

Paper-ID: VGI_194806



Die Anfänge der relativen Schweremessung

Robert Norz ¹

¹ *Vermessungsamt in Schwaz*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen **36** (3–4), S. 61–70

1948

BibTEX:

```
@ARTICLE{Norz_VGI_194806,  
Title = {Die Anf{\a}nge der relativen Schweremessung},  
Author = {Norz, Robert},  
Journal = {{\u}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen},  
Pages = {61--70},  
Number = {3--4},  
Year = {1948},  
Volume = {36}  
}
```



Verkippt man etwa den rechten Projektor durch einen Winkel $d\omega_2$, so ist er wegen Gl. (18), (21) und (16 a) gleichzeitig damit durch den Winkel

$$d\alpha_2 = -\frac{h_1 - h_2}{b} d\omega_2$$

zu verkanten und außerdem durch die kleine Strecke

$$db_{y_2} = h d\omega_2 + \frac{b}{2} d\alpha_2 = h_2 d\omega_2$$

parallel zur y -Richtung zu verschieben. Zur Lösung der Hauptaufgabe sind nunmehr bloß geeignete Werte der drei Größen $d\omega_2$, $d\varphi_2$ und db_{z_2} auf optisch-mechanischem Wege zu ermitteln.

Zur erleichterten Ausführung der soeben geschilderten gekoppelten Bündelbewegungen kann man schließlich die bisher verwendeten Orientierungsmaschinen zusätzlich mit geeigneten, unseren Bedingungsgleichungen entsprechenden Mechanismen ausstatten, die jeweils nach Bedarf, d. h. während der bezeichneten Endphase des Orientierens in Funktion zu setzen wären. Beispielsweise würde beim Winkelverfahren für den meistens vorliegenden Fall der Anwendbarkeit von Gl. (19) ein einfaches Zahnradgetriebe einzubauen sein, um die gleichzeitige Verkantung beider Projektoren um jeweils gleiche Winkel zu gewährleisten. Ebenso lassen sich leicht weitere Mechanismen ausfindig machen, mit deren Hilfe auch die übrigen Bedingungsgleichungen je nach Bedarf (mit ausreichender Genauigkeit) automatisch erfüllt sind.

Es erübrigt sich sodann noch die Aufstellung von Orientierungsverfahren nach dem Vorbild der bisher üblichen, die alle auf *Otto v. Grubers* Prinzipien zurückgehen. Während jedoch darin im wesentlichen immer fünf verschiedene Grundoperationen zu einem Orientierungsverfahren zusammengefaßt waren, sind bei den neu zu entwickelnden Verfahren für die Endphase des Einpassens bloß drei (voneinander unabhängige) Grundoperationen in geeigneter Weise aneinanderzureihen.

Die Anfänge der relativen Schweremessung

Von Vermessungsrat Dr. Robert N o r z, Leiter des Vermessungsamtes in Schwaz

(Veröffentlichung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen)

Am 1. März 1947 waren es 60 Jahre, seit der erste Pendelapparat zur Durchführung relativer Schweremessungen fertiggestellt und in Verwendung genommen wurde. Da dieser Apparat in Wien konstruiert und ausgeführt worden war, die relative Schweremessung von hier ihren Ausgang nahm und der Pfeiler im Pendelkeller des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen

durch Jahrzehnte der Fundamentalpunkt aller Schweremessungen auf der Erde war, verdient dieser Gedenktag jedenfalls, durch eine kurze Rückschau festgehalten zu werden.

Die Bestimmung der Erdschwere, deren Kenntnis für viele Zwecke der Erdmessung unerlässlich ist, beschäftigte schon seit dem 17. Jahrhundert die Fachgelehrten. Zum ersten Male dürfte die Verschiedenheit der Schwere auf der Erde von R i c h e r festgestellt worden sein. Er reiste im Jahre 1672 von Paris (50° n. Br.) nach Cajenne (5° n. Br.) zur Beobachtung des Mars, um durch Verbindung seiner Messungen mit gleichzeitig in Europa durchgeführten einen Wert für die Sonnenparallaxe zu erhalten. Dabei machte er die überraschende Feststellung, daß seine Sekundenpendeluhr, welche in Paris richtig ging, auf dem neuen Standort um ca. 2 Minuten pro Tag zurückblieb und erst nach Verkürzung des Pendels um $1\frac{1}{4}$ Linien (3 mm) wieder auf ihren alten Gang zu bringen war. Bei seiner Rückkehr nach Paris machte er die genau entgegengesetzte Beobachtung. Durch die Verschiedenheit der Temperatur an beiden Beobachtungsorten war dieser Unterschied nicht zu erklären und schon H u y g e n s und N e w t o n wiesen darauf hin, daß diese Erscheinung auf die Abweichung der Erde von der Kugelgestalt zurückzuführen sei.

Unter den Männern, die sich in der Folgezeit mit dieser Frage beschäftigten, zeichnete sich vor allem B o u g u i e r aus. Er erkannte den Wert der Schweremessungen und führte anlässlich der französischen Gradmessungsexpedition in Peru im Jahre 1735/36 Pendelmessungen aus. Dabei bediente er sich der Methode der unveränderlichen Pendel und gab damit den Weg an, auf einfache und verlässliche Weise die Schwereunterschiede gegenüber einer Hauptstation und hiemit, falls an dieser Stelle der Wert der Schwerebeschleunigung bekannt ist, auf allen Beobachtungspunkten den absoluten Wert der Schwere zu bestimmen.

Natürlich waren diese Apparate noch recht unvollkommen und die folgende Zeit konzentrierte ihr Interesse vor allem darauf, die Instrumente zur Bestimmung des absoluten Wertes der Schwere zu verbessern. Einen gewissen Abschluß erlangten diese Arbeiten durch B e s s e l s Studie „Untersuchung über die Länge des einfachen Sekundenpendels“ 1826.

Aber nicht nur das Fadenpendel suchte man für die Bestimmung der Schwere dienlich zu machen; man bemühte sich auch, das Reversionspendel zu einem für diesen Zweck geeigneten Instrumente auszugestalten. Schon H u y g e n s waren die Beziehungen zwischen Drehachse und Schwingungsachse bekannt und in J. B o h n e n b e r g e r s Lehrbuch der Astronomie (1811) finden sich folgende Ausführungen: „Fällt der Schwerpunkt eines Körpers in die Ebene zweier zu einander paralleler Schwingungsachsen, die aber ungleich von ihm abstehen, und sind die Schwingungen des Körpers um diese Achsen von gleicher Dauer, so ist die Länge des korrespondierenden einfachen Pendels gleich dem Abstände der Schwingungsachsen. Demnach kann man die Länge des einfachen Pendels mit einem gegebenen zusammengesetzten, seine Schwingungen in gleicher Zeit vollbringenden, durch Versuche bestimmen.“

Unabhängig von B o h n e n b e r g e r konstruierte der Engländer H. K a t e r ein Pendel, das auf denselben Prinzipien aufgebaut war. Es dürfte

vielen Lesern unbekannt sein, daß das Bundesamt ein solch altes K a t e r'sches Pendel besitzt und im Instrumentensaale ausgestellt hat.

Als vor ca. 80 Jahren sich einige Staaten zur „Mittleuropäischen Gradmessung“ zusammenschlossen, erkannte man auch die Notwendigkeit zur Anfertigung von modernen und mit allen Errungenschaften ihrer Zeit ausgestatteten Pendelapparaten. Sie sollten auf dem Prinzip des Reversionspendels beruhen. Mit der Durchführung dieser Arbeit wurde die Hamburger Firma J. R e p s o l d betraut und in den meisten der später für die Ableitung der Schwere auf der Erde in Betracht kommenden Fundamentalstationen bestimmte man den Wert der Schwerebeschleunigung mit dem R e p s o l d'schen Pendelapparat. Auch die österreichische Gradmessungskommission erwarb einen solchen Pendelapparat und ließ damit in den Jahren 1874–76 durch ihren Observator F. A n t o n auf den Stationen Pfänder bei Bregenz, Prag, Kremsmünster, Lemberg, Czernowitz, Pola, Ragusa, Krakau und Berlin Schweremessungen durchführen. Schließlich bestimmte v. O p p o l z e r im Frühjahr 1884, nachdem er in zwei Jahren die vorbereitenden Messungen abgeschlossen hatte, den absoluten Wert der Schwerkraftsbeschleunigung auf einem Pfeiler der Wiener Universitätssternwarte, der sich im Keller unter dem Nordsaale dieses Institutes befindet. Der von v. O p p o l z e r bestimmte Schwerewert für die Wiener Universitätssternwarte galt als der gesichertste seiner Zeit.

Als H e l m e r t im Jahre 1884 eine Formel für die Normalschwere im Meeresniveau ableitete, standen ihm nur 122 Schwerewerte zur Verfügung, deren Bestimmungen aus sehr verschiedenen Zeitepochen stammten und einen recht ungleichmäßigen Genauigkeitsgrad aufwiesen.

In dieser Zeit befaßte sich der damalige Hauptmann Robert v. S t e r n e c k des Militärgeographischen Institutes in Wien mit der Konstruktion eines Apparates zur leichteren Ermittlung von Schwerewerten.

Die bisherigen Methoden bestanden, abgesehen von einigen Versuchen B o u g u e r s, darin, das Schwerependel auf eine gewünschte Schwingungsdauer (meist eine Sekunde) abzustimmen und die Länge des mathematischen Pendels zu finden, welche der beobachteten Schwingungsdauer entsprach. Mithin war die Genauigkeit der Schwerebestimmung im wesentlichen davon abhängig, mit welcher Sicherheit die Ermittlung der Schwingungsdauer des Pendels und der Längenmessung erfolgte. Da sich der Uhrgang durch fortgesetzte Zeitbestimmungen sehr genau ermitteln ließ, fiel seine Unsicherheit nicht so sehr ins Gewicht. Bei der Längenmessung waren die Verhältnisse viel ungünstiger und O p p o l z e r nahm an, daß er die Länge des Sekundenpendels bis auf ungefähr 0'01 mm richtig erhalten habe. Hierbei ist zu bemerken, daß einer Änderung der Pendellänge um 0'01 mm eine Änderung der Schwingungsdauer des Sekundenpendels um 54 Einheiten der 7. Dezimale der Sekunde entspricht.

Um nun diese bei der absoluten Schweremessung unvermeidbaren Längenmessungen auszuschalten, benützte S t e r n e c k ein unveränderliches (invariables) Pendel. Dieses mußte also auf der gleichen Station bei konstanten äußeren Verhältnissen (Temperatur, Luftdruck usw.) eine konstante Schwin-

gungsdauer aufweisen. Die Invariabilität des Pendels konnte somit durch Wiederholung der Bestimmung seiner Schwingungsdauer auf derselben Station überprüft werden. Eine Änderung der Schwere auf den Feldstationen äußerte sich in einer Änderung der Schwingungsdauer des Pendels, welche nun mit aller Schärfe erfaßt werden mußte, und die Aufgabe, die früher in der Bestimmung der reduzierten Pendellänge und der Schwingungsdauer bestand, verlangte jetzt nur mehr die Bestimmung der letzteren.

Nach dreijährigen Versuchsbeobachtungen glaubte S t e r n e c k den Apparat so weit vervollkommen zu haben, um damit ein praktisches Beispiel erfolgreich durchführen zu können.

Der Pendelapparat zeigte in seinen Elementen schon dieselbe Form, wie wir sie später beim Einpendel-Standapparat verwirklicht sehen. Die Platte, auf der das Pendel aufruhte, war aus Glas gefertigt. Das Pendel (S t e r n e c k arbeitete im Jahre 1882 nur mit einem Pendel) hatte eine Schwingungsdauer von etwas mehr als einer halben Sekunde. Die Pendelschneiden aus hartem Stahl waren 2 *mm* lang.

Damals gab es noch nicht den heute üblichen Koinzidenzapparat. Zur Beobachtung der Schwingungen stellte man eine transportable Uhr mit Halbskundenpendel ca. 30 *cm* vor dem Pendel des Schweremessers so auf, daß die Schwingungsebenen beider Pendel parallel waren. Die Pendellinse hatte an ihrem untersten Teile einen Schlitz von 2 *cm* Länge und $1\frac{1}{2}$ *mm* Breite. In der vorderen Wand des Uhrgehäuses befand sich ebenfalls ein solcher Spalt. Vor der Uhr wurde ein kleines Fernrohr mit 7 Vertikalfäden derart postiert, daß der Mittelfaden des Fadenkreuzes, der Spalt im Gehäuse und im Pendel der Beobachtungsuhr und die Spitze des Schwerependels in einer Geraden waren. Der Hintergrund war durch ein beleuchtetes Beinglas aufgehell. Über die Beobachtung der Schwingungsdauer schreibt S t e r n e c k: „Wird nun die Uhr in Gang gesetzt, so ist das Gesichtsfeld des Fernrohres im allgemeinen dunkel, da die Uhrpendellinie den Schlitz im Uhrgehäuse verdeckt. Nur wenn das Uhrpendel durch die Vertikale schwingt, sieht man es auf einen kurzen Moment erleuchtet, infolge dessen auch die Fäden und die Spitze des schwingenden Pendels, u. zw. scheinbar ruhend, weil das Bild nur innerhalb eines sehr kleinen Zeitraumes von kaum einer Zehntelsekunde sichtbar ist. Bei jedem Durchgange des Uhrpendels durch die Vertikale sieht man ein solches Aufleuchten, und da die Schwingungszeiten beider Pendel verschieden sind, erscheint bei jedesmaligem Aufleuchten die Spitze auf dem Fadennetze etwas verrückt. Bei jedem Hingange des Pendels erscheint das Bild auf der einen, bei jedem Rückgange auf der anderen Seite des Mittelfadens und es nähern sich diese Bilder einander in dem Maße, als sich die beiden Pendel dem Momente nähern, wo sie unter sich genau entgegenschwingen. Tritt dieser Moment ein, so decken sich beide Bilder auf dem Mittelfaden und entfernen sich bei jeder nun folgenden Schwingung wieder in entgegengesetzter Richtung so lange, bis das Pendel im Moment des Durchganges des Uhrpendels durch die Vertikale sich in der größten Amplitude befindet; von da an nähern sich wieder die Bilder, bis die beiden Pendel unter

sich in gleicher Richtung schwingen, wo dann die zweite Begegnung der Bilder am Mittelfaden stattfindet.

Diese Momente der Begegnung der Bilder oder Koinzidenzen lassen sich leicht bis auf Bruchteile einer Sekunde auffassen und werden nach Angabe der Uhr notiert. Es ist klar, daß das Pendel, welches etwas langsamer schwingt als das Uhrpendel, in der Zeit von einer Deckung der Bilder bis zur anderen, also nach jeder Koinzidenz, um eine Schwingung weniger ausführt als das Uhrpendel, dessen Schwingungszahl die Zeiger am Zifferblatt angeben. Es erscheint sonach die Anzahl seiner Schwingungen abgezählt und man kann mittelst des bekannten Ganges der Uhr die Dauer einer Pendelschwingung ermitteln.“

Man ersieht daraus, daß die Bestimmung der Schwingungsdauer des Pendels durchaus nicht leicht war und ein beträchtliches Maß von Geschicklichkeit erforderte.

Es sollte nun durch Messungen entlang eines tiefen Schachtes die Änderung der Schwere ermittelt werden und daraus durch Extrapolation ein Gesetz für die Schwere- und Dichteverteilung im Erdinnern abgeleitet werden. *S t e r n e c k* wählte für diesen Zweck den 1000 *m* tiefen *St. Adalbert-Schacht* des *Pfibramer Silberbergwerkes*. In der Nähe des *Tagkranzes*, in einem Stollen 500 *m* unter Tage und am Ende des Schachtes wurden Observatorien eingerichtet.

Die Beobachtungen erfolgten im Februar des Jahres 1882. Die Ergebnisse dieser Messungen waren so ermutigend, daß *S t e r n e c k* beschloß, die Arbeit nächstens mit einer dichten Zahl von Stationen zu wiederholen und überhaupt auf zahlreichen Punkten der Erdoberfläche Schweremessungen durchzuführen.

Im folgenden Jahre bot sich hiezu mehrmals Gelegenheit. Inzwischen gab *S t e r n e c k* seiner instrumentalen Einrichtung einige Verbesserungen und Erweiterungen. Diese betrafen die Anschaffung eines zweiten Pendelapparates, der mit dem ersten konform gebaut war. Als Verbesserung wäre zu erwähnen, daß das Beinglas eine Strichteilung erhielt. Sein Instrumentarium vermehrte er weiters um ein zweites Pendel, das aus Tombak verfertigt war, sich äußerlich aber vom Pendel I, das aus Messing hergestellt war, nicht unterschied. Die Aufnahme der Koinzidenzen, die bei den Beobachtungen im *St. Adalbert-Schachte* noch recht mühselig war, wurde wesentlich erleichtert. Hiezu baute er das Betrachtungsfernrohr um. Im Brennpunkte des Objektivs wurde eine Platte mit einem horizontal liegenden rechteckigen Ausschnitte eingesetzt, so daß das Gesichtsfeld durch diesen Rahmen begrenzt war. Unmittelbar vor der Platte bekam das Fernrohr einen seine halbe Peripherie umfassenden Einschnitt, durch das der Arm eines Hebels eingeführt werden konnte, der kleine Bewegungen nach auf- und abwärts gestattete. Dieser Hebelarm trug an seinem Ende ein Plättchen, das mit einem gleich großen rechteckigen Ausschnitt versehen war. Bei Deckung beider Rahmen gestatteten sie einen Blick auf die Skala und die Spitze des Pendels im Gesichtsfelde.

Befand sich der Hebel oben, so verdeckte das von ihm gehaltene Plättchen drei Viertel des Gesichtsfeldes und es war lediglich die Skala sichtbar. War

dagegen der Hebel nach unten gedrückt, dann blieb das Gesichtsfeld völlig verdunkelt. Die weitere Einrichtung läßt sich nun leicht ergänzen. Die Beobachtungsuhr, diesmal eine Sekundenpendeluhr, war so eingerichtet, daß sie alle zwei Sekunden einen elektrischen Strom betätigte. Dieser Strom wurde zu den Spulen eines Elektromagneten geleitet, der sich unmittelbar unter dem beweglichen Hebel befand. Blieben die Spulen stromfrei, der Hebel durch eine Feder nach oben gedrückt, dann konnte durch das Fernrohr lediglich die Skala betrachtet werden, während die Pendelspitze verdeckt war. Im Moment des Stromschlusses wurde der Anker angezogen und gab für einen Augenblick, beim Zusammenfallen der beiden Ausschnitte, das Gesichtsfeld frei. Unmittelbar danach war das Gesichtsfeld durch den herabgezogenen Anker verdunkelt. Für die kurze Zeit der Betrachtung schien das Pendel in Ruhe und rückte alle 2 Sekunden ein wenig gegen den O-Strich, bzw. entfernte sich von ihm. Es konnten damit nach einem analogen Verfahren wie bei der Einrichtung des Jahres 1882 die Koinzidenzen bestimmt werden. Jedenfalls bot diese Modifikation die Möglichkeit, zwei oder mehrere Koinzidenzapparate, die an verschiedenen Stationen aufgestellt sein konnten, durch eine Uhr gleichzeitig zu betätigen, ein Verfahren, das erst in jüngster Zeit durch E. Berger u. a. unter Zuhilfenahme eines Radiosenders wieder häufiger in Anwendung kam *).

Sternerck blieb bei dieser Konstruktion nicht lange. Schon im Jahre 1883 baute er den noch gegenwärtig in Verwendung stehenden Koinzidenzapparat zur Vornahme relativer Schweremessungen, womit die Entwicklung dieses Gerätes in ihren Grundzügen abgeschlossen war. Das Versuchsmodell zu diesem Koinzidenzapparat befindet sich in der Instrumentensammlung der wissenschaftlichen Abteilung des Bundesamtes. Es macht äußerlich als schmuckloses, geschwärztes Holzkistchen einen unscheinbaren Eindruck und der Laie würde wohl nicht vermuten, welche Bedeutung diesem Apparate zukam.

Im gleichen Jahre war er mit den Zeichnungen für einen neuen Pendelapparat fertig, von dem wir nicht wissen, wie er aussehen sollte. Es ist nur bekannt, daß der Mechaniker für die Herstellung 500—600 Gulden veranschlagte und wegen dieser hohen Kosten seine Ausführung nicht zustande kam.

Zwei Jahre später, im Dezember 1885, sprach nun die österreichische Gradmessungskommission, im Hinblick auf die großen Erfolge Sternercks bei der Untersuchung der Erdschwere, den Wunsch aus, es möchten nach seinen Plänen Pendelapparate konstruiert und damit auf möglichst zahlreichen Punkten der Erdoberfläche Schweremessungen durchgeführt werden. Die beiden ersten Pendelapparate mit den zugehörigen Pendeln wurden von der Firma Ernst Schneider in Währing bei Wien (jetzt Wien, VI., Stumpergasse) hergestellt und am 1. März 1887 fertig übergeben. Die Beschreibung des Apparates kann mit Rücksicht darauf, daß er allgemein bekannt ist, übergangen werden.

Damit war die Vorbereitungszeit abgeschlossen, welche die große Epoche der relativen Schweremessungen einleitete. Es sei hier nur kurz erinnert an die

*) Gerl. Beitr. Geophys. 21 (1929) 355—365.

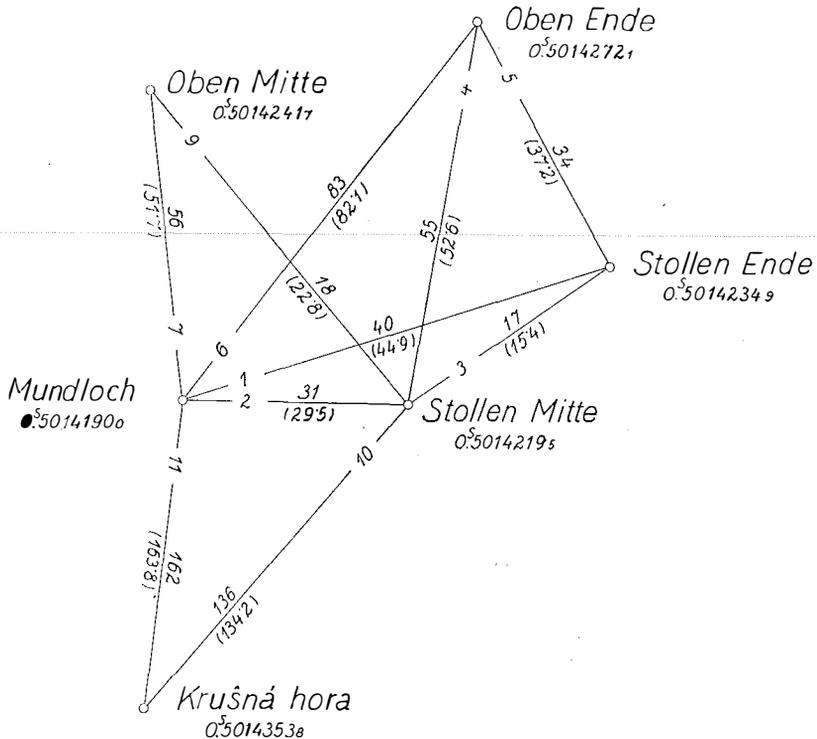
nun folgende Untersuchung über die Schwere in den Alpen, an die Übertragung der Schwere von Wien nach zahlreichen Fundamentalstationen des Auslandes, an die flächenartige Untersuchung großer Gebietsteile der Monarchie und an die ausgedehnten Pendelmessungen der österreichischen Kriegsmarine auf allen Kontinenten. Dem Beispiele S t e r n e c k s folgten bald die anderen Staaten und bis zum Jahre 1900 waren bereits 1400 Stationen fast ausschließlich nach seiner Methode beobachtet worden.

Das Bild dieser Entwicklung wäre aber unvollständig, wollte man sich nicht auch der Methode erinnern, deren sich S t e r n e c k bei der Erprobung seines Modelles bediente. Man würde geneigt sein anzunehmen, daß er sich zunächst damit begnügte, Schwereunterschiede dort messend nachzuweisen, wo es sich um große Beträge handelte, damit er nicht Gefahr laufe, durch die Ungenauigkeit, die ja Erstlingskonstruktionen meistens anhaftet, die beobachteten Größen stark zu verfälschen. Dem war aber durchaus nicht so. Er stellte sich mit der Erforschung der Schwere im St. Adalbert-Schachte des Pöfberger Silberbergwerkes eine Aufgabe, die auch einem Beobachter unserer Tage Ehre machen würde, und man muß sich über den Mut wundern, mit dem er sich an die Lösung dieser Aufgabe und auch noch vieler anderer wagte. Während man später und auch gegenwärtig mehr auf die Erforschung der Großformen der Schwereverteilung Bedacht nimmt, behandelte er in der ersten Zeit die Schwereverteilung gerade auf kleinen Gebieten. Oft waren die Stationen nur wenige hundert Meter von einander entfernt und es mußte von vornherein angenommen werden, daß es sich bei den Beobachtungen nur um kleine Schwereunterschiede handeln könne, die mit dem Reversionspendel überhaupt nicht bemerkt worden wären.

Ebenso rasch, wie S t e r n e c k den konstruktiven Teil seiner Apparate ausbaute, entwickelte er auch die geeignete Meßmethode. Nach Abschluß der Wiederholung seiner Untersuchungen über das Verhalten der Schwere im St. Adalbert-Schachte anfangs Februar 1883 übersiedelte er nach Krušna hora, um dort an einem geeigneten Objekte seine Arbeiten fortsetzen zu können. Für diese Messungen standen ihm nur 6 Tage zur Verfügung. Er konnte sie aber in den Monaten November und Dezember d. J. mit verbesserten Instrumenten wiederholen. Am Beispiel der Beobachtungen in Krušna hora soll nun die Sternecksche Meßmethode erörtert werden.

Es war beabsichtigt festzustellen, welchen Einfluß Erdschichten von bekannter Mächtigkeit auf die Änderung der Schwere ausüben. Für diesen Zweck schien der 1000 *m* lange, horizontale Franciszi-Erbstollen des Eisenbergwerkes Krušna hora bei Beraun in Nordböhmen besonders geeignet. Geologisch war das Gebiet, in dem sich ausgedehnte Bergwerksanlagen befinden, gut durchforscht, das Terrain in der Umgebung des Stollens sanft geböschet und regelmäßig, so daß für die Ermittlung der topographischen Reduktion keine Schwierigkeiten zu erwarten waren. Schwerestationen wurden nunmehr eingerichtet beim Stolleneingang (Mundloch), Stollenmitte und Stollenende, weiters an denjenigen Punkten am Berghange, die sich oberhalb der Stationen im Stollen befanden. Schließlich wurde auch noch auf der höchsten Kuppe des Berges, dem

Krušna hora, eine Pendelstation errichtet. Alle Stationen waren durch telegraphische Leitungen untereinander in Verbindung gebracht, so daß die Sekundenschläge der in der Zentrale verbliebenen Pendeluhr nach allen Observatorien geleitet werden konnten. Die Messungen wurden von zwei Beobachtern (v. Stern eck und Edgar R e h m) ausgeführt, u. zw. so, daß jeder Beobachter stets mit seinem Pendel und den dazugehörigen Apparaten arbeitete. Pendel und Apparat I bediente Egar R e h m, das Aggregat II hatte v. S t e r n e c k.



Die Ermittlung des hinreichend genauen Uhrganges bereitete damals außerordentliche Schwierigkeiten. Zu seiner Kenntnis blieb man allein auf die Zeitbestimmungen angewiesen, die viel Zeit in Anspruch nahmen, auch nicht immer möglich waren und bei bewölktem Himmel oft durch lange Zeit überhaupt nicht gelangen. Wollte man die gewünschten genauen Resultate erzielen, dann mußte eine Methode ausfindig gemacht werden, durch welche man vom Uhrgange möglichst unabhängig war. Dies gelang durch gleichzeitige Beobachtung der Pendelschwingungen auf zwei Stationen, wobei beide Koinzidenzapparate von der Uhr in der Zentrale durch die alle 2 Sekunden erfolgenden Stromschlüsse betrieben wurden, ein Verfahren, das, wie oben bemerkt wurde, in letzter Zeit wieder häufiger in Anwendung kam. Zur Kontrolle erfolgte auf jeder Station der Instrumentenwechsel; hatte beispielsweise am Vormittag Pendel I auf der Station Mundloch und Pendel II in Stollen-Mitte geschwungen, so arbeitete am Nachmittag Pendel II bei Mundloch und gleichzeitig Pendel I in Stollen-Mitte. In der Tabelle I ist ein Ausschnitt aus der Zusammenstellung der Schwingungsbeobachtungen wiedergegeben. Für die Stationen Mundloch,

Stollen-Mitte, Stollen-Ende, Oben Mitte, Oben Ende und Krušna hora sind dabei die Abkürzungen M, StM, StE, OM, OE und K eingeführt worden.

T a b e l l e I.

| Nr. | Datum | | Pendel | Station | Schwingungsdauer ohne Berücksichtigung der Änderung des Uhganges |
|-----|---------------|-----------|--------|---------|--|
| | November 1883 | Tageszeit | | | |
| 1 | 20. | V | I | StE | 0.501 48 79 |
| 2 | | | II | M | 40 52 |
| 3 | | N | I | M | 47 78 |
| 4 | 21. | V | II | StE | 40 26 |
| 5 | | | I | M | 48 27 |
| 6 | | II | StM | 40 59 | |
| 7 | 22. | N | I | StM | 48 37 |
| 8 | | | II | M | 39 99 |
| 9 | | V | I | StM | 48 15 |
| 10 | 23. | V | II | StE | 39 96 |
| 11 | | | I | StE | 48 25 |
| 12 | | N | II | StM | 39 72 |
| 13 | 23. | V | I | OE | 47 59 |
| 14 | | | II | StM | 39 42 |
| 15 | | N | I | StM | 47 28 |
| 16 | | | II | OE | 40 21 |

Die weitere Auswertung geschah in der Weise, daß man die Messungen paarweise vereinigte, d. h. es wurde der Mittelwert der Schwingungsdauern der Pendel I und II für jede Station gebildet und mit dem entsprechenden Mittelwert der Schwingungsdauer auf der anderen Station verglichen.

In der Tabelle II sind einige dieser Wertepaare ausgewiesen.

T a b e l l e II.

| Station | Nummern der vereinigten Beobachtungen | Schwingungsdauer des mittl. Pendels | Station | Nummern der vereinigten Beobachtungen | Schwingungsdauer des mittl. Pendels | Gesuchter Unterschied der Schwingungszeiten |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| StE | 1,4 | 0.501 44 53 | M | 2,3 | 0.501 44 12 | 0.000 00 41 |
| M | 5,8 | 44 13 | StM | 6,7 | 44 48 | 35 |
| StM | 9,12 | 43 94 | StE | 10,11 | 44 11 | 17 |
| OE | 13,16 | 43 90 | StM | 14,15 | 43 35 | 55 |

Im Frühjahr hatte v. S t e r n e c k für die Verbindung Mundloch—Stollen Ende den Wert 39 Einheiten der 7. Dezimale gefunden.

In die weitere Rechnung wurde mit dem Mittelwert, nämlich 40 Einheiten der 7. Dezimale eingegangen.

Der Schwereunterschied wurde nun nicht nur vom Ausgangspunkte (Mundloch) nach allen Stationen übertragen, sondern erfolgte nach Art der Beobachtungen in allen Kombinationen, wobei allerdings, um die Arbeit nicht zu weit auszudehnen, eine gewisse Beschränkung eingehalten werden mußte. Insgesamt wurden 10 Verbindungen ausgewählt, die in der Abbildung ersichtlich

gemacht sind. Auf diese Weise ergab sich eine sehr wertvolle Kontrollmöglichkeit, die in einem Ausgleiche verwertet wurde.

Bezeichnet man mit 1 die Verbindung Mundloch—Stollen Ende, mit 2 die Verbindung Mundloch—Stollen Mitte usw. und sollen (1), (2) ... die den erwähnten Verbindungen zukommenden Verbesserungen, ausgedrückt in Einheiten der 7. Dezimale der Sekunde bedeuten, so ergeben sich die Bedingungen

$$\begin{aligned} 1 &= 2 + 3 \\ 4 &= 3 + 5 \\ 6 &= 2 + 4 \\ 7 &= 2 + 9 \\ 8 &= 2 + 10 \end{aligned}$$

Daraus resultieren die folgenden Bedingungsgleichungen mit den links stehenden Widersprüchen:

$$\begin{aligned} -8 &= -(1) + (2) + (3) \\ +4 &= + (3) - (4) - (6) \\ -3 &= + (2) + (4) - (6) \\ +7 &= + (2) - (7) + (9) \\ -5 &= + (2) + (10) - (8) \end{aligned}$$

welche nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen als wahrscheinlichste Verbesserungen für die Unterschiede der Schwingungszeiten in Einheiten der 7. Dezimale der Sekunde ausweisen:

$$\begin{aligned} (1) &= + 4.9 & (6) &= - 0.9 \\ (2) &= - 1.5 & (7) &= - 4.3 \\ (3) &= - 1.6 & (8) &= + 1.8 \\ (4) &= - 2.4 & (9) &= + 4.3 \\ (5) &= + 3.2 & (10) &= - 1.8 \end{aligned}$$

In der Abbildung sind die beobachteten Änderungen der Schwingungszeiten des mittleren Pendels eingetragen und in Klammern die entsprechenden ausgeglichenen Werte eingesetzt.

Schließlich ist der jeder Station zukommende Schwingungswert unter ihrem Namen angeschrieben.

Wenn man bedenkt, daß die geschilderte Messung, die nur 14 Tage in Anspruch nahm, im Jahre 1883 mit Versuchsmodellen durchgeführt wurde, muß man den erreichten Genauigkeitsgrad sehr anerkennen. Sicherlich war das hohe Maß von Präzision nicht allein der Qualität der Instrumente, sondern in gleicher Weise auch der Wahl des Verfahrens zuzuschreiben.

In späteren Jahren wurden die Apparate und Methoden zur Bestimmung der relativen Schwere durch zahlreiche Arbeiten bedeutender Fachmänner verbessert. Es würde den Rahmen dieser Abhandlung überschreiten, wollte man diese Verbesserungen auch nur aufzählend erwähnen. Aber trotz des Fortschrittes eines halben Jahrhunderts haben die ersten Versuchsmessungen Sternecks auch für unsere Tage noch Interesse und bestehen nicht nur als solche von historischem Wert.