die auf einer Gravimetereichstrecke erfolgt. Vom Hersteller gibt es für das Gerät eine Eich-tabelle oder einen Gravimeterfaktor und eine spezifische Eichfunktion.

Gemessene relative Schweredifferenzen müssen wegen verschiedener Einflüsse reduziert werden, nämlich wegen der Gezeitenwirkung, des Gravimetergang (Gravimeterdrift), der Auswirkung des Luftdrucks (evtl. mit einigen  $\mu\text{Gal}$ ) und evtl. verschiedener Instrumentenhöhen.

## Gezeitengravimetrie

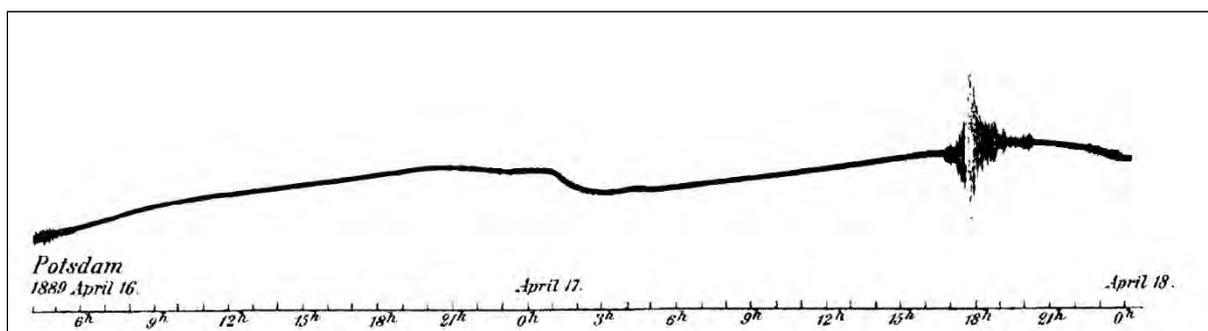
### *Phänomen Gezeiten*

An jedem Ort wird die Schwerkraft in Betrag und Richtung durch die Anziehungskräfte von Mond und Sonne periodisch verändert. Das heißt, daß die Schwerkraft wegen dieser Gezeitenwirkung um ca.  $\pm 25 \cdot 10^{-8}$  von  $9,81 \text{ m/s}^2$  oder bis zu  $\pm 245 \mu\text{Gal}$  variieren kann. Dabei entsteht die Gezeitenwelle aus einer Summe von mehreren hundert Partialtiden mit Perioden zwischen acht Stunden und 18,6 Jahren und mit von der geographischen Breite abhängigen Amplituden. Speziell für Potsdam gibt es nur 27 Partialtiden, deren Amplituden größer als  $1 \mu\text{Gal}$  sind.

Um zeitliche Schwankungen der Schwerkraft (Schwereintensität) zu messen, werden Gravimeter an gravimetrischen Observatorien eingesetzt. Für die Erfassung der zeitlichen Schwankungen der Richtung der Schwerkraft (Lotschwankungen) sind es Horizontalpendel und Neigungsmesser.

### *Erste Nachweise und Aufzeichnungen von gezeitenbedingten Lot- und Schwerkraft-Schwankungen*

1889 erfolgte der erste experimentelle Nachweis der gezeitenbedingten Lotschwankungen mit Horizontalpendeln durch Ernst von Rebeur-Paschwitz (1861-1895) im Keller unter der Ostkuppel des Astrophysikalischen Observatoriums. Dabei gab es auch die 1. Aufzeichnung eines Fernbebens (Japan-Beben vom 17. April 1889).



Erste Aufzeichnungen von *gezeitenbedingten Lotschwankungen* mit Horizontalpendeln über einen längeren Zeitraum in der Messkammer von 26 m Tiefe des Tiefbrunnens auf dem Telegraphenberg gelangen 1902-1909 durch Oskar Hecker (1864-1938). In den Jahren 1910 bis 1920 gab es Messungen mit zwei Horizontalpendeln in der Reichen Zeche in Freiberg/Sachsen in 189 m Tiefe durch Wilhelm Schweydar (1877-1959). Herausragend sind die Aufzeichnungen der *Schwereintensität* mit einem Bifilargravimeter in der Messkammer des Tiefbrunnens durch W. Schweydar 1913-1914. Die Periode der  $M_2$ -Tide beträgt 12,4206 h in mittlerer Sonnenzeit. Um die halbtägige  $M_2$ -Tide aus den einjährigen Messungen zu finden, wurden die stündlichen Ablesungen nach  $M_2$ -Stunden gruppiert. Nach Elimination des Nullpunktes und Abzug einer Konstante (Reduktion auf den luftleeren Raum) ergaben sich aus den über 295 Tage gebildeten Summen die Mittelwerte für  $dg/g$  der  $M_2$ -Tide in Einheiten  $10^{-8}$ . In der Abbildung ist die  $M_2$ -Tide, abgeleitet aus den mit dem Bifilargravimeter gemachten Beobachtungen, graphisch dargestellt. Bei der angewandten Methode ist die Amplitude mit dem Faktor 1.0115 zu multiplizieren, so dass sich der folgende Ausdruck für die  $M_2$ -Tide ergibt:

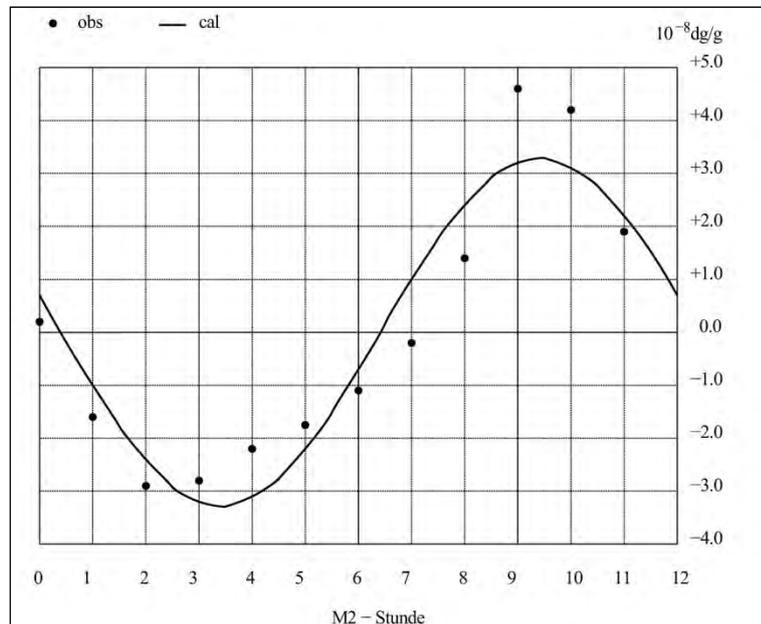
$$dg/g = 3.32 \times 10^{-8} \cos(2t + 77.5^\circ)$$

mit  $t$  - mittlere Sonnenzeit.

Für eine starre Erde lautet der Ausdruck:

$$dg/g = 2.76 \times 10^{-8} \cos(2t + 74.7^\circ).$$

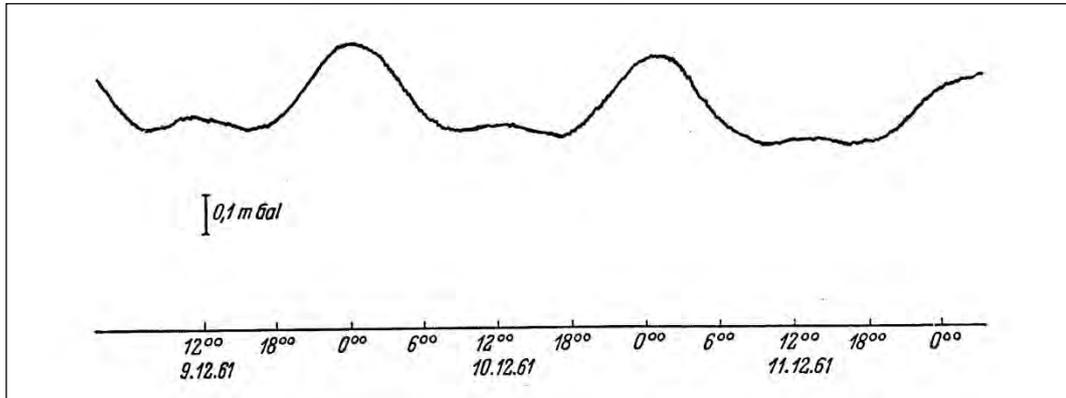
Das heißt, dass der berechnete Amplitudenfaktor 1.20 ist. Schweydars Bestimmung der Amplitude der  $M_2$ -Tide aus einjährigen Messungen war bis auf wenige Prozent ungenau.



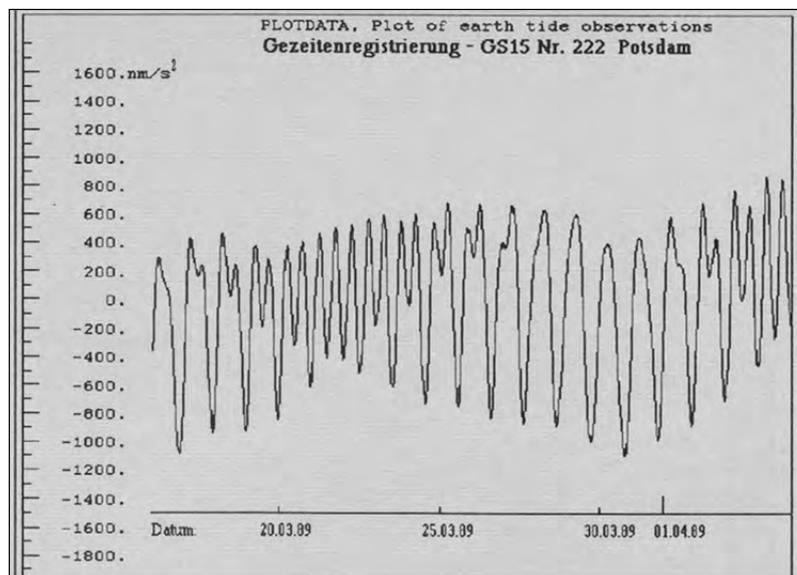
#### *Kontinuierliche Gezeitenregistrierungen am Gravimetrischen Observatorium*

Um zeitliche gezeitenbedingte Schwereänderungen zu messen, wurde eine Gravimeterstation am Geodätischen Institut Potsdam durch Jörg Byl in einem Kellerraum auf der Südseite des Hauptgebäudes eingerichtet, die von 1957 bis 1965 mit dem *Askania-Gravimeter GS-12* Nr. 137 betrieben wurde. Das Gerät ist ein nichtastasierter statischer Schweremesser, dessen Konstruktion auf dem Prinzip der Torsionsfederwaage basiert. Zur Veranschaulichung der damals erhaltenen Gezeitenregistrierung ist die Aufzeichnung vom

Dez. 1961 im Bild gezeigt. Von 1969 an wurden die Geräte in zwei benachbarten Kellerräumen aufgestellt, im bisherigen Kellerraum als Gravimeterraum mit dem Gravimeter allein und im anderen als Registrierraum mit den Geräten zur elektrischen Versorgung, der Messverstärker und der Kompensationsbandschreiber.



Seit 1973 sind kontinuierliche Gezeitenregistrierungen mit dem *Askania-Gravimeter GS-15* Nr. 222 durch Hans-Jürgen Dittfeld (1938-2004) ausgeführt worden. Da das Rauschen der Registrierung nur etwa  $\pm 1 \mu\text{Gal}$  ausmacht, sind stündliche Ablesungen wesentlich genauer als die mit dem *Askania-GS-12*-Gravimeter erhaltenen. Zum Vergleich mit der Aufzeichnung vom Dez. 1961 ist ein Plot der Erdgezeiten, gemessen im März 1989 mit dem *Askania-GS-15*-Gravimeter, gegeben. In Potsdam war die Messreihe zur längsten Gezeitenregistrierung mit diesem Gravimeter entstanden.



Die Untersuchungen des Beobachtungsmaterials nach den von Pertzev und Venedikov entwickelten Analyseverfahren ergaben, dass über mehr als ein Jahr lange homogene Messreihen mit dem älteren Gerät vom Typ *Askania-GS-12* zur exakten Bestimmung der Parameter der Haupttiden  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$  und  $K_1$  benutzt werden können, nicht aber zu Untersuchungen der raum-zeitlichen Feinstruktur des Spektrums der Schwerevariationen. Für die ersten vier mit dem *Askania-Gravimeter GS-15* registrierten Messserien, die nur 1,5 bis 2 Monate überdeckten, also relativ kurz sind, konnten sogleich hinreichend signifikante Resultate von den ganztägigen Partialtiden  $Q_1$ ,  $O_1$  und  $P_1S_1K_1$  und halbtägigen Partialtiden

$N_2$ ,  $M_2$  und  $S_2K_2$  abgeleitet werden (Tafel). Die mittleren Fehler der Amplituden sind bis zu einer Größenordnung kleiner im Vergleich zu denen aus den älteren Gravimeterregistrierungen. Erwähnt sei, dass sich die meteorologisch beeinflussten Wellengruppen  $P_1S_1K_1$  und  $S_2K_2$  besser bestimmen ließen. Danach gab es eine Analyse der Messreihe von 17 Jahren, die die Amplituden und Phasen von 73 der über 1200 Partialtiden lieferte. Sehr lange Messreihen ermöglichen nicht nur eine weitergehende Auflösung eng benachbarter Wellen, sondern auch die Untersuchung langperiodischer Schwereänderungen und der Wirkung äußerer Massenumverteilungen meteorologischer und hydrologischer Art.

*Tafel 1. Harmonische Konstanten nach Venedikov-Analyse*

Serie	17. 11. 73 bis 30. 12. 73 (44 Tage)		31. 12. 73 bis 14. 02. 74 (46 Tage)		16. 02. 74 bis 15. 04. 74 (59 Tage)		17. 04. 74 bis 06. 06. 74 (50 Tage)	
	Amplituden- faktor	Phase [°]	Amplituden- faktor	Phase [°]	Amplituden- faktor	Phase [°]	Amplituden- faktor	Phase [°]
$Q_1$	$1,223 \pm 0,097$	$-1,0 \pm 4,6$	$1,153 \pm 0,030$	$1,5 \pm 1,5$	$1,149 \pm 0,026$	$1,2 \pm 1,3$	$1,134 \pm 0,017$	$-0,5 \pm 0,9$
$O_1$	$1,165 \pm 0,021$	$-0,6 \pm 1,0$	$1,155 \pm 0,007$	$0,1 \pm 0,4$	$1,158 \pm 0,005$	$0,1 \pm 0,2$	$1,155 \pm 0,003$	$-0,2 \pm 0,1$
$P_1S_1K_1$	$1,144 \pm 0,011$	$0,5 \pm 0,6$	$1,135 \pm 0,004$	$0,4 \pm 0,2$	$1,135 \pm 0,004$	$0,4 \pm 0,2$	$1,144 \pm 0,002$	$0,4 \pm 0,1$
$N_2$	$1,175 \pm 0,034$	$0,3 \pm 1,7$	$1,167 \pm 0,018$	$2,4 \pm 0,9$	$1,145 \pm 0,013$	$2,2 \pm 0,7$	$1,164 \pm 0,008$	$1,2 \pm 0,4$
$M_2$	$1,182 \pm 0,008$	$1,2 \pm 0,4$	$1,178 \pm 0,004$	$1,4 \pm 0,2$	$1,188 \pm 0,003$	$1,0 \pm 0,1$	$1,189 \pm 0,002$	$0,8 \pm 0,1$
$S_2K_2$	$1,164 \pm 0,020$	$-1,0 \pm 1,0$	$1,182 \pm 0,008$	$-0,3 \pm 0,4$	$1,174 \pm 0,004$	$0,0 \pm 0,2$	$1,179 \pm 0,004$	$-0,2 \pm 0,2$
Fehler der Ordinate								
ganztägig:	8,75 $\mu$ Gal		3,18 $\mu$ Gal		2,35 $\mu$ Gal		1,38 $\mu$ Gal	
halbtägig:	3,00 $\mu$ Gal		1,66 $\mu$ Gal		1,18 $\mu$ Gal		0,66 $\mu$ Gal	

## Thema 5: Prüfwesen

### *Erste Arbeiten*

Zu den ersten Arbeiten im Zentralbureau der Europäische Gradmessung und im Geodätischen Institut gehörte es, sämtliche bei den zusammenzuschließenden Triangulationen verwendeten Maßstäbe mit der *Besselschen Toise*, die als Einheit zu verwenden war, zu vergleichen. In den Jahren 1866 und 1867 haben Baeyer, Albrecht und Sadebeck nachstehende *Maßvergleiche* auf dem Besselschen Komparator ausgeführt: Kopie No. 10 der Besselschen Toise mit Kopie No. 18, gefertigt für Nordamerikanische Regierung, Kopien No. 12 und 13, gefertigt für Brasilianische Regierung, und Italianische Toise von Spano.

Das Problem, das sich der *Ausdehnungskoeffizient* im Laufe der Zeit ändert, hat Baeyer aus Bestimmungen des Besselschen Basisapparates für Eisen- und Zinkstangen von 1834, 1846 und 1854 untersucht. Da sich die Ausdehnungskoeffizienten verringert hatten, sollte untersucht werden, ob die Alterung des Materials dafür verantwortlich sein kann. Ein Vergleich altrömischer Bronzestäbe mit neu angefertigten war dafür vorgesehen, wurde aber nicht gemacht. Ein anderes Problem, das erkannt wurde, betraf das Nachhinken der Temperatur der Messstangen gegenüber der Anzeige am Quecksilberthermometer.

In den Jahren 1907 bis 1910 baute die Firma O. Toepfer & Sohn, Potsdam nach einem Entwurf von Kühnen einen *Komparator für 4-m-Basismessstangen*. Dieser diente in den Jahren 1918 bis 1921 dazu, die Messstangen der österreichischen, des Besselschen und des Brunnerschen Basisapparates mit Normalmetern zu vergleichen. Im Ergebnis lag die erreichte Genauigkeit bei  $\pm 0,2 \times 10^{-6}$  bis  $\pm 0,8 \times 10^{-6}$ , wobei das Normalmeter ca.  $\pm 1 \times 10^{-6}$  genau ist. Danach wurde das Gerät nicht mehr benutzt, weil in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts fast nur noch *Invardrähte von 24 m Länge für Basismessungen* eingesetzt wurden.

1891 wurde eine *horizontale Basis von 240 m Länge*, geteilt durch Zwischenpunkte im Abstand von 80 m südlich des Potsdamer Hauptgebäudes angelegt. Die End-Festpunkte sollten solide gegründet sein. Außerdem hatte jeder in 1 m Abstand in Richtung der Basis einen zweiten Punkt, der extra gegründet ist und 1 m tiefer liegt. Diese Punkte waren mit Eisenplatten abgedeckt. Im August 1924 und im Januar 1926 wurde diese Basis je achtmal gemessen, um die Brunnerstange bei hohen und tiefen Temperaturen zu untersuchen. Es gab Unterschiede in den Teilstrecken, die von Veränderungen der Festpunkte und/oder ungenau bestimmten Ausdehnungskoeffizienten für die Temperaturintervalle herrührten.

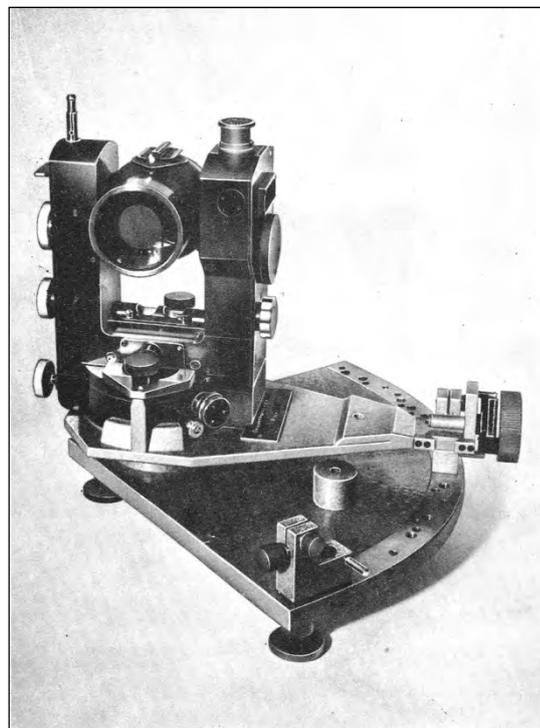
Um die 24 m langen Invardrähte für Basismessungen zu prüfen, haben Mühlig, Picht und G. Förster *erste Versuche* 1925 bis 1930 unternommen, um Lichtinterferenzen für Längenmessungen höchster Genauigkeit zu verwenden. 1937 bis 1943 wurden die Arbeiten von Mühlig und Ritter nach einem japanischen Prinzip fortgesetzt, konnten aber durch die Kriegs- und Nachkriegsereignisse nicht vollendet werden.

### *Entwicklungen nach 1945*

Am Geodätischen Institut Potsdam wurden die früheren Arbeiten weitergeführt. Diese betrafen zuerst Prüfungen von Kreisteilungen, Sekundenlibellen und Längenmessgeräten, ehe man sich aber ab 1970 auf die geodätischen Längenmessgeräte beschränkte.

Zur *Prüfung von Sekundenlibellen* hatte das Institut bis 1945 den großen Hildebrandschen Libellenprüfer gehabt. Dieser ließ es zu, Instrumente bis zu 20 kg aufzunehmen. Das dringende Bedürfnis nach einem neuen gleichwertigen Libellenprüfer lag vor. Deshalb wurde in der Institutswerkstatt ein Gerät nach W. Uhink gebaut, das mit aufgesetzten Trägerarmen die Untersuchung einer Hängelibelle oder mit einem Kasten gemeinsam zwei ungefasste Libellen erlaubt. Der *neue Libellenprüfer* erwies sich als vollwertiger Ersatz für den großen Hildebrandschen Libellenprüfer.

Für die *Prüfung von ungefassten Kreisteilungen* stand ein Kreisteilungsprüfgerät von Askania zur Verfügung. Speziell konnten Untersuchungen von Teilungen erfolgen, die sich auf einem Teilungsträger mit einem Durchmesser bis zu 500 mm aus Glas oder Metall befinden. Die Ergebnisse sind Strich- und Durchmesserfehler, wobei die Messunsicherheit ca.  $\pm 2 \times 10^{-6}$  beträgt. Um auch in Instrumente *eingebaute Kreisteilungen* prüfen zu können, wurde 1962 ein Anschlagprüfgerät gebaut (siehe Abbildung). Der Prüfvorgang läuft teilweise automatisch ab.



Zur *Prüfung von geodätischen Längenmessgeräten* konnten benutzt werden:

- die Internationale Standardbasis Potsdam
- ein Interferenzkomparator von 24 m Länge
- ein Teillängenkomparator bis 24 m Länge
- ein Dilatometer vom 24 m Länge und
- ein Longitudinalkomparator bis 2m Länge.

Die Tabelle auf der nächsten Seite gibt eine Zusammenstellung, welche Prüfmöglichkeiten bestanden und als Dienstleistung angeboten wurden.

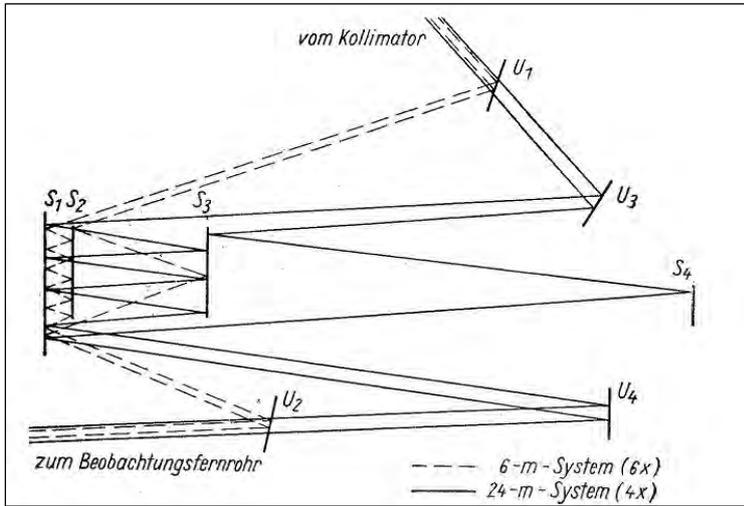
Längenmeßmittel	Länge (m)	Art der Prüfung	Meßunsicherheit (WECC-Norm)
EDM-Geräte	960	Prüfung durch den Interessenten	
Invarmeßdrähte	24	Gesamtlänge Längen-Temperatur-Koeffizienten	$u = 20\ \mu\text{m}$ $u_\alpha = 2 \times 10^{-8}\text{K}^{-1}$ $u_\beta = 1 \times 10^{-9}\text{K}^{-2}$
Invarmeßband	24	Gesamtlänge frei durchhängend, aufliegend Meterteilung aufliegend  Längen-Temperatur-Koeffizienten	$u = 20\ \mu\text{m}$ $u = 50\ \mu\text{m}$  $u_\alpha = 2 \times 10^{-8}\text{K}^{-1}$ $u_\beta = 1 \times 10^{-9}\text{K}^{-2}$
Strichmaßstab	1 2	Gesamtlänge	$u = 20\ \mu\text{m}$
Maßstab mit schneidens-förmigen Enden	1	Gesamtlänge	$u = 10\ \mu\text{m}$
Basislatte	2	Gesamtlänge Markenexzentrizität	$u = 20\ \mu\text{m}$ $u = 0,2\text{mm}$
Nivellierlatten mit Teilung auf Invarband	bis 3	jede Marke	$u = 5,5\ \mu\text{m} + 1,6 \times 10^{-6} \times l$

#### Internationale Standardbasis Potsdam

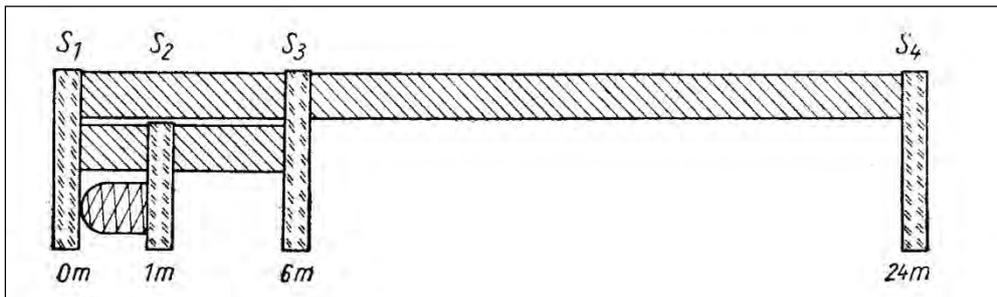
Da sich die 1891 im Institutsgelände angelegte 240-m-Basis für die Komparierung von geodätischen Längenmessmitteln z. B. Invardrähten von 24 m Länge unter Feldbedingungen als zu kurz erwies, wurde 1931 eine neue Grundlinie von 960 m Länge in einem Waldgebiet an der Michendorfer Chaussee am Rande von Potsdam angelegt. Ihre Basispunkte Anfang, Mitte und Ende sind unterirdisch und oberirdisch sicher vermarktet. Die Basislänge ist das 40fache von 24 m. Im Abstand von 24 m sind Messmarken auf Betonpfeilern in etwa 0,8m Höhe über Terrain stationiert. Nach dem Jäderinverfahren wurde die Basis mehrfach mit 24m-Invarmessdrähten gemessen, auch in internationaler Zusammenarbeit. 1964 wurde die nahezu horizontale Südhälfte mit dem finnischen Väisälä-Interferenzkomparator bestimmt. Damit wurde die Basis an den weltweit einheitlichen Maßstab angeschlossen, und sie wurde zu einer internationalen Standardbasis. Die etwas geneigte Nordhälfte haben Kühne und Rauhut mit einem eigens entwickelten Interferenzkomparator bestimmt und beide Hälften mit einem speziellen Interferenzverfahren miteinander verglichen.

#### Der 24-m-Interferenzkomparator

Das Messprinzip des Komparators besteht in der optischen Streckenmultiplikation unter Verwendung von Lichtinterferenzen, die durch Fraunhofersche Beugung am Doppelspalt erzeugt werden. Der 24-m-Interferenzkomparator stellt eine Modifikation des bekannten Väisälä-Interferenzkomparator dar. Die Abbildung zeigt den Strahlengang im 24-m-Interferenzkomparator. Hierbei sind:  $S_1, S_2, S_3$  und  $S_4$  - Distanzspiegel und  $U_1, U_2, U_3$  und  $U_4$  - Umlenkspiegel.



Ein Grundabstand von 1 m Länge, der mit einem Quarzetalon bestimmt wurde, wird in zwei Multiplikationsstufen auf 24 m vergrößert. In jeder Stufe werden die Weglängen zweier Lichtbündel miteinander verglichen. Dabei wird das eine in einem kleineren bekannten Streckenabschnitt mehrfach, aber das andere in dem größeren zu bestimmenden Streckenabschnitt nur einmal zur Reflexion gebracht wird. Aus der Abbildung ist die Anordnung des 1-m-Quarzetalons zwischen  $S_1$  und  $S_2$  und die Lage der beiden Multiplikationssysteme ersichtlich.



Der Komparator wurde in einem speziell für ihn errichteten Komparatorhaus an der Internationalen Standardbasis Potsdam aufgestellt. Seine Elemente sind auf einem Pfeiler, der unabhängig vom Gebäudefundament gegründet wurde, angeordnet. Die 24-m-Strecke lässt sich mit einer Unsicherheit von etwa  $8 \mu\text{m}$  reproduzieren. Die Länge eines Invarmessbandes kann mit einer Unsicherheit von  $20 \mu\text{m}$  bestimmt werden.

#### *Der Teillängenkomparator*

Zur Bestimmung der Lageabweichungen der Metermarken von Messbändern wurde ein einfacher optisch-mechanischer Komparator gebaut. Eine 25 m lange Invarstange ist auf 52 Kugellagern beweglich gelagert. Im Abstand von einem Meter sind Messmarken befestigt. Die Invarstange ist an einem Ende arretiert. Ein zu prüfendes 24 m-Invarmessband kann aufgelegt und gespannt werden. An jeder Metermarke kann durch Verschieben des Messbandes Koinzidenz eingestellt werden. Die kleinen Verschiebewege werden von einer Messuhr angezeigt und entsprechend ausgewertet. Die Unsicherheit der ermittelten Lageabweichungen beträgt  $50 \mu\text{m}$ .

#### *Das Dilatometer*

Für die Bestimmung der Längen-Temperaturkoeffizienten von Invarmessdrähten und -bändern wurde ein Dilatometer entwickelt und gebaut. In einem Temperaturbereich von 40 K werden die Werte für die Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Die Temperierung erfolgt wahlweise durch Erwärmung der den Prüfling umgebenden Luft in einem Rohrsystem oder direkt durch elektrischen Strom. Die Temperatur wird integrierend aus dem elektrischen Widerstand des Messobjektes abgeleitet. Die Längenänderung wird mit Spiralmikroskopen erfaßt. Die Unsicherheiten für die ermittelten Koeffizienten sind für den linearen Term  $\alpha$ :  $u_\alpha \leq 2 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  und für den quadratischen Term  $\beta$ :  $u_\beta \leq 1 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$

#### *Der Longitudinalkomparator*

Für geodätische Messmittel bis 2m Länge und Präzisionsnivellierlatten bis 3m Länge gibt es seit 1964 einen Longitudinalkomparator. Dieser Komparator wurde ständig weiterentwickelt und erfüllte die aktuellen Anforderungen der geodätischen Praxis. Er wurde in einem klimatisierten Kellerraum aufgestellt und gewährleistet bei hoher Temperaturkonstanz im Messraum geringe Messunsicherheiten. Er ist mit einem Sensor für automatische und mit mehreren Mikroskopen für visuelle Messungen ausgestattet. Für die Längenmessungen stehen ein inkrementales Auflichtlängenmesssystem und ein Lasermesssystem zur Verfügung. Ein Personalcomputer ist für die Erfassung, Auswertung, Dokumentation und Archivierung aller Messdaten angeschlossen. Mit diesem Komparator werden insbesondere geprüft:

- 2 m-Basislatten: Gesamtlänge und Markenexzentrizität
- Strichmaßstäbe bis 2 m Länge: Gesamtlänge und Fehler der Marken
- Maßverkörperungen mit schneidenförmigen Enden: Gesamtlänge
- Invarbandnivellierlatten bis 3m Länge: Fehler aller Marken.



