

Einführung

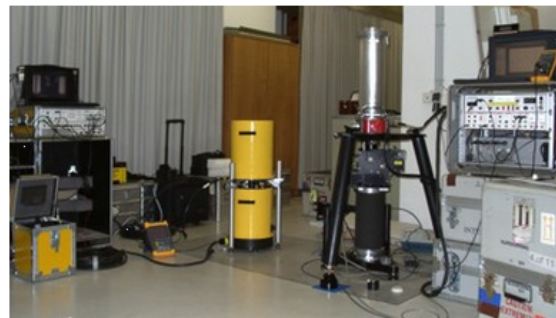
Die gravimetrischen Arbeiten des BKG haben zum Ziel, einen präzisen und einheitlichen Schwerestandard für die Bundesrepublik Deutschland zu realisieren und aufrecht zu erhalten sowie Basisdaten für Schwereanomalien und Geoidmodelle sowie zur Untersuchung von Massen- und Höhenänderungen bereitzustellen.

Es werden hierzu Messungen mit stationären transportablen Absolut- und Federgravimetern sowie mit Supraleitenden Gravimetern ausgeführt. Dauerregistrierungen erfolgen in Deutschland in Bad Homburg und Wettzell. Regelmäßige Überwachungsmessungen mit dem Absolutgravimeter erfolgen auf den Stationen des Deutschen Schweregrundnetzes und in kombinierten geodätischen Netzen in Deutschland und Europa. Weitere Schweremessungen sind notwendig zur Absicherung des internationalen Schwerestandards und zur Einbindung in das globale Referenzsystem.

Gravimeter

Absolutgravimeter

Der freie Fall einer Testmasse wird mit hoher Genauigkeit aufgezeichnet. Um nicht-gravitative Störeinflüsse wie Luftwiderstand, Auftrieb etc. zu minimieren, bewegt sich die Testmasse in einer evakuierten Kammer. Die "absolute" Bestimmung der Schwerebeschleunigung ergibt sich aus der Verwendung von physikalischen Standards höchster Genauigkeit: einem Rubidium-Normal für die Zeitmessung und einem Jod-stabilisierten Laser für die Wegmessung. Mit dem Absolutgravimeter FG5 (Hersteller Micro-g LaCoste Inc., USA), das den momentan bestmöglichen technischen Entwicklungsstand repräsentiert, lassen sich unter günstigen Umgebungsbedingungen Messgenauigkeiten von $\pm 20 \dots 30 \text{ nm/s}^2$ ($\pm 2 \dots 3 \text{ } \mu\text{Gal}$) erreichen. Dies entspricht einer relativen Genauigkeit von $\pm 2 \dots 3 \times 10^{-9}$. Das Absolutgravimeter A10 vom gleichem Hersteller mit einer Messgenauigkeit von $\pm 100 \text{ nm/s}^2$ wird am BKG für Feldmessungen eingesetzt.



Absolutgravimeter A10 (links) und FG5 (rechts)

Absolutgravimetermessungen vervollständigen die geodätischen Bezugssysteme

- durch den Aufbau eines absoluten gravimetrischen Standards in einem erdgebundenen Referenzsystem,
- und ermöglichen den unabhängigen Nachweis vertikaler Punktverschiebungen oder Massenvariationen, die beispielsweise durch tektonisch bedingte Bewegungen der Erdkruste, nacheiszeitliche Landhebungen oder Änderungen des Meeresniveaus verursacht werden.

Hierbei wird ein besonderes Gewicht auf die Kombination mit Nivellements und den geodätischen Raumverfahren (VLBI - Very Long Baseline Interferometry, SLR - Satellite Laser Ranging und GNSS - Global Navigation Satellite Systems) gelegt.

Supraleitende Gravimeter

Durch Gravimeter werden auch die zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes erfasst. Während in herkömmlichen Relativgravimetern die Schwerebeschleunigung mit einer an einer Feder aufgehängten Probemasse gemessen wird, dient im supraleitenden Gravimeter (SG) das konstante Magnetfeld einer supraleitenden Spule als Vergleichskraft. Der Probekörper ist eine supraleitende Hohlkugel, deren Position in einem Regelsystem konstant gehalten wird. Der Strom in diesem Regelkreis wird kontinuierlich gemessen und hochauflösend digitalisiert. Supraleitende Gravimeter zeichnen sich durch eine sehr hohe Auflösung des Messsignals ($< 0.1 \text{ nm/s}^2$) und eine geringe instrumentelle Nullpunktdrift aus. Durch die Verwendung supraleitender Spulen, in denen nach einer Initialisierung Ströme dauerhaft und konstant fließen, wird eine Langzeitstabilität erreicht, die geräteabhängig zwischen 0 und 50 nm/s^2 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 ganztägigen Bereich bis hin zur Variation der Zentrifugalbeschleunigung infolge der Polbewegung mit Perioden von 365 und 435 Tagen (Chandler-Periode) und zu langperiodischen Gezeiten mit einer Periodendauer von 18.6 Jahren.



Supraleitendes Gravimeter SG30 in Wettzell

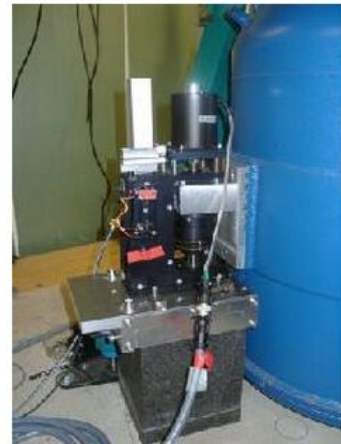
Mit der Beobachtung der zeitlichen Schwerefeldvariationen werden folgende Ziele verfolgt:

- ▣ Hochgenaue Erfassung der Gezeiten der festen Erde zur Ableitung elastischer Parameter des Erdkörpers,
- ▣ Untersuchung der Attraktions- und Deformationswirkungen in Folge ozeanischer, atmosphärischer und hydrologischer Massenverlagerungen,
- ▣ Erfassung von Schwereänderungen infolge der Polbewegung,
- ▣ Detektion von seismisch induzierten Eigenschwingungen der Erde,
- ▣ Kontrolle des Schwerestands durch Vergleiche und Kombination mit Absolutschweremessungen.

Eichplattform

Die beim BKG entwickelte "Frankfurter Gravimeter-Eichplattform" nutzt künstlich erzeugte Beschleunigungen zur Kalibrierung von Relativgravimetern und wurde speziell für zur Untersuchung Supraleitender Gravimeter konzipiert.

Das Eichsystem besteht aus drei von Schrittmotoren angetriebenen Spindelböcken, mit deren Hilfe das zu testende Gravimeter in einer sinusförmigen Bewegung synchron angehoben und gesenkt werden kann. Abhängig von der Amplitude der Bewegung und ihrer Periodenlänge ergeben sich der Erdanziehung überlagerte künstliche Beschleunigungen mit wählbarer Amplitude und Frequenz. Da der Betrag der Beschleunigung und die Periodenlänge bekannt sind, lassen sich der Eichfaktor und die Frequenzübertragungsfunktion des Supraleitenden Gravimeters ableiten.



Spindelblock der Frankfurter Gravimeter-Eichplattform

↗ [nach oben](#)

Deutsches Schwerereferenzsystem

Zur langfristigen Absicherung des Deutschen Schwerereferenzsystems in Niveau und Maßstab werden regelmäßig Schwereabsolutmessungen in Kombination mit den Dauerregistrierungen der supraleitenden Gravimeter in Wettzell, Bad Homburg und Moxa (Friedrich-Schiller-Universität Jena) durchgeführt. Die Messungen erfolgen im Allgemeinen zweimal pro Jahr und ermöglichen hiermit die Überwachung der Eichfaktoren und instrumentellen Driften der Supraleitenden Gravimeter (SG). Durch die Verknüpfung der Daten lassen sich instrumentelle Nullpunktdriften des SG und säkulare Schwereänderungen an der Station voneinander trennen.

Deutsches Schweregrundnetz 1994 (DSGN94)

Das im Jahre 1994 bestimmte Deutsche Schweregrundnetz mit 30 Absolutschwererepunkten legt das Datum für die nationalen Schwerenetze der Landesvermessung fest. Es wurde nach der deutschen Wiedervereinigung auf Beschluss der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) durch Neuvermessung des Deutschen Schweregrundnetzes 1976 und Erweiterung auf die neuen Bundesländer bestimmt.

Dabei wurde dem BKG die Durchführung und Auswertung der Messungen übertragen. Auf allen Hauptpunkten Schweregrundnetzes wurden Beobachtungen mit dem Absolutgravimeter FG5-101 ausgeführt. Zur Kontrolle der Schwereabsolutmessungen in den Neuen Bundesländern, zur Bestimmung der Vertikalgradienten auf den Hauptpunkten und zur Verbindung der Hauptpunkte mit den Sicherungspunkten wurden Schweredifferenzen mit 4 Relativgravimetern gemessen. Zusätzlich führte das Institut für Erdmessung, Universität Hannover auf 5 Stationen Messungen mit dem JILag-3 Absolutgravimeter durch. Die Schwerewerte auf den Absolutschwererepunkten können mit einer Genauigkeit von $\pm 50 \text{ nm/s}^2$ angegeben werden.

Der Vergleich mit dem DSGN76 ergab eine mittlere Abweichung von 160 nm/s^2 zwischen den beiden Netzen, die auf die Messungen mit einem weniger genauen Absolutgravimeter auf vier Grundnetzstationen (Hamburg, Braunschweig, Wiesbaden, München) zurückzuführen ist. Eine Änderung des Maßstabs konnte aus dem Vergleich nicht abgeleitet werden.

Die Ergebnisse und Punktbeschreibungen des Deutschen Schweregrundnetzes DSGN94 sind in der Reihe B, Nr. 309, der Deutschen Geodätischen Kommission veröffentlicht. Die Punktbeschreibungen zum DSGN94 sind auch als Download verfügbar - [DSGN94 Punktbeschreibung \(pdf 15794-KB\)](#).

Das BKG trägt die Verantwortung für die Erhaltung und Laufendhaltung des Deutschen Schweregrundnetzes (DSGN94) und bezieht die Stationen in seinen Überwachungszyklus ein.



Das Deutsche Schweregrundnetz 1994 - DSGN94
(Klicken zum Vergrößern)

Deutsches Hauptschwerenetz 1996 (DHSN96)

Das Deutsche Hauptschwerenetz 1996 (DHSN96) der deutschen Landesvermessung entstand als Erweiterung des Deutschen Hauptschwerenetzes 1982 (DHSN82) unter Einbeziehung aktueller Schweremessungen der Länder Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.

Das DHSN82 wurde in den westlichen Bundesländern in den Jahren 1978 bis 1982 beobachtet. Die Länder Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen führten die für eine Erweiterung erforderlichen Messungen im Jahre 1996 und den folgenden Jahren nach den auf der AdV-Tagung 63/78 beschlossenen Richtlinien (Richtlinien SFP-Erlass und SFP-Dienstanweisung) aus. Das DHSN96 schließt die Stationen des Schwergrundnetzes 1994 der Bundesrepublik Deutschland (DSGN94) mit ein.

Die Berechnung des DHSN96 erfolgte beim BKG nach Vorgaben des AdV Arbeitskreises Grundlagenvermessung. Bei der Ausgleichung der Messungen des DHSN82 im Niveau DSGN94 für die alten Bundesländer ergab sich eine mittlere Niveauverschiebung von $-0.197 \pm 0.003 \mu\text{m/s}^2$ zum DHSN82 (Niveau DSGN76). Die Niveauverschiebungen, aus identischen Punkten der einzelnen Bundesländer berechnet, differieren zwischen $-0.28 \pm 0.02 \mu\text{m/s}^2$ (Schleswig-Holstein) und $-0.15 \pm 0.01 \mu\text{m/s}^2$ (Baden-Württemberg, Bayern). Diese Niveauverschiebung ist dem DSGN76 anzulasten. Deshalb legte das Plenum der AdV auf der 105. Tagung im Oktober 1999 in Berlin fest, dass das DHSN96 (Schwerestatus 130) in den alten Bundesländern einheitlich durch Subtraktion von $0.19 \mu\text{m/s}^2$ von den Schwerewerten des DHSN82 (Schwerestatus 100) zu berechnen ist.

Die Berechnung der Schwerewerte des DHSN96, Teil "Neue Bundesländer" erfolgte durch Ausgleichung der Gravimetermessungen 1. Ordnung der Jahre 1996/97 mit Anschluss an 15 Absolutpunkte des DSGN94.

Dieses Netz besteht neben den Absolutpunkten aus 91 Neupunkten in den neuen Bundesländern und 23 Festpunkten des DHSN82 entlang der Landesgrenzen. Das quadratische Mittel der Standardabweichungen der ausgeglichenen Schwerewerte beträgt $\pm 0.05 \mu\text{m/s}^2$.



Deutsches Hauptschwerenetz 1996 mit Schwergrundnetzpunkten (Klicken zum Vergrößern)

GOCE-Gravitationsfeldanalyse II (GOCE GRAND II)

Im Rahmen des Forschungsprogramms "Geotechnologien" wurde das Projekt "GOCE-Gravitationsfeldanalyse II" gemeinsam mit anderen deutschen Partnern bearbeitet. Das Akronym GOCE steht für "Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer" - eine Satellitenschwerefeldmission der ESA (Europäischen Weltraumorganisation) und GRAND für Gravitationsfeld-Analyse Deutschlands.

Ziel des BKG-Projektbeitrags war die Überprüfung und Verbesserung vorhandener Schweredaten in Deutschland und hierauf aufbauend die Kombination terrestrischer Geoidmodelle mit Satellitenschwerefeldmodellen sowie eine Validierung der Ergebnisse. Hierbei ergänzen die terrestrischen Schweremessungen die Satellitenschwerefeldmodelle um kurzwellige Anteile des Geoids (Grad und Ordnung >250). Von 2006 bis 2008 wurden mit dem Absolutgravimeter A10-012 bundesweit Messungen auf 100 Feldstationen des Schwerefestpunktfeldes zur Überprüfungen der vorhandenen terrestrischen Daten durchgeführt und im September 2008 abgeschlossen. Zur Absicherung der Messgenauigkeit fanden regelmäßige Vergleiche auf der Referenzstation in Bad Homburg statt.

Die Ergebnisse der Feldmessungen sind dazu geeignet, die am BKG vorhandene Schweredatenbasis zu untersuchen. Diese Datenbasis stellt die Grundlage der Berechnung eines Quasigeoidmodells für Deutschland dar. Auf Grundlage der nun vorliegenden Absolutschweremessungen wird die Homogenität der Daten unterschiedlicher Herkunft, Messverfahren und Genauigkeit geprüft. Systematische Unterschiede im Niveau können dadurch aufgedeckt und beseitigt bzw. eine Strategie zur Gewichtung innerhalb der Datenbasis abgeleitet werden. Das Projekt GOCE GRAND II wurde unter Förderkennziffer 03F0422A vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Sonderprogramm Geotechnologien gefördert.



Punkte des DHSN96, für die im Rahmen des Projektes GOCE GRAND II der Absolutschwerewert neu bestimmt wurde (Klicken zum Vergrößern)

Quelle: http://www.bkg.bund.de/nn_147352/DE/Bundesamt/Geodaesie/RefSys/RefSchwere/Schwere03__node.html

Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN)

Von 2009 bis 2011 wurden im Rahmen der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes - DHHN Absolutschweremessungen mit zwei Absolutgravimetern A10 des BKG auf 100 Feldstationen des Haupthöhennetzes durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland - AdV. Das AdV-Projekt "DHHN-Erneuerung 2006-2011" umfasst die GNSS-Vermessung von ca. 250 größtenteils neu angelegten Punkten, Wiederholungsmessungen von ca. 80% der Nivellementslinien des DHHN92 mittels Präzisionsnivellement sowie die Absolutschweremessungen auf 100 der 250 Punkte. (siehe auch [Referenzsysteme Höhe - Modernisierung des nationalen Höhenreferenzsystems](#))

Auf den Absolutschwerestationen des DHHN-Netzes wurden zusätzlich relative Schweremessungen zur Bestimmung des vertikalen Schweregradienten durchgeführt. Zur Absicherung der Messgenauigkeit der eingesetzten Absolutgravimeter fanden wiederholte Vergleiche auf der Referenzstation in Bad Homburg sowie Überprüfungen der Instrumentenstandards (Laser, Atomuhr) statt. Nach Auswertung der Daten werden die Ergebnisse an die DHHN-Projektgruppe sowie die auftraggebenden Bundesländer weitergeleitet, um diese konform zu den AFIS-Regeln in die entsprechenden Datenbanken einzupflegen.

Ergänzende Absolutschweremessungen werden seit 2009 im Auftrag der Länder durchgeführt, um ein Netz langzeitstabiler Geodätischer Grundnetzpunkte einzurichten. Es wird erwartet, dass auf diese Weise für ca. 90 weitere Punkte der 250 DHHN-Punkte Absolutschweremessungen erhalten werden.



Punkte des DHHN, für die im Rahmen der Erneuerung dieses Netzes der Absolutschwerewert bestimmt wurde (Klicken zum Vergrößern)

Europäisches Schwerereferenzsystem

Im Zusammenhang mit der politischen und wirtschaftlichen Annäherung Europas wurden bisher als geheim eingestufte gravimetrische Daten auch in Zentral- und Osteuropa frei verfügbar. Die Differenzen zwischen den unterschiedlichen Schwere-Referenzsystemen in den Ländern dieser Region sind jedoch so groß, dass davon sowohl Geoidmodelle als auch das nationale Höhenreferenzsystem entscheidend beeinflusst sein können. Durch absolute Schweremessungen mit 5 Geräten auf 17 Stationen in 12 Ländern wird ein einheitlicher Schwerestandard eingeführt. An dem Projekt UNIGRACE (Unification of Gravity Systems in Central Europe - Vereinheitlichung der Schweresysteme in Mitteleuropa) waren Institutionen aus 12 Ländern beteiligt.

Im Projekt wurde eine enge Zusammenarbeit zwischen den mit Absolutgravimetern ausgestatteten Ländern (Deutschland, Finnland, Frankreich, Österreich und Polen) und den Ländern mit Relativgravimetern (Bulgarien, Tschechische Republik, Ungarn, Italien, Rumänien, Slowakei, Slowenien, Kroatien) erzielt, die sich auf die Auswahl und Vorbereitung der Referenzstationen, die Durchführung der Messkampagnen sowie den Anschluss der nationalen gravimetrischen Netze bezog. Die Stationen wurden so ausgewählt, dass sich in jedem beteiligten Land mindestens eine Station in einer geologisch stabilen Region befand. Länder mit Zugang zur Meeresküste erhielten eine weitere Station in der Nähe eines Meerespegels. Hieraus ergab sich eine Gesamtzahl von 17 Stationen, deren Schwerewerte absolut bestimmt wurden.

Die Europäische Kommission förderte das Projekt im Rahmen ihres INCO/COPERNICUS-Programms.



Absolutgravimeterstationen im UNIGRACE Projekt (Stand 2000)

Globales Schwerereferenzsystem

Internationale Gravimetervergleiche

Durch die Einbindung in die internationalen Vergleichskampagnen beim Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sevres (Frankreich) wurde der Anschluss an das Internationale Schwerereferenzsystem geschaffen. Deutschland trat der internationalen Meter-Konvention im Jahre 1875 bei. Mit Vergleichsmessungen der Absolutgravimeter wird die Anbindung an das im Jahre 1960 von der elften Generalkonferenz über die Maßeinheiten und Gewichte eingeführte Internationale System der Einheiten (SI - *Système International d'Unités*) verwirklicht. Das BKG nimmt seit 1994 regelmäßig mit seinem Absolutgravimeter FG5-101 an den internationalen Vergleichen der Absolutgravimeter teil.

Regionale Vergleichsstationen für Absolutgravimeter

Zusätzlich zu den internationalen Vergleichen für Absolutgravimeter beteiligt sich das BKG auch an regionalen Vergleichen im europäischen Raum. Die beiden Gravimeterstationen in Wettzell und Bad Homburg wurden zu Regionalen Schwerevergleichsstationen ausgebaut. Die Stationen bieten die Möglichkeit zu genauen Vergleichsmessungen von Absolutgravimetern, und durch die Kombination der Absolutschweremessungen mit den kontinuierlichen Registrierungen der Supraleitenden Gravimeter lässt sich die Zuverlässigkeit der Vergleiche weiter verbessern.

AGrav - Internationalen Datenbank für Absolutschweremessungen

Durch den Aufbau einer Internationalen Datenbank für Absolutschweremessungen unterstützt das BKG die internationale Kooperation auf dem Gebiete der Absolutschweremessungen und die Schaffung eines transparenten Internationalen Schwerereferenzsystems. Der Betrieb der Datenbank erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem BGI (Bureau Gravimétrique International), dem Internationalen Gravimetrischen Büro in Toulouse (Frankreich), und zählt damit zu den Services der IAG und des Internationalen Schwerefelddienstes. Sie wird an beiden Institutionen in identischer Weise vorgehalten und gegenseitig gespiegelt ([AGrav Datenbank am BKG](#)).

GGP – Global Geodynamics Project

Mit den Beobachtungsreihen der vier Supraleitenden Gravimeter des BKG in Wettzell, Bad Homburg, Medicina (Italien) und Concepcion (Chile) trägt das BKG zum internationalen Dienst des "Global Geodynamics Project GGP" ([Webseite des GGP](#)). Die Messdaten aller Stationen werden im Routinebetrieb überprüft, vorverarbeitet und dann als Rohdaten und als korrigierte Datensätze in die GGP-Datenbank eingestellt.