

Schweremessung – ein Überblick



Norbert Eller

Was ist Schwere – „Erdanziehungskraft“, „Erdbeschleunigung“

Physikalisch gesehen ist die Schwere die Eigenschaft eines Massekörpers (m_1), deren schwere Masse m_S^1 von einem weiteren Massekörper (m_2) durch die Kraft F_{grav} gemäß dem Newtonschen Gravitationsgesetz:

$$F_{\text{grav}} = a m_1 m_2 / r^2$$

quantitativ angezogen wird.

a ist die Gravitationskonstante, eine Naturkonstante mit dem Wert $a \approx 6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$, m_1 und m_2 sind die Massen der beiden Massekörper, und r ist der zwischen beiden bestehende Abstand.

Bezogen auf das Erdschwerefeld spricht man von der Erdanziehungskraft, die messtechnisch als Gewichtskraft eines Körpers auftritt; sie ist abhängig von dessen Masse (m) und der Stärke des jeweiligen Schwerefeldes ($a M/r^2$):

$$F_{\text{grav}} = a m M / r^2 = m G \quad [\text{kg m/s}^2]$$

M ist die Erdmasse; und die internationale Einheit für Kraft ist Gewicht mal Weg dividiert durch Zeit im Quadrat.

¹ die schwere Masse m_S ist ursächlich für die gegenseitige Anziehung von Massekörpern, wie sie sich aus dem Gravitationsgesetz ableitet

Um im Erdschwerefeld zu einer masseunabhängigen Definition zu kommen, bildet man den Quotienten aus Kraft und Masse und erhält die Beschleunigung eines freibeweglichen Körpers in einem Kraftfeld. In der Gravimetrie geht man damit von dem Begriff Schwerkraft über zu dem der Schwerebeschleunigung:

$$G = aM/r^2$$

Auf der Oberfläche oder im Innern eines Himmelskörpers (wie unsere Erde) ergibt sich als Resultierende aus Schwere- (G) und Zentrifugalbeschleunigung (Z), die infolge der Drehbewegung eines Himmelskörpers um die eigene Achse auftritt, die Fallbeschleunigung:

$$g = G + Z$$

Die Fallbeschleunigung bezogen auf die Erde nennt man Erdbeschleunigung; sie verringert sich mit wachsendem Abstand von der Erdoberfläche, genauso wie sie wegen der Abplattung der Erde vom Äquator in Richtung der Pole zunimmt.

In der Geophysik versteht man unter Fallbeschleunigung oder - genauer - deren Betrag auch die (natürliche) Schwere.

Infolge der inhomogenen Masseverteilung und -dichte im Erdinneren variiert die Schwere je nach Region.

Ihre Abweichung von einem nach einer internationalen Schwereformel berechneten Wert nennt man Schwereanomalie. Dieser als Normalschwere bezeichnete Wert bezieht sich auf ein mittleres Erdellipsoid und ist nur von der geographischen Breite abhängig.

Maßeinheiten für Schwere

Aus der SI-Einheit² für Kraft, das ist Newton (N), können wir die Maßeinheit für die Schwere anhand der „Dynamisches Grundgesetz“ genannten Gleichung:

$$F = mg$$

ableiten.

² SI steht für Le Système international d`unités; auf deutsch: Internationales Einheitensystem

Ein Newton ist die Kraft, die der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt.
Folglich ist:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$$

Mit obigem Quotienten aus Kraft und Masse ergibt sich die Einheit für die Schwere zu:

$$1 \text{ m/s}^2 \quad (\text{wie oben schon angegeben})$$

International verwendet man in der Schwermessung zumeist die Maßeinheit Gal, zu Ehren von Galileo Galilei: $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$. Gal wird meist in der Größenordnung mGal verwendet, das sind: 10^{-5} m/s^2 .

Die bei Schwermessungen zum Einsatz kommenden Messgeräte, sogenannte Gravimeter, haben eine Ablesegenauigkeit von wenigen 10^{-8} m/s^2 , das sind μGal ; aber auch $10^{-9} \text{ m/s}^2 = 10^{-1} \mu\text{Gal}$ ist gebräuchlich.

Was ist Schwermessung?

Die Schwere ist eine ortsabhängige physikalische Größe und im Wesentlichen eine Funktion von Höhe und geographischer Breite. Als Schwere wird der Betrag der Fallbeschleunigung bezeichnet, die ein Vektor ist, eine gerichtete Größe also, die sich in einem Punkt jeweils gemäß des dort herrschenden Lotes ausrichtet; und das ist senkrecht zu der durch diesen Punkt verlaufenden Niveaufläche, einer Fläche konstanten Potentials.

Für die gravimetrische Bestimmung des Schwerefeldes werden absolute und relative Schwermessungen durchgeführt. Über die Ermittlung der Schwereanomalie, das ist die lokale Differenz der gemessenen und auf das Geoid reduzierten Schwerkraft von dem theoretischen Vergleichswert auf dem mittleren Erdellipsoid, werden über komplexe Rechenverfahren Geoidundulationen bestimmt. Geoidundulationen werden die Abweichungen der ellipsoidischen von den orthometrischen Höhen genannt und betragen global bis zu 110 m.

Sie ordnen das Geoid als Äquipotentialfläche des tatsächlichen Erdschwerefeldes dem mathematisch exakt definierten mittleren Erdellipsoid zu und werden somit auch als Geoidhöhen bezeichnet.

Relative Schwermessung

Die Funktionsweise eines Relativgravimeters, z.B. ein Gravimeter der amerikanischen Firma LaCoste & Romberg, Inc., Austin, Texas, USA (LCR), entspricht der einer hochempfindlichen und äußerst genauen Federwaage: Ein konstantes Gewicht

dehnt eine Feder gemäß der am Messungsort herrschenden Schwere. Für die Schwerewertbestimmung wird allerdings der tatsächliche Schwerewert eines Referenzpunktes benötigt. Die unterschiedliche Längenausdehnung der Feder auf zwei verschiedenen Punkten ist ein Maß für die korrespondierende Schweredifferenz.

Eine an einem horizontalen Waagebalken mit Gewicht angebrachte Anzeige wird jeweils durch die senkrechte Verschiebung des Federaufhängepunktes auf die Nullmarke gebracht, und die Ablesewerte an Spindel und Zählwerk führen zum Schwerewert.

Jedoch sind an der Differenz der Ablesungen noch Kalibrierungswerte, die z.T. auf Gravimeteereichstrecken ermittelt werden, anzubringen (eine vom Hersteller für jedes Gravimeter fest vorgegebene Eich-tabelle oder ein Gravimeterfaktor und eine spezifische Eichfunktion). Die Eichfunktion enthält zusätzliche Korrekturen wegen der durch das Spindelgewinde und/oder Untersetzungsgetriebe auftretenden systematischen Fehler.

Mit dieser Methode werden die Differenzen des Absolutbetrages der Schwerebeschleunigung - man spricht von „relativer Schweremessung“-, basierend auf der Bestimmung einer physikalischen Größe, nämlich die Federlänge, bestimmt. Sie ermöglicht eine rasche Ermittlung von Schwerewerten - eine 3fach-Ablesung, also eine Schweremessung auf einem Punkt dauert in etwa 15 Minuten - bei einer hohen Messgenauigkeit von ca. 10 µGal.

Der Verlauf einer Schweredifferenzmessung ist vereinfacht ausgedrückt folgender: Auf Punkt1 wird das Gerät aufgestellt, horizontalisiert und die Ableseanzeige über das Drehen an der Messspindel auf die Nullmarke eingestellt. Die Ablesungen an Spindel und Umdrehungszählwerk ergeben auf Punkt1 den Wert A1. Dieser Vorgang wird auf einem weiteren Punkt entsprechend wiederholt, und man bekommt den Wert A2 auf Punkt2. Die sich ergebende Differenz der Ablesungen liefert über das Anbringen der oben genannten Umrechnungsparameter die Schweredifferenz zwischen Punkt1 und Punkt2, und mit dem tatsächlichen Schwerewert von Punkt1 erhält man den von Punkt2.

Beispiel:

Ablesungen A1 auf Punkt1: 3859,229

Ablesungen A2 auf Punkt2: 4156,357

$$A1 - A2 = \Delta A = - 297,129$$

$$- 297.129 \times (\text{Gravimeter-}) \text{ Proportionalitätsfaktor} = - 297,129 \times 1,05789$$

ergibt die Schweredifferenz von

$$- 314,329 \text{ (} 10^{-5} \text{ m/s}^2 \text{)}$$

Sie muss unter Berücksichtigung der spezifischen Eichfunktion zu dem tatsächlichen Schwerewert von Punkt1 addiert werden, um den für Punkt2 zu bekommen.

Vorher müssen diese nun relativen Schweredifferenzen zwischen den verschiedenen Schwerefestpunkten allerdings noch wegen verschiedener Einflüsse reduziert werden, das sind der Einfluss:

- der Gezeitenwirkung von Mond und Sonne
- des Gravimeterganges
- der Auswirkung des Luftdrucks
- wegen eventueller Unterschiede der Instrumentenhöhe

Gezeitenwirkung:

Die Gravitationswirkung von Mond und Sonne ist zeitlich variabel, d.h. sie wirkt messbar periodisch zunehmend und dann wieder abnehmend auf das Schwerfeld der Erde ein; wobei der Einfluss des Mondes gegenüber dem der Sonne überwiegt. Diese Störeinflüsse können aufgrund der Kenntnis der Massen und Ephemeriden von Mond und Sonne für jeden beliebigen Zeitpunkt mithilfe der Keplerschen Gesetze im Voraus berechnet werden. In Bayern nimmt dieser Störeinfluss einen Betrag von bis zu ca. $\pm 150 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ an.

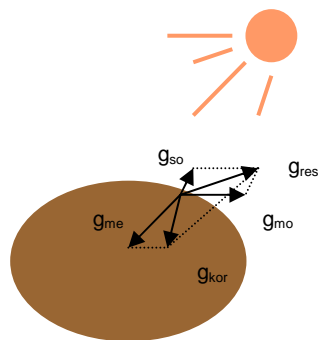


Bild 1: Erdgezeiten

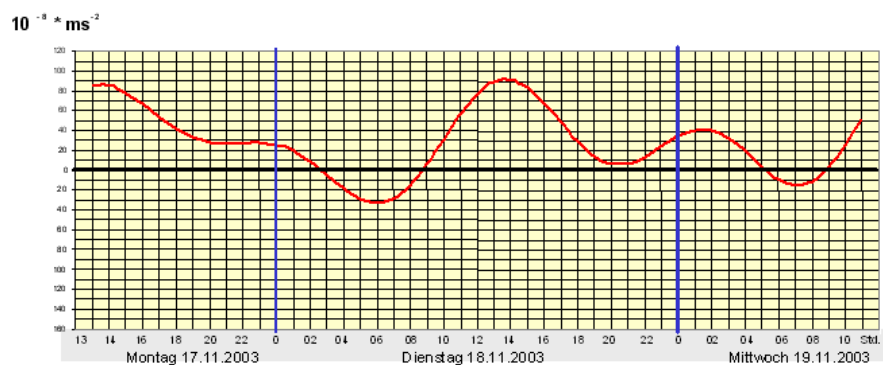


Bild 2: Die Korrektur aufgrund der Gezeiten beträgt bis zu $\pm 150 \mu\text{Gal}$.

Gravimetergang:

Der Gravimetergang, auch Gravimeterdrift genannt, ist ebenfalls eine zeitlich sich ändernde Größe und tritt durch die Änderung der Federkraft einer nicht völlig elastischen Feder auf. In der Regel verhält sie sich zeitlich jedoch annähernd linear, so dass sie interpolativ über die Zeit berücksichtigt werden kann: Man misst über einen Tag hinweg auf ein und demselben Punkt die Schwere mehrmals und kann so deren Änderung pro Zeit berechnen; nach Angaben des Herstellers ist die Gerätedrift weniger als 10^{-5} m/s^2 pro Monat.

Als Gründe für die Drift werden angegeben:

- das einem Alterungsprozess unterliegende Federmaterial
- die sich auf das Gravimeterinnere auswirkenden Temperaturänderungen
- durch beim Transport auftretende Erschütterungen

Luftdruckauswirkung:

Da die Luft ebenfalls eine Masse ist, wird bei der Schweremessung auch der Luftdruck gemessen und als Korrekturfaktor angebracht. Die Luftmassen verhalten sich bezüglich ihrer Auswirkung ganz unterschiedlich, da die Dichte der Luftmoleküle der Erdatmosphäre eines Tiefdruckgebietes viel geringer ist als in einem Hochdruckgebiet. Das drückt sich dann z.B. auch durch unterschiedliche Sichtverhältnisse aus, denn bei zahlreichen Luftmolekülen in der Atmosphäre wird der Sehstrahl häufiger reflektiert, und sich in größerer Entfernung befindende Gegenstände verschwinden hinter einem Dunstschleier. Dahingegen wirken z.B. bei Tiefdruck die Alpen von München aus gesehen sehr nahe.

Dieser Umstand macht sich ebenso durch unterschiedliche Schwerkraftwirkung der Luftmassen über dem Gravimeter bemerkbar (Schwankungen des Luftdrucks verursachen Änderungen der Schwerebeschleunigung in der Größenordnung von einigen μGal).

Instrumentenhöhe:

Die unterschiedlichen Instrumentenhöhen bei Gravimeteraufstellungen sind mit der Freiluftreduktion zu berücksichtigen:

$$\Delta g_F \text{ (} 10^{-5} \text{ m s}^{-2} \text{)} = - \Delta h \text{ (m) } 0,3086$$

Die sich nach Anbringen dieser Korrekturen ergebenden Schwereunterschiede werden in zu Null schließenden Schleifenbedingungen einer Netzausgleichung unterzogen.

Die so erhaltenen relativen Schwerewerte bedürfen noch der Absolutschwerewerte von Ausgangspunkten, um tatsächliche Schwerewerte für alle Netzknoten zu erhalten.

Absolutschweremessung

Mit einem Absolutgravimeter wird der absolute Wert der Schwere bestimmt. Für Absolutschweremessungen werden heute Gravimeter nach der Frei-Fall- und der Frei-Wurf- und -Fall-Methode eingesetzt.

Bei der ersten Methode wird die Fallgeschwindigkeit eines Probekörpers (Prisma) gemessen, während dieser bei der zweiten zusätzlich in die Höhe geworfen wird. In beiden Fällen bewegt sich das Objekt gegenüber einem unbewegten durch eine evakuierte Röhre. Mit elektronischem Laser-Messsystem werden während des Aufstiegs bzw. Falls durchlaufende Interferenzmuster bei simultanem Messen von Laufzeit und zurückgelegtem Weg registriert und daraus der Schwerewert ermittelt. Es werden zahllose Einzelmessungen durchgeführt, wodurch die sich im Mittel ergebende Präzision bei einigen 10^{-8} m/s^2 liegt. Der experimentelle Aufwand für die absolute Bestimmung der Schwere ist allerdings sehr hoch, und die Messungen für den Erhalt eines konkreten Schwerewertes ziehen sich, je nach eingesetztem Instrument, wenige Stunden (2 x 24 Minuten beim A 10) oder fast eine Woche hin. Eine weitere (historische) Möglichkeit der Absolutbestimmung der Schwere ist die Pendelmethode (mit variabler Pendellänge). Dabei wird die Periodendauer T eines frei schwingenden Pendels mit der Fadenlänge L gemessen. Die Periodendauer T ist eine Funktion von L und der Schwere g , gemäß: $T \sim (g/L)^{1/2}$; daraus lässt sich die Schwerebeschleunigung g bestimmen.

Die mit Pendeln durchgeführten Absolutmessungen sind allerdings sehr schwierig und aufwendig, und nur auf wenigen Schwerefestpunkten der Erde konnte diese Messmethode eingesetzt werden.

Bei der Messung von Absolutschwerewerten ist gegenüber der Relativmessung die Bestimmung von zwei physikalischen Größen, nämlich Länge und Zeit notwendig.

Verwendung von Schweremessung

In der Geodäsie:

Alle geodätischen Messungen werden vom Schwerfeld der Erde beeinflusst. So richten sich Libellen parallel zu Niveauflächen aus, d.h. eine Libelle spielt tangential zu der durch einen Punkt gehenden Niveaufläche ein, und mittels Pendel oder Libellen werden geodätische Instrumente tangential zu Niveauflächen horizontiert. Niveauflächen variieren jedoch gemäß der lokal herrschenden Schwere, was durch ein geometrisches Nivellement entlang einer Niveaufläche nicht zum Tragen kommt: Der nivellierte Höhenunterschied auf einer Niveaufläche ergibt sich zu Null, und das entspricht keinesfalls der Realität, denn schon die Abstände von Niveauflächen variieren, und damit ist die „Höhe“ einer Niveaufläche nicht konstant. Um nun die jeweils tatsächlich „richtige Höhe“ zu bekommen, müssen nivellierte Messungen mit parallel durchgeführten Schweremessungen korrigiert werden. Somit führt geometrisches Nivellement mit auf Nivellementlinien durchgeführter Gravimetrie zu einer theoretisch einwandfreien Höhenbestimmung.

Die mit dem mittleren Meeresspiegel der Weltmeere zusammenfallende Niveaufläche der Erde nennt man Geoid; sie stellt für die Geodäsie die „theoretische Erdfigur“ dar und bildet für Höhensysteme die geometrische Bezugsfläche.

Die Form des Geoids kann mittels flächendeckend durchgeführter und gleichmäßig verteilter Schweremessung hergeleitet werden (Abstand von 2 bis 3 km). Dies geschieht oft im Verbund mit anderen Verfahren, wie z.B. über die Bestimmung der Lotabweichung, die auf der Neigung einer Äquipotentialfläche (wie z.B. des Geoids) gegenüber dem Bezugsellipsoid (z.B. das GRS 80) basiert. Eine cm-genaue Geoidbestimmung (ein sogenanntes Zentimeter-Geoid) fordert eine Genauigkeit für Schweremessungen von wenigen 10^{-7} m/s^2 .

In der Geophysik:

In der Geophysik spielt die Abweichung des tatsächlich gemessenen Schwerfeldes vom Normalschwerfeld eine gewichtige Rolle. Dem Normalschwerfeld liegt ein sog. Niveauellipsoid zugrunde. Dies ist in seinen Dimensionen ein mittleres Erdellipsoid mit einer völlig homogenen Massenverteilung im Innern sowie gleicher Masse und Rotationsgeschwindigkeit wie die Erde.

Es werden die gemessenen Oberflächenschwerewerte durch sog. Reduktionen (z.B. Freiluft- oder Bouguer-Reduktion) auf das Geoid zurückgerechnet. Aus der Abweichung der reduzierten Schwerewerte von den korrespondierenden Normalschwerewerten werden Schwereanomalien berechnet.

Die Schwereanomalien auf der Erde können bis zu $\pm 200 \text{ mGal}$ betragen. Sie lassen Rückschlüsse zu über die Beschaffenheit im Erdinneren, die Dichte der Erde und auch über das eventuelle Vorkommen von Rohstoffen und dienen somit der Exploration von Lagerstätten, wie z.B. Erdöl- und Erzvorkommen. Zur Rohstoffsuche reichen Schweremessungen mit einer Genauigkeit von $100 \mu\text{Gal}$ aus.

In der Geodynamik:

Schweremessungen finden außer in der Geophysik und Geodäsie auch Anwendung in der Geodynamik. Dort dienen sie zum Nachweis von langzeitlichen Schwereänderungen, wobei höchste Genauigkeiten ($1 - 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$) gefordert werden.

Wie wird Schwere gemessen:

Schweremessungen werden mit Flugzeugen, auf der festen Erdoberfläche, auf der Meeresoberfläche oder auf dem Meeresboden durchgeführt.

Klassische terrestrische Schweremessungen kommen hauptsächlich in lokalen und regionalen Bereichen zur Anwendung. Für die darüber hinaus reichenden Dimensionen wird Fluggravimetrie (airborne gravimetry) durchgeführt. Die Fluggravimetrie (mit einem Genauigkeitsniveau von 1 mGal) ist in den letzten ca. 10 bis 20 Jahren

zunehmend auf dem Vormarsch. Da Satellitenmethoden (erkennen Schwankungen des Erdschwerefeldes in der Größe von 20 mGal) nur eine räumliche Auflösung von ca. 50 bis 100 km ermöglichen, ist die Untersuchung feinerer Strukturen des Erdschwerefeldes nicht möglich. Dazu gehören sehr präzise Geoidberechnungen oder die geophysikalische Interpretation von Bodenschätzen, wie Mineral- oder Ölvorkommen, oder die Feststellung von tektonischen Plattenrändern. Dies ist weiterhin nur mit terrestrischen Methoden durchführbar, und hierzu wird auch noch die Fluggravimetrie gerechnet.

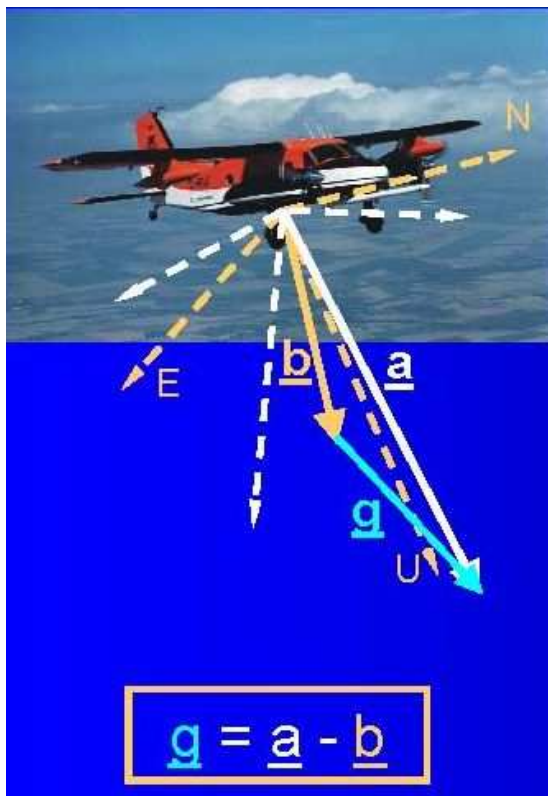


Bild 3: Fluggravimetrie

In der Fluggravimetrie basiert die Bestimmung der gravitativen Beschleunigung \underline{g} auf der über Akzelerometer beobachtbaren Gesamtbeschleunigung \underline{a} an Bord eines Flugzeugs und der aus der rein durch Bewegung verursachten Beschleunigung \underline{b} , die mit Satellitenpositionierungssystemen (GNSS) ermittelt wird:

$$\underline{g} = \underline{a} - \underline{b}$$

In der Seegravimetrie, die sich erst Anfang der sechziger Jahre entwickelt hat, lassen sich vom Schiff aus Dichteunterschiede unter dem Meeresboden bestimmen. Große Dichteunterschiede sind zwischen dem Meeresboden und dem darüber stehenden Wasser der Meere auszumachen, wodurch über Schweremessungen die Möglichkeit

besteht, die Topographie des Meeresbodens aufzuzeichnen. Von besonderer Wichtigkeit sind hier wiederum die Schwereanomalien, die über das Registrieren verschiedener Dichtestrukturen über sich im Untergrund befindende Materialien Aufschluss geben.

Seegravimeter arbeiten in der Regel nach dem Prinzip einer Federwaage.

Schweremessgeräte

Absolutgravimeter

Wie oben schon ausgeführt, wird mit einem Absolutgravimeter der Absolutbetrag der Schwere gemessen, d.h. der Betrag des Schwerevektors \mathbf{g} im SI-System. Heutzutage arbeiten Absolutgravimeter vorwiegend nach dem Prinzip des ballistischen Gravimeters mit bewegter Testmasse. Ab ca. 1950 kamen sie erstmals stationär und später dann transportabel zum Einsatz. Sie ersetzen die bis dahin auch für Absolutmessungen eingesetzten Pendelapparate. Ab 1995 waren ballistische Gravimeter in ihrer Entwicklung so weit, dass sie auch für Außenmessungen einsatzfähig waren.

Pendelgeräte

Das Pendel (lat.: pendere = hängen) selbst wurde von Galileo Galilei (1564 -1642) entdeckt/erfunden. Pendelapparate kamen hingegen erst ab Mitte des 17. Jahrhunderts für die Bestimmung von Absolutschwerewerten zum Einsatz.

Pendelapparate arbeiten nach dem Prinzip eines Fadenpendels (das ist ein mathematisches Pendel, das eine Idealisierung eines realen Pendels darstellt). Die Schwingungszeit (Pendelfrequenz) hängt dabei nicht von der Pendelmasse ab, sondern ist eine Funktion der wirksamen Pendellänge (gemäß der von Galileo Galilei entdeckten Fallgesetze). Bei Auslenkung aus der Ruhelage schwingt das Pendel unter dem Einfluss einer Kraft (in der Regel der Schwerkraft) um den Aufhängepunkt, dem zentral tiefstgelegenen Punkt des Masseschwerpunktes.

Für die Schwingungsdauer T gilt:

$$T = 2\pi/\omega \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi/T, \text{ der Kreisfrequenz}$$

An einem Faden mit der Länge L schwingt ein Massekörper mit der Masse m in einer vertikalen Ebene um den Aufhängepunkt. Die Gravitationskraft, die auf den Massekörper in jedem Moment wirkt, ist: $F_G = mg$, und die resultierende Kraft, die den Massekörper zurück in die Mittellage treibt, ergibt sich dann zu: $F = - mg \sin \varphi$.

Das Minuszeichen steht für den kleiner werdenden Winkel φ , während sich durch die Wirkung der Kraft das Pendel nach innen bewegt. Für die Ruhelage erhält man dann folgerichtig: $F = 0$.

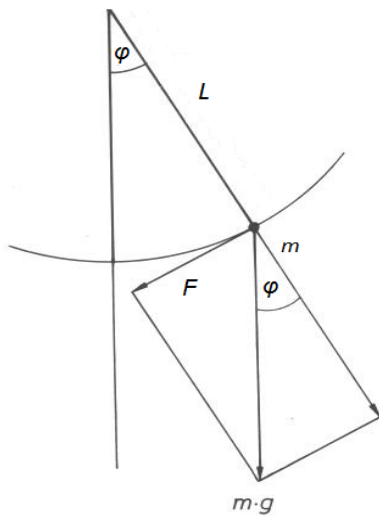


Bild 4: Prinzipskizze eines Pendels

Mit:

$$F = - mg \sin \varphi = m L \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

$$> \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = - \frac{g}{L} \sin \varphi ;$$

$$\text{mit } \frac{d\varphi}{dt} = \left(\frac{g}{L}\right)^{1/2} \cos \varphi = \omega = \left(\frac{g}{L}\right)^{1/2} \quad (\text{bei kleinem } \varphi)$$

folgt:

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi/\left(\frac{g}{L}\right)^{1/2}$$

$$> \quad g = 4 \pi^2 L/T^2$$

erhält man die Schwere.

Für eine präzise Bestimmung der Schwere sind Pendelapparate nicht geeignet. Die erreichbare Genauigkeit hängt in erster Linie von der Genauigkeit der Bestimmung der wirksamen Pendellänge ab; sie bleibt in der Regel auf einige Millionstel der Schwerkraft beschränkt, das sind einige 10^{-5} m/s^2 oder 10^{-6} g .

Ab ca. 1930 wurden sie bei Relativmessungen (invariable Pendel) größtenteils durch die aufkommenden Federgravimeter ersetzt, und seit ca. 1950 kommen bei Absolutmessungen ballistische Gravimeter zum Einsatz.

Relativ- und Absolutmessungen mit Pendelapparaten wurden im Potsdamer Schwere-System von 1898 bis 1906, in der Gravimetrischen Reichsaufnahme von 1934 bis 1943 und im Deutschen Schwerenet 62 von 1952 bis 1962 durchgeführt.

Die erreichten Genauigkeiten lagen bei 5×10^{-6} (Potsdamer System) bzw. $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ bei den Relativmessungen und ca. zwischen 10^{-4} m/s^2 und $7 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ bei den absoluten Bestimmungen.

Ballistische Gravimeter

Ballistische oder kinetische Gravimeter zeichnen sich dadurch aus, dass aus der gemessenen beschleunigten Bewegung eines freifallenden gravimetrischen Probekörpers die tatsächliche Schwere gemessen wird (Frei-Fallmethode).

Eine komplexere und auch etwas genauere Messergebnisse liefernde Art der Schwere messung ist die Frei- Wurf- und -Fall-Methode, bei der der Probekörper in Lotrichtung nach oben geworfen wird und nach dem Passieren des Umkehrpunktes in eine freifallende Bewegung kommt.

„1977 wurden auf den DSGN76-Stationen Hamburg, Braunschweig, Wiesbaden und München absolute Schwere messungen mit dem ersten transportablen Absolutgravimeter hoher Präzision der Italienischen Geodätischen Kommission durchgeführt. Dieses Absolutgravimeter, entworfen und realisiert von den Herren Canizzo und Dr. Cerutti am Istituto di Metrologia in Torino, arbeitet nach der Frei-Wurf- und -Fall-Methode, wobei der Fallkörper das bewegliche (gegenüber einem unbeweglichen) Prisma darstellt (s Abb. 5). Aus der elektronischen Zählung der durchlaufenden Interferenzstreifen innerhalb eines präzise bestimmten Zeitabschnittes während des Aufstiegs bzw. Falls lässt sich die Schwere g bestimmen. Die üblicherweise etwa 100 Einzelmessungen dauern ca. 3 Tage; mit Aufbau, Justierung und Abbau dauert die Arbeit an einer Station etwa 5 Tage. Als innere Genauigkeit wird ein mittlerer Fehler einer Messreihe von ca. $2 \times 10^{-9} \times g$ erzielt, durch Vergleich mit anderen Absolutgravimetern und mit Gravimetermessungen kann man auf einen unregelmäßigen „äußeren“ Fehler von etwa $8 \times 10^{-9} \times g$ schließen.“³

³ aus G. Boedecker: Die Anlage des Schweregrundnetzes 1976 der Bundesrepublik Deutschland (DSGN 76); DVW-Mitteilungsblatt 1979; Heft

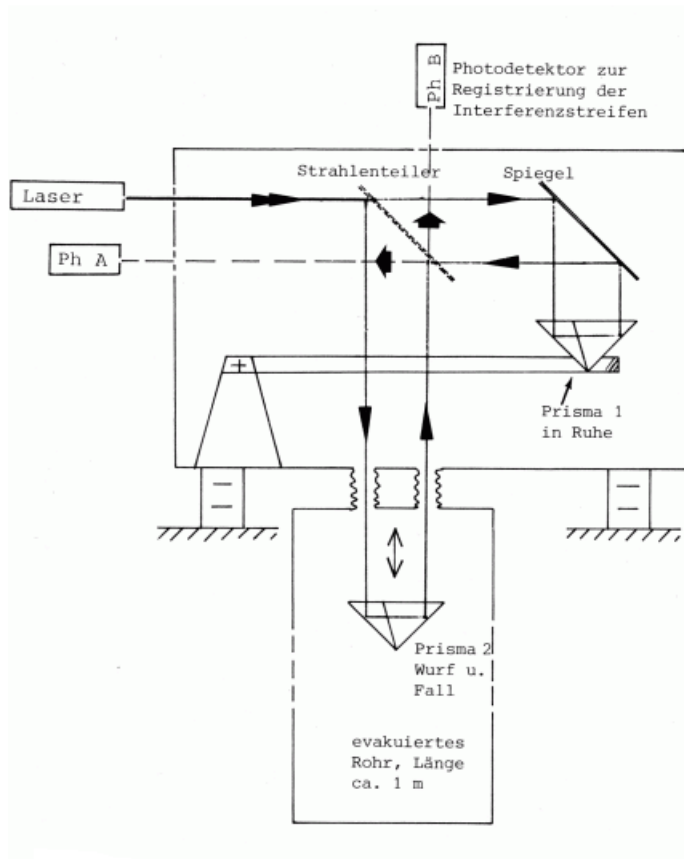


Bild 5: Prinzipskizze des Absolutgravimeters nach der Frei-Wurf- und -Fall-Methode

Freifallinstrumente

Der freie Fall eines Probekörpers wird mit hoher Genauigkeit gemessen. Nichtgravitative Störeinflüsse wie Reibung durch Luftwiderstand oder Auftrieb werden nahezu ausgeschlossen, indem der Probekörper durch eine evakuierte Röhre fällt. Die für die Auswertung genutzte Weglänge beträgt meist ca. 20 cm, die Fallzeit ungefähr 0,2 Sekunden. Aus der Messung von Wegstrecken und Zeitintervallen ergibt sich die Schwerebeschleunigung. Die Weg- und Laufzeitmessungen beruhen auf physikalischen Standards hoher Genauigkeit: In der Regel dient für die Zeitmessung ein Rubidium-Normal und für die Wegmessung ein jodstabilisierter HeNe-Laser.

FG5 - Absolutgravimeter

Zwischen 1950 und 1960 wurden die ersten Instrumente nach der Frei-Fall-Methode entwickelt.

Ein seit einigen Jahren zum Einsatz kommendes transportables Absolutgravimeter ist das FG5-Frei-Fall-Instrument (eine auf ein Konzept von Faller (1963) basierende Entwicklung (1993); Micro-g Solutions, Inc., Arvada, CO, USA).

„Je Fall-Experiment („drop“) werden etwa 200 gleichmäßig über die Fallstrecke von 20 cm verteilte Positions-/Zeit-Messungen durchgeführt.... Der Fallkörper bewegt sich in einer widerstandsfreien Kammer, welche verschiedene Aufgaben erfüllt. Durch entsprechende Beschleunigung der Kammer wird das Tripelprisma in den freien Fall versetzt, und die Kammer wird dann dem Prisma so nachgesteuert, dass der restliche Widerstand eliminiert wird. Nachdem das Prisma weich aufgefangen worden ist, wird es zurück in die Startposition transportiert. Das Referenzprisma wird durch eine „super-spring“ (durch ein elektronisches Rückkopplungssystem zu wirksamen Eigenschwingungen zwischen 30 und 60 s angeregte Feder) von mikroseismischen Bodenbewegungen abgeschirmt.... Die FG5-Gravimeter verwenden Interferometer mit einer vertikal angeordneten Basis; damit wirken sich Bodenvibrationen und Neigungen nicht auf die optische Weglänge aus. Zum Transport wird das Instrument zerlegt (240 kg in 8 Behältern). Der Stationsaufbau erfordert etwa zwei Stunden, und die Messungen erstrecken sich in Abhängigkeit von der örtlichen Mikroseismik i. allg. über ein bis zwei Tage. Eine tragbare Version des FG5-Gravimeters lässt sich auf ruhigem Grund auch außerhalb von Gebäuden einsetzen und liefert nach einer Messzeit von 10 Minuten eine Präzision von $\pm 0,1 \mu\text{m/s}^2$. Transportable Wurf- und Fall-Instrumente sind vom Istituto di Metrologia „G. Colsonetti“, Torino, Italien und von Jaeger S.A., Frankreich entwickelt worden. Das FG5-Gravimeter kann ebenfalls im Wurf- und Fall-Modus arbeiten.“

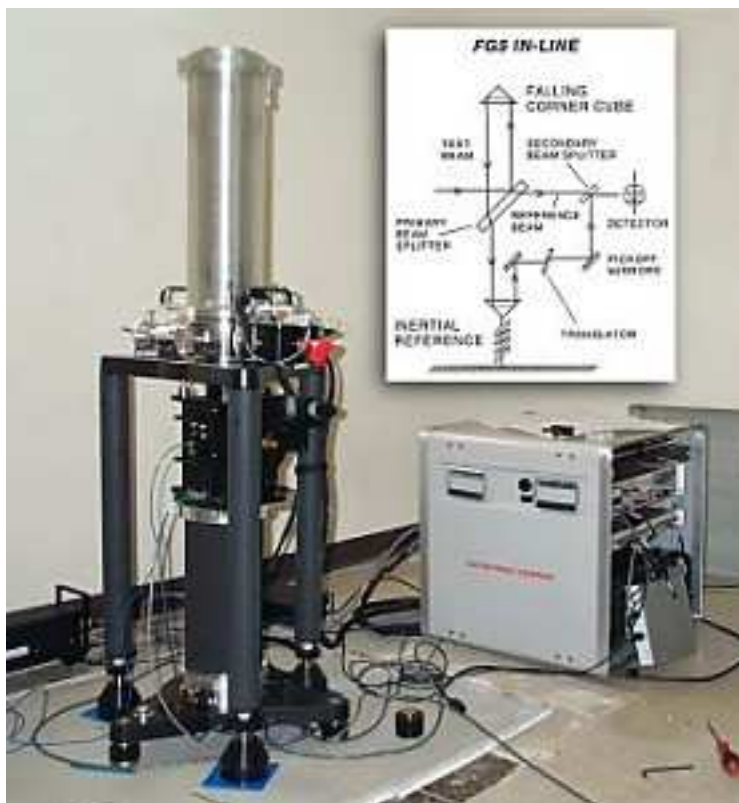


Bild 6: Das FG5-Absolutgravimeter des Instituts für Erdmessung in Hannover

A -10 - Absolutgravimeter

Das A-10 - Absolutgravimeter der amerikanischen Firma Micro-g Solutions ist weltweit das erste Frei-Fallgerät mit der Eignung für die Durchführung von Messungen im Außenbereich. Der fallende Probekörper bewegt sich dabei durch eine evakuierte Röhre.

„Dazu ist neben einer effizienten Evakuierung der Fallröhre durch mechanische und Ionenpumpe noch notwendig, dass ein den Fallkörper umgebendes Liftkammerchen die restlichen Luftmoleküle wie ein Schneepflug aus dem Weg räumt; der Lift muss dabei so gesteuert/geregelt werden, dass er kurzzeitig dem Fallkörper vorausseilt, ihn dabei nicht zum Taumeln bringt und ihn danach wieder sanft auffängt. Die Zeitpunkte T_i der jeweiligen Höhenmessung D_i werden mit einer Rubidium-Atomuhr bestimmt...Ein Fallversuch geht nur über eine Höhendifferenz von ca. 5 cm innerhalb von ca. 0,1 sec; dabei werden 700 einzelne Punkte längs der Trajektorie nach Höhe und Zeit vermessen...Je Station werden üblicherweise ca. 1000 bis 3000 einzelne Fallversuche („Drops“) in Gruppen („Sets“) ...durchgeführt....Je Messpunkt werden so - je nach äußeren Bedingungen - $\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden benötigt.“
Die erreichte Genauigkeit des A-10 liegt in etwa bei 10 μ Gal.



Bild 7: Das A-10 - Absolutgravimeter des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Supraleitendes Gravimeter

Bei den herkömmlichen Gravimetern nach dem Federwaage-Prinzip kompensiert die Federspannung die durch gravitative Beschleunigung bewirkte Auswirkung auf einen Massekörper. Bei Schwerkraftänderung reagiert der Massekörper und kommt durch Positionsänderung in ein neues Gleichgewicht.

„Bei einem supraleitenden Gravimeter ersetzt ein Magnetfeld, das von zwei supraleitenden Spulen erzeugt wird, die mechanische Feder. Der Vorteil dieses Sensorsystems liegt darin, dass es eine hohe Langzeitstabilität gewährleistet. Die Probemasse bildet eine Hohlkugel aus Niob mit 25.4 mm Durchmesser.... Erreicht wird die für die Supraleitung erforderliche tiefe Temperatur durch flüssiges Helium, das sich in einem Dewar-Gefäß befindet, in dem das eigentliche Gravimeter hängt.

Beschleunigungsänderungen lenken den Probekörper aus der definierten Nulllage. Durch ein Regelsystem, das aus einem Detektionssystem zur Lagebestimmung der Kugel (Dreiplatten-Kondensator) und einer nichtleitenden weiteren Spule besteht, wird die Probemasse in die Nullposition zurückgeführt. Das Messsignal liefert die Spannung, die hierfür erforderlich ist.

Den Grundkörper des supraleitenden Gravimeters bildet ein Kupferblock mit einem Hohlraum, der das kapazitive Abgridsystem und die Probemasse enthält. Zwischen Kugel und Kondensatorplatten besteht ein etwa 1mm großer Abstand. Damit die Kugelbewegungen in vertikaler Richtung gedämpft sind, ist der Hohlraum mit Heliumgas gefüllt (Druck von 0.1 Pa). Temperaturänderungen im Bereich der Supraleitung beeinflussen die Geometrie des Magnetfeldes und damit die Nullposition der Probemasse. Dies bedeutet, dass eine Temperaturstabilisierung auf ± 0.001 K erforderlich ist. Um den Grundkörper thermisch zu stabilisieren, ist auf ihm ein zweites Regelsystem mit Thermofühlern installiert, das die Blocktemperatur auf $4.6 \text{ K} \pm 0.001 \text{ K}$ hält. Zur weiteren thermischen Stabilisierung ist der innere Kupferblock, der direkten Kontakt mit dem Heliumbad hat, von einem dickwandigen Kupfermantel umgeben. Der Zwischenraum ist evakuiert.“

„Mit der Beobachtung der zeitlichen Schwerefeldvariationen durch supraleitende Gravimeter werden folgende Ziele verfolgt:

- Hochgenaue Erfassung der Gezeiten der festen Erde zur Herleitung von Parametern, welche die elastische Antwort der Erde auf Gezeitenkräfte beschreiben.
- Erfassung von Schwereänderungen als ein Bestandteil von Höhenänderungen, die durch geodätische Raumverfahren (VLBI, SLR, GPS) gemessen werden.
- Erfassung von Schwereänderungen infolge der Polbewegung.
- Detektion von seismisch induzierten Eigenschwingungen der Erde.
- Detektion der Eigenmoden des Erdkerns.
- Untersuchung von Krustendeformationen durch ozeanische und atmosphärische Auflast.

Supraleitende Gravimeter zeichnen sich durch eine sehr hohe Auflösung des Messsignals ($< 0,1 \text{ nm/s}^2$, das entspricht einer relativen Auflösung von 10^{-11}) und eine geringe instrumentelle Drift aus. Der niedrige Rauschpegel ist auf die Betriebsbedingungen nahe dem absoluten Nullpunkt und die fast vollständige Abschirmung des Sensors vor Umgebungseinflüssen wie Temperatur, Luftdruck und Magnetfelder zu-

rückzuführen. Durch die Verwendung supraleitender Spulen, in denen nach einer Initialisierung Ströme dauerhaft und konstant fließen, wird eine Langzeitstabilität erreicht, die geräteabhängig zwischen 0 und 100 nm/s² pro Jahr beträgt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, einen breiten Spektralbereich der Beschleunigungsänderungen mit hoher Auflösung zu erfassen. Das Spektrum reicht von den seismischen Eigenmoden der Erde mit Perioden ab 10 Minuten über die Erdzeiten mit Perioden überwiegend im halb- und gantztägigen Bereich bis hin zur Variation der Zentrifugalbeschleunigung infolge der Polbewegung mit Perioden von 365 und 435 Tagen (Chandler-Periode).“



Bild 8: Supraleitendes Gravimeter CD 029 in Wettzell

Relativgravimeter

Relativgravimeter dienen zur Bestimmung von räumlichen und/oder zeitlichen Änderungen der Schwere. Die gängigste und seit den dreißiger Jahren zum Einsatz kommende Ausführung ist die des Federgravimeters.

Die zuvor verwendeten Pendelgravimeter waren eher einfache und primitive Geräte: Sie waren stöempfindlich, und auch aufgrund anderer Nachteile erreichte man bei besten Voraussetzungen für die relative Bestimmung der Schwere nur eine Genauigkeit von etwa 10^{-5} bis wenigen 10^{-7} m/s²; sie sind heute nur noch historisch bedeutsam.

Federgravimeter

Bei den auf dem Prinzip der Federwaage basierenden Federgravimetern wird die Schwereänderung gegenüber der Bezugs-Schwere eines Referenzpunktes gemessen.

Das Messprinzip ist dabei Folgendes: Die Variation der Schwerkraft bewirkt eine Reaktion einer schwereunabhängigen elastischen Gegenkraft mit daraus resultierenden Längen- oder Winkelauslenkungen, die proportional der auftretenden Schwerkraftänderung sind. Der Massekörper im Geräteinnern kommt damit in einen neuen Gleichgewichtszustand.

In der Regel wird jedoch nicht die Federlängenänderung gemessen, sondern deren Kompensation durch eine elastische Gegenkraft.

Im Gegensatz zu Pendelgeräten, die eine dynamische Anordnung darstellen, indem bei konstanter Pendellänge eine Zeit bestimmt wird, sind Federgravimeter statische Messsysteme, d.h. es wird prinzipiell eine von der Zeit fast unabhängige Länge gemessen.

Askania-Gravimeter

Die Askania Werke AG, eine bis in die 60er Jahre existierende Firma in Berlin-Friedenau, stellte mechanische, optische und technische Präzisionsinstrumente für Zeitmessung, Geodäsie, Astrometrie und Navigation her, ebenso die ersten Relativgravimeter und Geräte für Erdmessung mittels künstlicher Erdsatelliten (GPS; ab 1955).

Askania-Gravimeter kamen bei der Gravimetrischen Reichsaufnahme von 1934 bis 1943 und dem Deutschen Schwerenetz 62 von 1952 bis 1962 zum Einsatz. Die Askania-Gravimeter nach Graf, alter Bauart; Type Gs1 - Gs3, hatten die bekannte Federwaage mit einer vertikal aufgehängten Schraubenfeder und einem sich am Ende befindenden Massekörper als Messprinzip. Die mit dieser Art Gravimeter erzielte Genauigkeit lag bei wenigen 10^{-1} mGal.

Askania-Gravimeter nach Graf, neuerer Bauart; Gs4 - Gs12, funktionierten nach der Methode der Torsionsfederwaage: Ein Schraubenfederpaar trägt einen Waagebalken, an dem sich ein Gewicht befindet; dieses Messprinzip ließ eine etwas (etwa um eine Zehnerpotenz) höhere Genauigkeit als bei der älteren Bauart erreichen. Beide Gravimeter-Messsysteme waren linearer Art: d.h. es bestand eine lineare Abhängigkeit zwischen Längen-/Winkeländerung und Schwereänderung.

LaCoste & Romberg-Gravimeter

LaCoste & Romberg-Gravimeter funktionieren gemäß der Newtonschen Federwaage. Um allerdings größere Genauigkeiten in μGal erzielen zu können, reicht der Standard einer vertikal aufgehängten Feder nicht aus. Man greift deshalb auf die sogenannte Astasierung von Gravimetern zurück, bei der eine geringe Schwereänderung eine große Federauslenkung bewirkt. Erreicht wird dies durch z.B. eine um 45 Grad geneigt angebrachte Hauptfeder. Die im Innern des Gerätes aufgehängte Masse, die bei Schwerkraftänderung eine Auslenkung erfährt, die eine analoge

Größe der verursachenden Schwereänderung ist (Ausschlagmethode; siehe Astasierung), wird durch Drehen an einer Stellschraube wieder in die Ausgangslage gebracht.

Um eine möglichst geringe Thermo-Elastizität der Feder zu erreichen, verwendet man als Federmaterial eine besondere Metallegierung.

Zur Zeit kommen hauptsächlich zwei Modelle von Gravimetern der Firma LaCoste & Romberg (LCR-Gravimeter) zum Einsatz: die Modelle G und D. Die G-Gravimeter mit einem Messbereich von 7000 mGal lassen sich direkt überall auf der Erde verwenden. Der Messbereich der D-Gravimeter ist auf 200 bis 300 mGal beschränkt und muss deshalb evtl. bei einem Wechsel des Messgebietes verstellt werden. Durch ein hoch astasiertes Messsystem können LCR-Gravimeter durchaus die hohe Messgenauigkeit von ca. 14 μ Gal für eine Schweredifferenz erreichen (vom Hersteller wird eine Feldmessgenauigkeit von 2 - 5 μ Gal angegeben).

LCR-Gravimeter enthalten keine elektronischen Komponenten, und alle Bedienungs- bzw. Messvorgänge müssen manuell vollzogen werden. Deshalb können sich bei geringer Erfahrung des Beobachters leicht subjektive Fehler bei der Messung einschleichen.

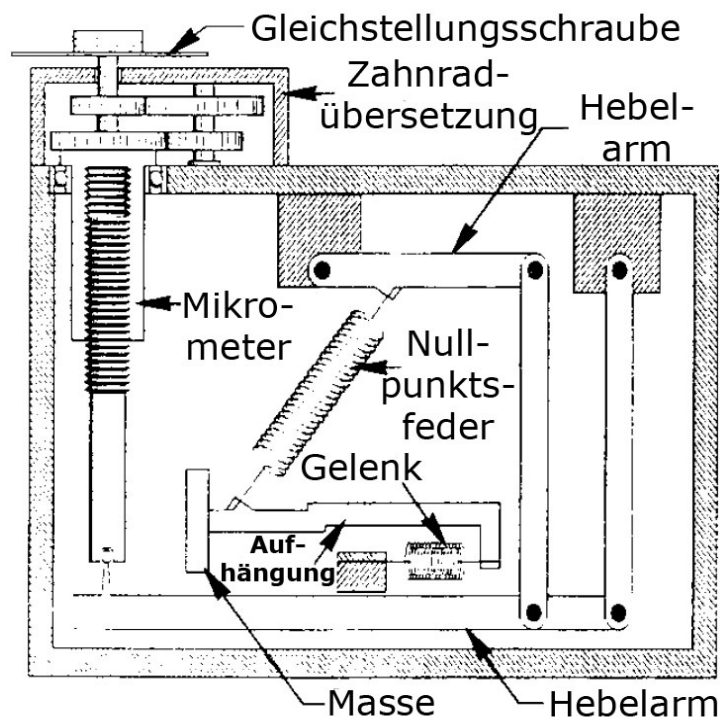


Bild 9: Schematische Darstellung des Messprinzips eines LaCoste & Romberg-Gravimeters



Bild 10: Ein LaCoste & Romberg-Gravimeter mit herkömmlichen Blasenlibellen und externer Ablesemöglichkeit über Voltmeter

Technische Vorrichtungen bei Gravimetern

Klassische Libellen - elektronische Libellen

Die Entwicklung von Libellen geht auf den Franzosen de Thévenot und das Jahr 1666 zurück, indem er ein mit Flüssigkeit und einer Luftblase gefülltes leicht gekrümmtes Glasröhrchen kreierte.

In der Regel bestehen Libellen aus einem mit Flüssigkeit und einer Gasblase gefüllten und nach oben gekrümmten Glas- oder Kunststoffhohlkörper und werden z.B. zur Überprüfung der horizontalen Ausrichtung von Messinstrumenten verwendet. Die Gasblase bildet sich bei der Herstellung des Messgerätes, und als Flüssigkeit werden meist Methylalkohol oder Schwefeläther hergenommen.

Die älteren LCR-Gravimeter haben eine um 90° versetzte Anordnung von zwei Röhrenlibellen (Blasenlibellen), mit der parallelen Lage der Querlibelle zu zwei Fußschrauben. Die Längslibelle ist hingegen parallel zum Messsystem gelagert.

In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass Blasenlibellen sehr temperaturanfällig sind und einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Deshalb wurden sie später durch die eine exakte Horizontierung garantierenden Elektronische Libellen ersetzt.

Für die als „Elektronische Libellen“ bezeichneten elektronischen Neigungsmesser, das sind auf Schwerkraft reagierende Neigungssensoren, gibt es verschiedene technische Lösungen. Generell unterscheidet man sogenannte Flüssigkeits- und Pendelneigungssysteme. Flüssigkeitssysteme werden wiederum in Elektrolyt- und Ober-

flächensysteme unterteilt. Die Pendelsysteme gibt es in den Ausführungen von Horizontal- und Vertikalpendeln.

Die Oberflächensysteme beruhen auf kapazitive Messverfahren, bringen eine hohe Genauigkeit und sind auch sehr robust in ihrer Ausführung. Dabei richtet sich eine geeignete Flüssigkeit im Gerätegehäuse über die Schwerkraft horizontal aus. Deren Lage wird dann mittels eines Kondensators gemessen und elektronisch ausgewertet und dargestellt.

Elektronische Libellen verfügen über keine beweglichen mechanischen Bauelemente.

Feedback-Einrichtung

Unter einem elektrostatischen Feedback-System (zu deutsch: Rückkopplungssystem) bei Gravimetern versteht man eine technische Vorrichtung, die das Verbleiben des am Waagebalken angebrachten Probekörpers in der Null-Lage bewirkt. Dies wird durch das Umfassen des Probekörpers von einem Plattenkondensator erreicht. Eine auftretende Schwereänderung wird durch eine am Plattenkondensator entsprechend große angelegte Spannung kompensiert, und die Probemasse verbleibt so in ihrer Null-Position. Die angelegten Spannungen variieren gemäß den auftretenden Schwerkraftänderungen und werden in Schwereeinheiten ausgegeben.

Bei LCR-Gravimeter kompensiert ein elektrostatisches Feedback-System einen Messbereich von ± 12 mGal.

Astasierung

Eine Astasierung bewirkt eine nichtlineare Beziehung zwischen der angreifenden Schwerkraft und dem Winkelausschlag des horizontal angebrachten Waagebalkens, so dass sich die Position des Probekörpers stärker ändert. Bewirkt wird dies durch die am Waagebalken in einer Schräge (45° bei LCR-Gravimetern) angebrachte Gravimeterfeder.

Die Empfindlichkeit, das ist das Verhältnis von Winkelausschlag zu Schwereänderung, $d\alpha/dg$, lässt sich durch zusätzliche technische Vorkehrungen enorm steigern, was allerdings zu einer hohen Neigungsempfindlichkeit (Verlagerungsempfindlichkeit: Justierung der Längslibelle) des Gravimeters führen kann und so eventuell eine Ablesung unmöglich macht; die Neigungsempfindlichkeit wird dann zu einem Bestandteil der Gravimeterjustierung.

Für das Messen des „relativen Schwerewertes“ gibt es zwei verschiedene Techniken: Der durch Schwereänderung hervorgerufene Winkelausschlag wird bei der „Ausschlagmethode“ als analoges Maß für die Änderung des Schwerewertes hergenommen. Bei der „Null-Methode“ wird hingegen durch geeignete Maßnahmen der Winkelausschlag kompensiert, so dass der Waagebalken in der Null-Lage verbleibt und eine der Schwerkraftänderung entsprechende Kompensationsgröße gemessen wird.

Quarzgravimeter

Scintrex-Gravimeter

Die Firma Scintrex, Ontario, Canada, stellt Relativgravimeter her, die auf einem elastischen Quarzglas-System (ein aus Quarzglas bestehendes Federsystem) beruhen, wie z.B. die Modelle Scintrex CG-3M Autograph oder Scintrex CG-5 Autograph.

Ein elektrostatisches Rückstellsystem, bestehend aus einem Plattenkondensator mit automatischer Rückkopplungsschaltung, führt die Testmasse zurück in die Null-Lage. Dabei wird über eine Steuerspannung eine auf den Testkörper wirkende elektrostatische Kraft hervorgerufen, die zu der Messgröße des relativen Schwerewertes entgegengesetzt groß ist, und die Rückstellspannung wird in ein digitales Signal umgewandelt.

Ein kapazitiver Wegaufnehmer, der die sich variierende Position der auf unterschiedliche Schwerewerte reagierenden Testmasse abtastet (registriert Positionsänderungen im Bereich von 10^{-10} m), macht eine Astasierung überflüssig (lineares System).

Quarzglas hat so große Robustheit und elastische Eigenschaften, dass beim Transport auf eine Arretierung verzichtet werden kann.

Die Scintrex-Gravimeter wirken sehr sensibel auf Temperaturschwankungen, deshalb sind das sich in einem Vakuum befindende Messsystem, die Analog-Digital-Elektronik und das Neigungssensorsystem in einer zweistufigen über Thermostate geschützten Kammer untergebracht, die eine Temperatur von 50° C auf ± 0.5 mK konstant hält.

Das komplexe elektrostatische Rückstellsystem erstreckt sich ohne Einstellungsänderung über einen Messbereich von 8000 mGal.

Eine Mikroprozessor-Steuerung mit graphischer Oberfläche ermöglicht eine einfache Bedienung und schaltet grundsätzlich subjektive Fehler aus; ein geübter Beobachter ist somit nicht notwendig. Eine komfortable Qualitätsanalyse kann bereits im Felde durchgeführt werden.

Von Nachteil ist allerdings, dass die Firma Scintrex nur 10 Jahre lang Kundendienst anbietet.

Einige technische Daten für den Scintrex CG-5 Autograph:

Reading Resolution	1 micro Gal
Standard Field Repeatabilty	< 5 micro Gal
Residual Long-Term Drift	0.02 milliGal/day
Sensor Type	Fused quartz using electrostatic nulling
Range of automatic tilt compensation	+/- 200 arc.sec
Memory	1 M Byte

Data I/O port	USB
Display	1/4 VGA 320 x 240 pixels
Dimensions and weight	31 x 22 x 21 cm, 8 kg incl. battery
Operating temperature range	- 40C to + 45C
Automated compensations	Temperature, Instrument tilt, Tide, Noisy sample, Seismic noise filter
Operating range	8000 mGal without resetting



Bild 11: Der Scintrex CG-5 Autograph

Schwerenetze in Deutschland und Bayern sowie internationale Schwerenetze

Schon im 18. und 19. Jahrhundert kam es vielerorts zur Durchführung von Schwere-messungen, in der Regel mit Pendelapparaten, jedoch erst seit Beginn des 20. Jahr-hunderts wurden systematisch großräumige Schwerenetze geschaffen.

Potsdamer Schweresystem

Das Potsdamer Schweresystem ist ein vom Geodätischen Institut Potsdam mit Pen-delapparatur gemessenes und 1909 als internationales Bezugssystem eingeführtes Schwerereferenznetz. Der im „Pendelsaal“ des Geodätischen Instituts Potsdam zwi-schen 1898 und 1906 von Kühnen und Furtwängler durch Absolutmessungen mit Reversionspendel bestimmte Schwerewert gilt dabei als Schwereniveau. Die über die gesamte Erdoberfläche verteilt durchgeführten und einer Ausglei-chung unterzo-genen Schwere-messungen bezogen sich auf dieses Schwereniveau mit dem Wert von: $g = 981\,274 \text{ mGal}$ (auf $\pm 3 \text{ mGal}$ genau bestimmt). Diese als „Potsdamer Fun-damentalkonstante“ bezeichnete Größe gilt dabei exakt und wurde 1909 als inter-nationaler Referenzwert festgelegt; er bildet das Potsdamer Schwere-Datum. Die innere Genauigkeit dieses Netzes lag bei $\pm 0.5 \text{ mGal}$.

Später durchgeführte Absolutschweremessungen konstatierten diesen Wert aller-dings gegenüber dem IGSN 71 als um 14 mGal zu groß (historische Schwerewerte im Schwerestatus: 910).

Geophysikalische Reichsaufnahme

In den Jahren 1934 bis 1943 wurden im Rahmen der Geophysikalischen Reichsauf-nahme gravimetrische Messungen innerhalb der Grenzen des Deutschen Reiches (von 1937) durchgeführt. Dieses nationale Deutsche Schweregrundnetz (DSGN) be-zog sich auf das Potsdamer Schweresystem und wurde vom Geodätischen Institut Potsdam mithilfe relativer Pendelmessungen mit vier Pendelapparaten aufgebaut. Große Bereiche dieses Netzes wurden allerdings durch eine Privatfirma mit den er-sten Federgravimetern der Firma Askania gemessen. Die innere Genauigkeit dieses Netzes lag bei $\pm 0.4 \text{ mGal}$ (historische Schwerewerte im Schwerestatus: 911).

Deutsches Schwerenetz 1962 (DSN 62)

In den Jahren 1952 bis 1958 wurde in einer gemeinsamen Aktion des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI in Frankfurt und München) und dem Amt für Bodenforschung (in Hannover; jetzt Bundesanstalt für Geowissenschaften und Roh-stoffe (BGR)) das Deutsche Schweregrundnetz 1957 (DSGN 1957) geschaffen. Als Schwereniveau wurde der Schwerewert des Pendelpunktes Bad Harzburg der Geo-physikalischen Reichsaufnahme hergenommen - bei einem Übertragungsfehler von

ungefähr 1 mGal. Ein mit dem Schwerenetz über gemeinsame Knotenpunkte verbundenes Netz aus 9 Relativpendelpunkten diente zur Maßstabsbestimmung. Unter Einbeziehung weiterer Punkte der Geophysikalischen Reichsaufnahme und zusätzlicher Punkte auf Nivellementlinien entstand das Deutsche Schwerenetz 1962 (DSN 62). Gemessen wurde es unter Beteiligung einiger Landesvermessungsämter mit den inzwischen sehr weit entwickelten Relativgravimetern der Firma Askania bis 1962; teilweise diente das als Stepverfahren bezeichnete Verfahren dabei als Messmethode. Das DSN 62 umfasste ca. 31 000 Punkte, die jedoch größtenteils unvermarkt blieben. Die innere Genauigkeit lag bei ungefähr ± 0.3 mGal (historische Schwerewerte im Schwerestatus: 912).

International Gravity Standardisation Net 1971 (IGSN 71)

Das IGSN 71 entstand durch Beschluss auf der Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik als Ersatz für das Potsdamer Schweresystem. Es wurde 1971 als Internationales Bezugssystem eingeführt und basiert auf 1873 weltweit verteilten Beobachtungsstationen; auf 14 Punkten davon wurden zur Bildung des Schwereniveaus Absolutmessungen durchgeführt. Bei den Messungen kamen zu 95 % Federgravimeter zum Einsatz, die restlichen 5 % der Messungen wurden unter der Verwendung von Pendelapparaten durchgeführt. Die Genauigkeit der Schwerfestpunkte dieses Netzes liegt bei ca. ± 0.03 mGal (die Schwerewerte haben den Schwerestatus: 400).

Das Niveau des Potsdamer Schweresystem wird durch -14 mGal in das des IGSN 71 überführt.

Deutsches Schweregrundnetz 1976 (DSGN 76)

Aufgrund der den gestiegenen Anforderungen nicht mehr genügenden nationalen Bezugssysteme, was Messgenauigkeit und Dichte der Schwerfestpunkte betrifft - der Verlust an Schwerfestpunkten im DSN 62 lag bei ca. 30 % -, und der Entwicklung einer inzwischen erheblich verbesserten Messtechnik bei Gravimetern, kam es durch internationale Empfehlungen zur Anregung der Anlage eines neuen Schweregrundnetzes auf der Grundlage des IGSN 71 durch die Deutsche Geodätische Kommission (DGK).

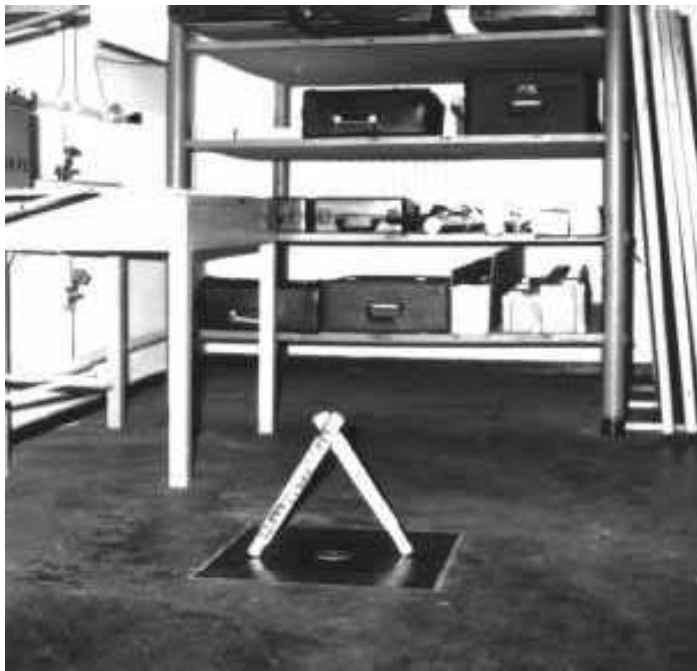
Federführend bei der Schaffung des Deutschen Schweregrundnetzes 1976 war das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut in München (DGFI) unter der Mitwirkung des Instituts für Angewandte Geodäsie in Frankfurt am Main (IfAG).

Die Durchführung der Arbeiten erstreckte sich unter der Beteiligung von Landesvermessungsämtern über die Jahre 1975 bis 1980. Das Netz umfasste 21 Stationen mit jeweils 3 Exzentren zur Sicherung. Auf den Stationen in Hamburg, Braunschweig, Wiesbaden und München wurden 1977 Absolutmessungen hoher Auflösung für die Bestimmung des Schwere-Datums (Maßstab und Bezugsniveau) durchgeführt. Zum Einsatz kam hierfür ein transportables und nach der Frei- Wurf- und -Fall-Methode arbeitendes Absolutgerät hoher Präzision der Italienischen Geodätischen Kommission in Turin; Italien.

Die Bestimmung der Schwerewerte der restlichen Stationen wurde durch den gleichzeitigen Einsatz der vier am besten geeigneten Relativgravimetern Deutschlands

durchgeführt. Elf Stationen wurden in der Nähe von bzw. identisch mit ISGN 71- und DSN 62-Stationen geschaffen. Aufgrund eines Maßstabsfehlers im ISGN 71 von 10^{-4} erfolgte jedoch kein rechnerischer Anschluss, trotzdem gilt das DSGN 76 als im System des ISGN 71 bestimmt.

Die Genauigkeit der Absolutschwerewerte liegt bei ca. $\pm 8 \times 10^{-3}$ mGal, die der restlichen Punkte bei $8 - 11 \times 10^{-3}$ mGal. Dabei gingen die Schwerewerte der Absolutstationen mit ihren Standardabweichungen in die Ausgleichung des DSGN 76 ein; der Schwerestatus des DSGN 76 ist 100.



*Bild 12:
Plakette „Schweregrundnetz 1976“
Bamberg, Zentrum
Amt für Ländliche Entwicklung
Nonnenbrücke 7a, 96047 Bamberg, Südteil, Keller, Raum K 29*

Deutsches Hauptschwerenetz 1982 (DHSN 82)

Das Deutsche Hauptschwerenetz 1982 (DHSN 82) entstand in den Jahren 1978 bis 1987 in gemeinsamer Arbeit der Landesvermessungsämter und bildet die geodätische Grundlage der Schwerfestpunkte in Deutschland (Deutsches Schwerenetz 1. Ordnung).

Das DSGN 76 gilt als im DHSN 82 integriert, denn Niveau und Maßstab sind durch die mit in die Berechnung eingegangene vollständige Varianz-Kovarianz-Matrix der Ausgleichung des DSGN 76 an die vier Absolutstationen des DSGN 76 angeschlossen und über 11 Schwerestationen im ISGN 71 verankert; sie beziehen sich somit auf das globale Schwerebezugssystem des ISGN 71.

Die Punktdichte dieses Netzes entspricht in etwa der des früheren Lagefestpunkt-Netzes 1. Ordnung (sog. TP-Netz), das sind in Bayern ohne Sicherungspunkte (jeder Punkt hat zwei bis drei Exzentren) 80 SFP 1. Ordnung, was einen durchschnittlichen Punktabstand von 100 km ergibt. Auf die Gesamtfläche der alten Bundesländer bezogen, umfasst das DHSN 82 hingegen 280 Festpunkte.

Die Schweredifferenzen wurden in Doppelter Differenzmessung bei gleichzeitigem Einsatz von vier Relativgravimetern gemessen. Die Genauigkeit der Schwerewerte der Festpunkte 1. Ordnung (SFP 1) liegt bei $8 - 13 \times 10^{-3}$ mGal.

Die Netzausgleichung, in die ca. 12 000 Beobachtungen mit ca. 4 000 Unbekannten eingegangen sind, wurde in einem Stück durch die Rechenstelle des Hessischen Landesvermessungsamtes durchgeführt.

Die Netzanordnung besteht aus Drei- und Vierecken, und als Vermarkung dienen einnivellierte TP-Pfeiler oder an geschützten Stellen, wie z.B. in Vorräumen von Leichenhäusern und Kirchen, eingebrachte Stehneten, die anschließend einnivelliert wurden.

Der Schwerstatus ist identisch mit dem des DSGN 76.

Deutsches Schweregrundnetz 1994 (DSGN 94)

Nach der Wiedervereinigung Deutschlands fasste die Deutsche Geodätische Kommission (DGK) 1994 den Beschluss, das Deutsche Schweregrundnetz (DSGN 76) mit einer Erweiterung auf die Bundesländer in Ostdeutschland neu zu messen. Dabei sollten fortgeschrittene Entwicklungen in der gravimetrischen Messtechnik, wie es z.B. das FG5 der amerikanischen Firma Micro-g Solutions, Inc. darstellt, zum Einsatz kommen.

Nach den Richtlinien der DGK wurde in den Jahren 1995/1996 das DSGN 94 in 30 Punktgruppen gemessen, mit zwei, maximal drei bestimmten Exzentren für jede Punktstation, wobei für die Durchführung der Arbeiten wiederum das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (bis August 1997 Institut für Angewandte Geodäsie) beauftragt wurde.

Als Kontrolle für die Absolutmessungen sowie für die Bestimmung der Vertikalgradienten auf den Zentren und die Schweredifferenzen zwischen Zentren und Exzentren wurden zusätzliche Messungen mit drei LaCoste & Romberg-Gravimetern und einem ScintrexCG-3M durchgeführt. Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurde mit diesen vier Relativgravimetern das gesamte Netz durch zusätzliche Messungen überprüft.

Weitere Kontrollmessungen führte das Institut für Erdmessung der Universität Hannover auf fünf Stationen mit dem Absolutgravimeter JILAg-3 (Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder; CO, USA), das im Aufbau seinem Nachfolgemodell, dem FG5-Gravimeter sehr ähnelt, zeitgleich durch.

Für die Schwerewerte der Absolutmessungen wurde dabei eine Genauigkeit von besser als 2×10^{-3} mGal erreicht, während die für die Exzentren bei 7×10^{-3} mGal liegt.

Ein Vergleich des DSGN 94 mit dem DSGN 76 zeigte einen systematischen Schwereunterschied von ungefähr 16×10^{-3} mGal, mit den kleineren Werten für das DSGN 94.

Aufgrund von vermuteten Schwereänderungen durch z.B. starke Grundwasserschwankungen und eventuell bei der Messung (im DSGN 76) aufgetretene und nicht

registrierte Zentrierungsfehler wurden sieben Stationen aus dem Vergleich genommen, und so ergab sich eine mittlere Niveaushiftung des DSGN 94 vom DSGN 76 von $- 19 \times 10^{-3}$ mGal.

Dem DSGN 94 wurde der Schwerestatus 130 zugesprochen.

Deutsches Hauptschwerenetz 1996 (DHSN 96)

In der ehemaligen DDR gab es ein dem DHSN 82 vergleichbares Netz 1. Ordnung: das in den sechziger Jahren angelegte Staatliche Gravimetrische Netz 1. Ordnung (das SGN existierte in den Ordnungen 1 - 4 im System 71 mit Fundamentalpunkt Potsdam; die Dichte lag bei einem Gravimeterpunkt pro $1,5 \text{ km}^2$). Es bestanden jedoch erhebliche Genauigkeitsunterschiede zwischen beiden Netzen (die Genauigkeit in den Ordnungen 1 - 4 des SGN betrug $0,05 - 0,10$ mGal), die ein Verschmelzen des DHSN 82 mit dem SGN 1. Ordnung zu einem neuen Netz durch Verbindungsmessungen nicht so ohne Weiteres zuließen. Dies war der Grund für die Erweiterung des DSGN 76 auf das Gebiet der neuen Bundesländer. Die Punkte des neu entstehenden Netzes sollten identisch mit den Schwerfestpunkten des SGN 1. Ordnung sein, um die nachfolgenden Ordnungsstufen (SGN 2. - 4. Ordnung) ins neue System zu integrieren.

In den Jahren 1995 bis 1996 wurden in den neuen Bundesländern im Bereich des SGN 1. Ordnung Messungen mit Relativgravimetern zwischen den Grundnetzpunkten durchgeführt, zudem zwischen beiden Netzen ausreichend viele zusätzliche Verbindungen entlang der Grenze zur ehemaligen DDR geschaffen. Die Ausgleichung der Messungen erfolgte im Niveau des DSGN 94 mit dem Schwerestatus 130 und schließt dessen Stationen mit ein.

Dieses neu entstandene „Deutsche Hauptschwerenetz 1996“ (DHSN 96) besteht somit aus dem unverändert beibehaltenen Teil des DHSN 82 (alte Bundesländer) und den neu durchgeführten Schweremessungen in den östlichen Bundesländern. Die Niveaushiftungen vom DHSN 82 im DSGN 94 zum DHSN 82 im DSGN 76 ergaben zwischen $- 0,028 \pm 0,002$ mGal (in Schleswig-Holstein) und $- 0,015 \pm 0,001$ mGal (in Baden-Württemberg und Bayern) und sind dem DSGN 76 anzulasten. Deshalb kam es zu dem Beschluss durch das Plenum der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) im Oktober 1999, das Niveau des DHSN 96 (Schwerestatus 130) um $0,019$ mGal gegenüber dem des DHSN 82 (Schwerestatus 100) zu senken.

Das quadratische Mittel der Standardabweichungen der ausgeglichenen Schwerewerte beträgt $\pm 0,005$ mGal.



Bild 13: Die Vermarkungen im DSGN 1976, im DSN 1962 und DHSN 1996

Bayerisches Schwerenetz 2. Ordnung

In Bayern gibt es die Schwernetze der Ordnungen 1 bis 3, wobei ein Netz immer die Verdichtung der darüber liegenden Ordnung darstellt. Das Schwerenetz 1. Ordnung ist der Bayerische Anteil des DHSN 96.

Die Länder legten die Schwerenetze 2. und 3. Ordnung selbständig nach den Richtlinien des Arbeitskreises Präzisionsnivellement (AK Niv) der AdV an.

Das Schwerenetz 2. Ordnung wurde im Zeitraum von 1980 - Beginn der Erkundungs- und Vermarktungsarbeiten - bis 1990 geschaffen. Die der in der 1. Ordnung gleichenden Anordnung ist als Flächennetz mit Dreiecks- und Viereckskonfiguration bearbeitet. Für die Vermarktung wurden - wiederum wie in der 1. Ordnung - anfangs Stationen an geschützten Orten in festem Untergrund (Pflaster- und Betonflächen) eingebracht und einnivelliert. Später ging man dazu über, fast ausschließlich Nivellementpunkte (NivP) entlang der Nivellementlinien 1. bis 3. Ordnung (z.B. an Gebäuden, Brücken und Niv-Pfeilern) des Bayerischen Hauthöhennetzes (DHHN 12) als Schwerefestpunkte zu verwenden. Das Gravimeter wurde in deren Nähe (in einem Abstand von bis zu 10 m exzentrisch) aufgestellt und der Schwerewert bestimmt. Diese Gravimeterstandorte blieben unvermarkt, wurden jedoch mit einem roten Punkt markiert. Lage und Höhe wurden dabei relativ zu dem als Bezugspunkt verwendeten Nivellementpunkt gemessen, dessen Koordinaten ebenso für den Schwerefestpunkt gelten. Zu einem kleinen Prozentsatz wurden ebenfalls einnivellierte TP-Pfeiler als Vermarktung verwendet. Die Punktdichte im Schwerenetz 2. Ordnung beträgt 1 SFP pro 100 km², was in etwa der Fläche einer TK 25 entspricht. Die

Schwerfestpunkte 2. Ordnung (SFP 2) haben dementsprechend einen durchschnittlichen Abstand von 10 km. Bayernweit umfasst das Netz 700 Punkte. Dabei war die Art der Bestimmung bei gleichzeitigem Einsatz von 2 Gravimetern wiederum die Doppelte Differenzmessung. Die Punktgenauigkeit der Schwerewerte im Netz 2. Ordnung liegt bei 9 - 11 μGal .

Bayerisches Schwerenetz 3. Ordnung

Der Aufbau der letzten Verdichtungsstufe des Schwerfestpunktfeldes in Bayern fand in drei Schritten statt:

In den Jahren von 1984 bis 1986 wurden auf den Nivellementlinien 1. Ordnung zur Berechnung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 Schwerfestpunkte festgelegt und schweremäßig bestimmt. Als Vermarkung dienten, wie bereits im Schwerfestpunktnetz 2. Ordnung, Nivellementbolzen an Gebäuden, Brücken und Pfeilerbolzen. In einem zweiten Schritt wurden zwischen 1990 und 1995 auf den Nivellementlinien 2. Ordnung und in einem etwas größerem Abstand auf den Nivellementlinien 3. Ordnung wiederum zur Bestimmung von Normalhöhen für die NivP Schwerfestpunkte festgelegt und eingemessen.

Dabei erfasste man vorwiegend die Knickpunkte im azimuthalen Verlauf der Nivellementlinien sowie des Geländeprofiles (Kuppen und Tallagen), ebenso wie die Knotenpunkte und Schleifen der Linien sowie die Enden deren Äste.

Der Abstand der Schwerfestpunkte liegt zwischen 1 und 5 km und beträgt durchschnittlich ca. 2,5 km.

Zusätzlich bezog man eindeutig identifizierbare Schwerfestpunkte des DSN 62 für dessen Überprüfung im neuen Netz mit ein.

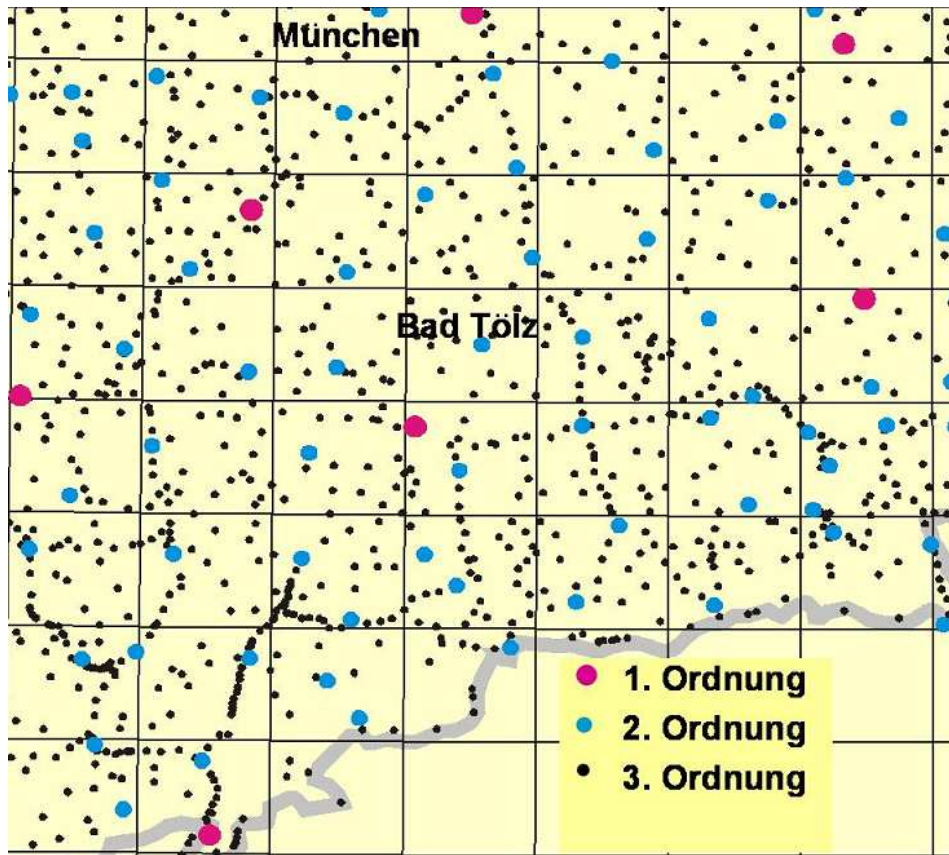
In einem letzten Schritt, ab 1996 fanden für eine gleichmäßig flächenhafte Verteilung der SFP in nivellementlinienarmen Gebieten, meist auf Hügeln und Bergen oder in Waldflächen (besonders in den Mittelgebirgen und Alpen), einnivellierte TP-Pfeiler als Schwerfestpunkte Verwendung.

Die flächenhafte Verteilung dient insbesondere der Geoidbestimmung, die einen durchschnittlichen Abstand der SFP von 2 km fordert (für ein sog. Zentimeter-Geoid). Die Messungen wurden zur Kontrolle in doppelter Schleifenmessung durchgeführt, wobei die SFP der höheren Ordnungen als Ausgangspunkte dienten.

Bei einer Forderung von einem Schwerfestpunkt pro 4 km^2 ergibt das, auf die Fläche Bayern's hochgerechnet, ca. 17 600 Punkte; das sind knapp 1,4 Schwerfestpunkte pro Flurkarte 1:5000.

Die Standardabweichung der Schwerewerte liegt bei ungefähr $\pm 15 \mu\text{Gal}$.

Bild 14: SFP-Feld in Bayern (Ausschnitt)



Stand: Juni 2008

SFP 1. Ordnung 321

SFP 2. Ordnung 699

SFP 3. Ordnung 10267

Summe 11287

davon auf TP 2488

Forderung: 1 SFP / 4 km²; ergibt für Bayern rund 17.600 SFP

Geodätische Grundnetzpunkte (GGP)

Das Plenum der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland (AdV) beschloss auf ihrer Sitzung in Wismar im Herbst 2004: Der geodätische Raumbezug des amtlichen Vermessungswesen in Deutschland soll durch ein bundeseinheitliches homogenes Festpunktfeld hergestellt werden, das sich aus den Komponenten Grundnetzpunkte, Referenzstationspunkte, Höhenfestpunkte und Schwerefestpunkte zusammensetzt. Die geodätischen Grundnetzpunkte (GGP) sind in Lage, Höhe und Schwere bestimmt und dienen der physischen Realisierung und Sicherung von Lage, Höhe und Schwere in der Landesvermessung.

Die die GGP kennzeichnenden Eigenschaften sind:

- Punktabstand bis 30 km
- 3D-Vermarkung
- Mindestens 2-Punktesicherung
- Satellitengeodätisch hochgenau bestimmte ETRS89-Koordinaten
- Anschluß an das amtliche Höhenfestpunktfeld mittels Präzisionsnivelllement im System DHHN
- Periodische Überwachung
- Erhaltungsmaßnahmen und Ersatzpunktbestimmung bei Zerstörung
- Anschluss an das amtliche Schwerefestpunktfeld

Die zu erfüllenden Kriterien für Genauigkeit und Zuverlässigkeit der GGP sind:

- Die Standardabweichung der Lage soll 5 mm nicht überschreiten
- Der zulässige Streckenwiderspruch für den Betrag der Summe der korrigierten Höhenunterschiede aus Hin- und Rückmessung ist: $0,5 \times S \pm 1,5 \times \sqrt{S}$
- Die mittlere Standardabweichung der Schwerewerte darf $12 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ nicht überschreiten.
- Für die GPS-Messungen (GNSS) sollen die Beobachtungszeiten von 2 x 12 Stunden betragen

Für die Bestimmung der Lage in ETRS89-Koordinaten dient das GNSS-Netz (Global Navigation Satellite System). Es wird zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) in einer sechs Wochen dauernden Kampagne in den Monaten Mai bis Juli des Jahres 2008 gemessen.

Die Lage der GNSS-Punkte ist auf oder in der Nähe der Nivellement-Linien des DHHN (mit einem maximalen Abstand von 2 km).

Die höhenmäßige Realisierung wird durch die Wiederholungsmessung des DHHN mittels Präzisionsnivelllement mit der für das Nivellement 1. Ordnung geforderten Genauigkeit durchgeführt. Sie findet zwischen 2006 und 2011 statt, wobei 80 % der Nivellements Schleifen neu gemessen werden.

Neben den klassischen Nivellements finden seit 2006 epochengleich Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A-10 der Firma Micro-g Solutions Inc. durch das BKG statt. Auf bayerischem Gebiet sind dafür fünfzehn sogenannte Absolutschwerefestpunkte geschaffen worden: das sind 750 kg schwere Granitpfeiler (50cm x 50 cm

x 100 cm) mit einem zentrisch angebrachten kugelförmigen Edelstahlbolzen. Diese Festlegungen sind gleichzeitig GGP.

Zusätzlich der Absolutmessungen der Schwere finden in Bayern seit 2007 zeitgleich mit den Nivellementarbeiten auf den Neubestimmten Nivellementlinien Gravimetermessungen mit einem Relativgerät der Firma LaCoste & Romberg statt.

Schwerewerte sind für die Berechnung von physikalischen Höhen notwendig (wie oben schon ausgeführt), wie z.B. der aktuellen Gebrauchshöhen über Normalhöhen-Null (NHN) im Deutschen Haupthöhennetz 1992 (DHHN92); sie werden ebenfalls für die Transformation von über GNSS-Messungen bestimmten „ellipsoidischen Höhen“ in Höhen eines bestimmten Höhensystems benötigt.



Bild 15: Der 1997 geschaffene Absolutschweresfestpunkt in Fürth, Südstadtpark

Literatur:

- Bernhardt, H., Schwindl, C. & Bauschke N.: Gravimetrische Untersuchungen des Untergrund am Hohenstaufen; Feldpraktikum 2007; LMU München
- Boedecker, G.: Die Anlage des Schweregrundnetzes 1976 der Bundesrepublik Deutschland (DSGN 76); Mitteilungsblatt des DVW; Heft 3/1979
- Boedecker, G., Völksen C., Wende W.: Die Schwere auf den Alpengipfeln; D1/2006 Akademie Aktuell
- Decker W.: Schweremessung, Stand und Entwicklung; Mitteilungsblatt des DVW Baden-Württemberg; Heft 1/1996
- Jordan/Eggert/Kneißl: Handbuch der Vermessungskunde; Stuttgart 1967
- Sytynakowski A.: Vergleich verschiedener Methoden zur Messung der Fallbeschleunigung; Fach-Arbeit des Erasmus-Grasser-Gymnasiums München 2002
- Torge W.: Geodäsie; deGruyter Lehrbuch; Berlin 2003
- Weber D.: Der Aufbau eines Schwerefestpunktfeldes in Bayern; Mitteilungsblatt des DVW, Heft 3/1979
- Weber D.: Die Vereinheitlichung des Höhen- und Schwerenetzes in Deutschland; AVN 6/1991
- Weber D.: Die Schweremessungen der Landesvermessung in Deutschland; ZfV 11/1998
- Wikipedia - Online-Enzyklopädie

Aus dem Internet:

www.geo.uni-jena.de/moxa/sg.html-12k: das supraleitende Gravimeter CD-034; Observatorium Moxa; April 1999

www.fs.wetzell.de: das supraleitende Gravimeter

www.geomatrix.co.uk/CG5.htm-11k: Scintrex CG5 Gravity meter

www.allsat.de/download/ALLSAT-OPEN/2005/Stuerze_BADW_ALLSAT.pdf: Ein Einblick
in die Fluggravimetrie