

ABSOLUTSCHWEREBEBOBACHTUNG

# Die Schwere auf den Alpengipfeln

HABEN SIE GEWICHTSPROBLEME? PROBIEREN SIE ES DOCH EINMAL MIT EINER REISE AUF DIE ZUGSPITZE!

VON GERD BOEDECKER,  
CHRISTOF VÖLKSEN,  
WERNER WENDE

Nehmen wir an, Ihre Waage zeigt im Keller der Akademie im Raum K9 auf einem dort markierten Punkt 80,00 kg an. Fahren Sie dann unverzüglich auf die Zugspitze, steigen dort auf einem bestimmten markierten Punkt auf die Waage, so werden Sie nur 79,9461349 kg ablesen. Haben Sie damit etwas gewonnen? Eher nicht: Die Waage misst eigentlich nur die Kraft, mit der Sie von der Erde angezogen werden. Die Skala zeigt nur dann Ihre Masse [kg] korrekt an, wenn die tatsächliche Schwere derjenigen des Eichlabors entspricht; die Schwere auf der Zugspitze ist jedoch wesentlich kleiner als in München.

## Was ist die „Schwere“?

Zunächst ist „Schwere“ die Summe aus der Massengravitation und der Beschleunigung des Beobachters, letztere für Beobachter auf einem erdfesten Punkt die Zentrifugalwirkung wegen der Erdrotation. Für die Gravitation reicht uns die Newtonsche Auffassung, nach der die Gravitation zwischen zwei Körpern den beiden Massen proportional und dem Abstandsquadrat umgekehrt proportional ist. Was die Gravitation am tiefsten Grunde der Erkenntnis ist, überlassen wir den Physikern und Philosophen. Gemessen wird die Schwere als spezifische Kraft je Masse [N/kg,

„Newton je kg“  $\sim (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{kg}$  oder als Beschleunigung [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]. Sie können also selbst entscheiden, ob es Ihrer Vorstellung mehr entspricht, mit jedem Kilogramm Ihres Körpergewichtes mit einer Kraft von 9,80722740 [N/kg, also Newton je Kilogramm Körpermasse] den Kellerfußboden zu drücken oder mit einer Beschleunigung von 9,80722740 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] sich von einem Höckerchen plumpsen zu lassen. Diese Dualität von Beschleunigung und spezifischer Kraft wird noch mehrfach aufscheinen.

„Schwere“, wie man sieht, ändert sich von Punkt zu Punkt, abhängig von

1. der Höhe wegen des Abstandes von den Erdmassen,
  2. der geographischen Breite wegen der Zentrifugalwirkung der Erdrotation,
  3. den Geländeformen und Gesteinsdichteveränderungen wegen der unterschiedlichen Gravitation.
- Die zeitlichen Variationen wegen
1. unterschiedlicher Stellung von Sonne und Mond,
  2. Ebbe und Flut,
  3. Luftdruck-Hoch und -Tief,
  4. Grundwasserveränderungen und Schnee Höhenänderungen,
  5. Hebung und Senkung der Erdkruste,
  6. Änderungen der Erdrotation etc.
- werden wir hier übergehen.

## Szenenwechsel zum Tegernsee

Würde es Sie bei einer Dampferfahrt über den Tegernsee beunruhigen zu erfahren, dass der Wasser-



BOEDECKER

spiegel am Südende 40 cm höher ist als am Nordende? Würde dann nicht der Tegernsee auslaufen? Was heißt „höher“? Dazu müssen wir das Thema Bezugssysteme, hier – Höhenbezugssysteme – streifen: Bezogen auf ein mittleres Erdellipsoid als geometrisch definierte Referenzfläche ist tatsächlich der Wasserspiegel um die „Lotabweichung“ geneigt – wegen des Massenüberschusses der Alpen südlich des Tegernsees. Für sehr viele Anwendungen – nicht nur den Kanalbau – ist es aber wichtig, eine physikalisch definierte Referenzfläche zu haben – dies ist das Geoid. Bezogen auf das Geoid ist der Tegernsee wieder eben. Wenn Ihr (GPS-)Satelliten navigations-

Abb. 1: Pause beim Transport des A-10-Absolutgravimeters.

empfänger ein Geoidmodul enthält, dann werden Sie am Süd- und am Nordufer gleiche Höhenwerte ablesen, sonst sehen Sie 40 cm Unterschied. Sie können sich nun vielleicht vorstellen, dass man diese Geoidinformationen aus den Schwerewerten berechnen kann.

**Genaueste Messungen**

Warum haben die Zahlenwerte oben so viele Stellen? Weil wir es so genau messen können! Übliche Gravimeter haben eine hinreichende Messgenauigkeit, um die Schwere an nur 3 cm übereinander liegenden Punkten unterscheiden zu können.

Abb. 2: Spezialgeräte sind noch genauer, für einige Anwendungen reicht eine

selbst genutzt, sondern nur die Abweichungen von der Normal-schwere eines Ellipsoides, die Schwereanomalien.

**Wie kann man die Schwere messen?**

Ein Relativgravimeter nutzt das Prinzip der Kraftmessung für eine konstante Masse mittels einer Federwaage. In dem auch uns verfügbaren La-Coste-Romberg Gravimeter (Eigentum des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts, DGFI) hängt eine kleine konstante Masse an einem horizontalen Waagebalken, der durch eine schräge Feder im Gleichgewicht gehalten wird. Durch Justierung wird nun

Für Absolut- und Relativschweremessungen wurden früher Pendelmessungen genutzt, d. h. über die Schwingungsdauer eines bewegten Pendels lässt sich ebenfalls die Schwere bestimmen. Ein Problem war die genaue Zeitmessung unabhängig von einer Pendeluhr. Für die Schweremessungen unserer Kommission zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die telegraphische Zeitübertragung genutzt. Die Kommissionsakten lassen aus der Korrespondenz über z. B. die Führen des Instrumentariums von der Bahnstation zum Schulhaus die Mühen erahnen. Mehrere Publikationen der Kommission berichten über die Beobachtungen, und 1930 erschien Schüttes *Karte der Schwereabweichungen von Süd-deutschland*. Pendelapparate und Reste der Zeittelegraphen stehen im Geodätischen Museum im Keller der Akademie; Besucher sind willkommen!

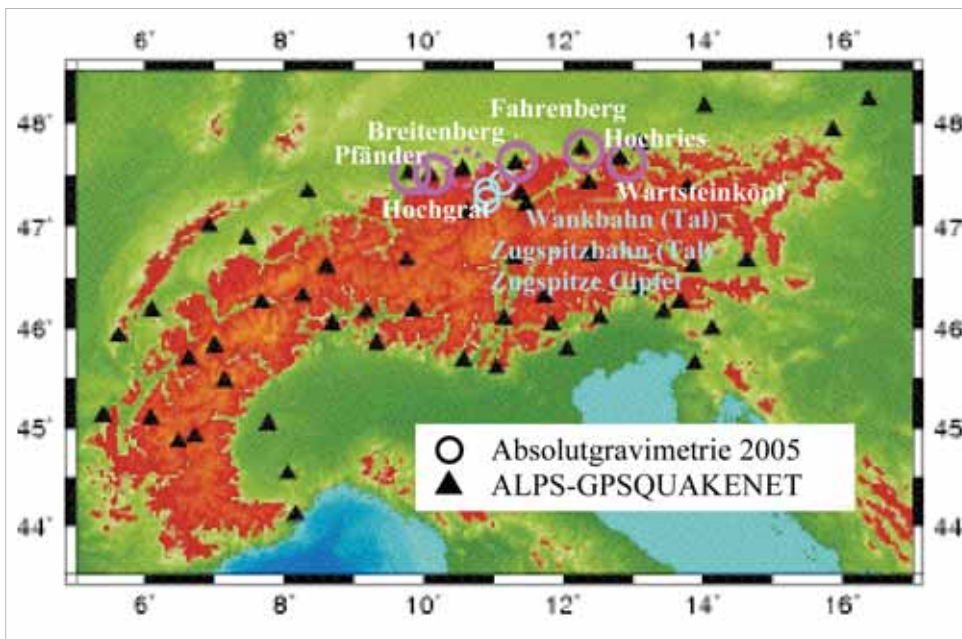
Die aktuellen Arbeiten der Kommission zum Schwerfeld umfassen die Vereinigung nationaler Schwerereferenznetze für Europa, ein Punktprofil über die Alpen, um aus wiederholten Beobachtungen die Alpenhebung zu beleuchten, sowie die Entwicklung von Instrumenten und Verfahren, um das Erdschwerefeld aus dem Flugzeug zu vermessen. Aus aktuellem Anlass berichten wir hier jedoch über Absolutschwerebeobachtungen auf Alpengipfeln in 2005 und warum wir das machen.

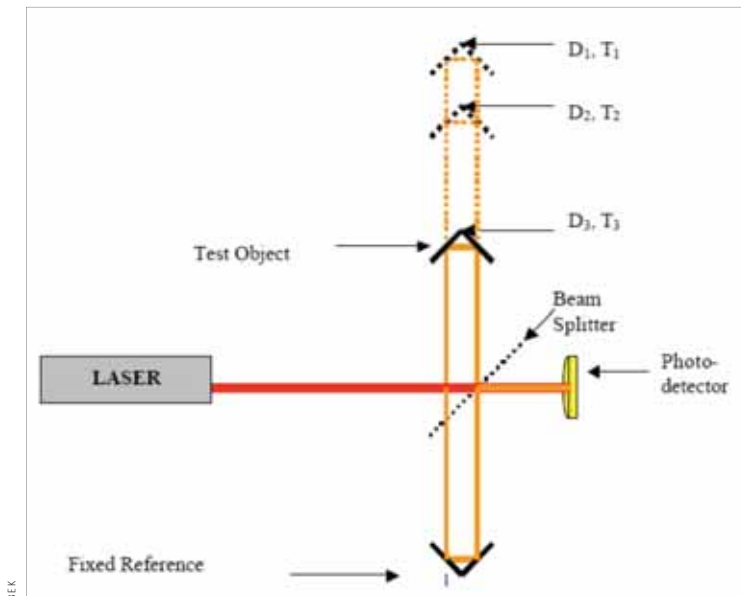
**Gravimetrie und Geodynamik**

Für die Erforschung der Geodynamik, also der (lang-)zeitlichen Änderung der Erde, spielt die Gravimetrie durch Beobachtung der Änderung des Schwerfeldes eine wesentliche Rolle. Beispiel: Nach dem Abschmelzen der Eismassen über dem skandinavischen Schild traten mit einiger Verzögerung Hebungen der Erdkruste von etwa

geringere Genauigkeit. Wir müssen aber auch so genau messen: Die Erde ist in sehr guter Näherung ein Ellipsoid und das Schwerfeld ist dem entsprechend recht ebenmäßig. Die für die verschiedenen Anwendungen wichtigen kleinen Unterschiede zeigen sich daher erst in den hinteren Stellen. Deshalb müssen die Messungen so genau sein. Für viele Zwecke werden daher auch nicht die Schwerewerte

die Schrägstellung bis nahe an den instabilen Zustand verändert („Astasierung“); dadurch wird die Empfindlichkeit gesteigert. Durch Mikroskop, mechanische Übersetzung und Thermostatisierung wird dann daraus ein Gravimeter hoher Genauigkeit. Da die Feder nur Messungen der Längenänderung gestattet, ist das Gerät allerdings nur ein Relativgravimeter zur Messung von Schwereunterschieden.





Schwerefeld der Alpen. Hebung und die durch die Erosion ausgelösten Massentransporte führen zu Schwereänderungen, die je nach Aufstellungspunkt des Gravimeters verschiedene Auswirkungen haben können. Das Abschmelzen von Gletschern hinterlässt ebenfalls Änderungen im Schwerefeld, die mit der Gravimetrie nachweisbar sind.

### GPS-Permanentstationen in den Alpen

Die Schwereänderung hat also zwei Ursachen, die Änderungen der Massen und der Geometrie. Um diese hypothesenfrei trennen zu können, bedarf es also auch zweier Beobachtungsgrößen: Zusätzlich zu den Schwerebeobachtungen müssen die Höhen der Beobachtungspunkte erfasst werden. Im Rahmen eines durch die EU geförderten Projektes, dem internationalen ALPS-GPS-QUAKENET Projekt, werden von Slowenien bis Frankreich 35 GPS-Permanentstationen in den Alpen aufgebaut, um dreidimensionale Positionsänderungen und damit neben den Horizontalverschiebungen wegen der Plattentektonik auch die Höhenänderungen an ausgewählten Punkten beobachten zu können (Abb. 2). Unsere Kommission sowie das DGFI beteiligen sich an diesem Projekt. Dazu wurden in den bayerischen Alpen fünf GPS-Permanentstationen zwischen Berchtesgaden und Oberstaufen durch das DGFI installiert. Die Daten aller GPS-Permanentstationen werden täglich automatisch abgerufen, um dann die Positionen der Antennen mit einer Genauigkeit von einem Zentimeter oder besser zu bestimmen. Die Auswertung der Daten zur Ableitung hochgenauer Koordinaten wird von der BEK wahrgenommen. Durch die kontinuierliche Auswertung gelingt es, Verschiebungen der Punkte im Bereich weniger Millimeter pro Jahr nachzuweisen. Damit bilden diese Punkte eine ausgezeichnete Basis,

Abb. 3: Prinzip der Absolutschweremessung nach der Freifallmethode.

1 cm/Jahr aufgrund isostatischer Ausgleichsbewegung auf; die Meeresoberfläche folgt dem nur zum Teil. So liegen nun Ostseehäfen aus dem 15. und 16. Jahrhundert wegen der Hebung um mehrere Meter einige Kilometer von der Küste entfernt. Mit Hilfe heutiger Gravimeter ist die Schwereänderung aufgrund der Landhebung durch Wiederholungsmessungen im Abstand von wenigen Jahren nachweisbar. Diese Ausgleichsbewegungen sind auch mit dem klassischen Nivellement oder mit globalen Satellitennavigationssystemen wie dem amerikanischen GPS System als Höhenänderungen nachweisbar. Aber die Messung der Schwereänderung enthält nicht nur Informationen über die Deformation der Oberfläche, sondern auch Informationen über die Änderungen des Schwerefeldes und somit des Geoids.

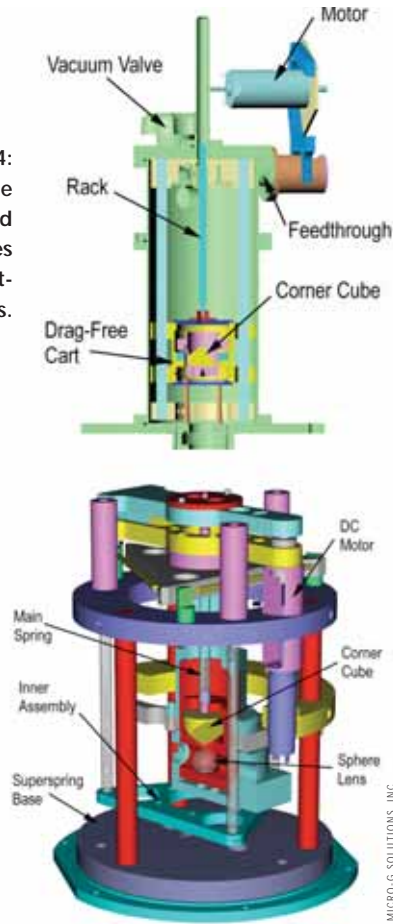
Durch gravimetrische Beobachtungen lassen sich auch Massenänderungen in der Nähe aktiver Vulkane aufdecken, die durch oberflächennahe Magmaverlagerungen entstehen. Kann die aufquellende Magma nicht mehr gespeichert werden und der Druck steigt weiter an, führt

dies zu einer Eruption oder, schlimmer noch, zur Explosion des ganzen oberen Vulkans. Sie können sich sicherlich vorstellen, dass gerade unerwartete Naturkatastrophen die größten Schäden verursachen. Hier kann die Gravimetrie als Frühwarnsystem dienen, da bei regelmäßiger Beobachtung Änderungen im Schwerefeld des Vulkans erkannt und interpretiert werden können.

### Hebung der Alpen

Unsere Kommission, die BEK, nutzt seit Jahren die Gravimetrie zur Erfassung der Änderungen des Schwerefeldes in den Alpen. Die Alpen sind als Folge der Kollision der Afrikanischen und der Eurasischen tektonischen Platten entstanden. Die Plattenränder verformen und falten sich zu Gebirgen auf. Die so angetriebene Hebung der Alpen ist bis heute nicht abgeschlossen. Neben der Hebung, die z. B. in der Schweiz durch Nivellement mit einem Betrag von bis zu 1,5 mm pro Jahr nachgewiesen werden konnte, setzt gleichzeitig die Erosion ein und führt zur Abtragung der Berge. Beide Prozesse, Hebung und Abtragung, finden zeitgleich statt und wirken auf das

Abb. 4:  
Wichtige Elemente  
des Ober- und  
Unterteils des  
A-10-Absolut-  
gravimeters.



um auch Änderungen im Schwerfeld zu beobachten, um nach dem oben Gesagten zur Klärung von Geometrieänderungen/Massenänderungen beizutragen. Im Sommer 2005 hat die BEK in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt (BKG) Außenmessungen auf mehreren Bergen, darunter auch die Zugspitze, mit einem transportablen Absolutgravimeter durchgeführt.

#### Schwere-Absolutmessung nach der Freifallmethode

Die moderne Methode zur Beobachtung des Absolutwertes der Schwere ist die Freiwurf- und -fall-Methode bzw. die Freifallmethode. Dabei wird die Trajektorie einer frei fallenden Testmasse durch eine schnelle Folge von Höhenmessungen zu genau bestimmten Zeitpunkten bestimmt. Dies wird im Allgemeinen realisiert durch ein Interferometer. Das Prinzip wird an Hand von Abb. 3 erläutert: Ein

Abb. 5:  
Außenansicht des  
A-10-Absolut-  
gravimeters.

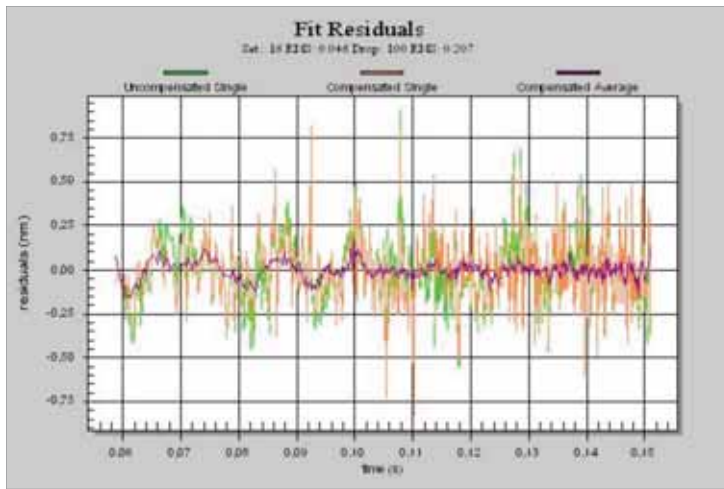
Laserlichtstrahl wird durch einen Strahlenteiler (*Beam Splitter*) in zwei Einzelstrahlen aufgeteilt. Ein Teilstrahl durchläuft einen Weg nach oben über die fallende Testmasse (*Test Object*), der andere läuft nach unten über einen ruhenden Referenzreflektor (*Fixed Reference*); danach werden beide wiedervereint und die dadurch entstehenden laufenden Interferenzstreifen in einem Photodetektor beobachtet. Soweit das Prinzip.

Die technische Realisierung erläutern wir am Beispiel des hier verwendeten „A-10“ der amerikanischen Firma *Micro-g Solutions, Inc.*, das mit wesentlicher Beteiligung des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) entwickelt wurde und als erstes Absolutgravimeter weltweit echte Außenmessungen außerhalb von Labors ermöglicht: Die zahlreichen technischen Kniffe, die höchst genaue Messtechnik ( $10^{-10}$ ) auf z. B. Alpengipfeln ermöglichen, können wir hier nur kurz andeuten: So wird der Frequenzdrift des Lasers entgegengewirkt, indem der Helium-Neon-Laser mit zwei unterschiedlich polarisierten Moden verwendet wird, wobei über einen Moden-Intensitätsvergleich die Länge des Lasers – und damit die Frequenz – mittels einer Heizung geregelt wird. Das „feste Referenzprisma“ muss von der – im Vergleich – riesigen Boden-vibration entkoppelt werden durch eine so genannte „Superfeder“, die tatsächlich aus einer Kombination von langperiodischen mechanischen Federn mit einer elektronischen Regelung der Aufhängepunkte besteht. Der fallende Testkörper darf nicht durch Luft gebremst werden. 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. Danach fährt der Lift wieder nach oben für den nächsten Fallversuch. Die Zeitpunkte  $T_i$  der jeweiligen Höhenmessung  $D_i$  (siehe Abb. 3) werden mit einer Rubidium-Atomuhr bestimmt. Es versteht sich, dass die Anordnung der berührungslos übereinander stehenden Ober- und Unterteile relativ zueinander ausgerichtet und insgesamt genau ins Lot gebracht werden muss, was durch Kombination manueller und automatischer Steuerung/Regelung geschieht.

Eine Vorstellung von der Komplexität gibt Abb. 4, wo wesentliche Elemente des Oberteils des A-10 mit Fallkammer und Lift und des Unterteils mit der „Superfeder“ errahnt werden können. Diese beiden Einheiten, siehe auch Abb. 5, sind durch Kabel untereinander und mit





gleichen Punkt Differenzen von der Größenordnung  $3 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , maximal  $10 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ . Dies hält sich im Rahmen der Genauigkeit, wie sie aus Wiederholungsmessungen im Labor, den Angaben der Herstellerfirma und dem Vergleich mit noch genaueren Geräten zu erwarten ist.

**Ausblick in die Zukunft**

Werden wir nun in wenigen Jahren eine signifikante Änderung dieser Messwerte beobachten können, wie sie aus der Alpenhebung zu erwarten ist? Dies ist eine knifflige Frage: Die Beobachtungsgenauigkeit selbst würde das ermöglichen. Es ist allerdings die Frage, wie gut die Störeffekte, hier: unterschiedliche Schneelagen an der Zugspitze, zwischenzeitliche Erosion, unterschiedliche Bodenfeuchte etc., werden erfasst werden können. Dazu gibt es zwar allgemeine Erfahrungen, aber sind die hier anwendbar? Dies waren die ersten

Abb. 6: Residuen eines Fallversuchs.

der Steuer- und Registriereinheit (hier nicht dargestellt) sowie den Batterien über ein ca. 15 m langes Kabel verbunden. Während einer Messreihe werden zweckmäßig Vakuum und Thermostatisierung über Tage hinweg aufrecht erhalten. Dazu müssen aber die einzelnen Komponenten durch Kabel verbunden transportiert werden. Dass dies dann zu einer etwas auffälligen Wanderformation von sechs Personen führt, veranschaulicht Abb. 1.

so – je nach äußeren Bedingungen –  $\frac{1}{2}$  bis 2 Stunden benötigt. Nach den Ausführungen im Abschnitt „Gravimetrie und Geodynamik“ sind diese Messungen zur Erforschung der Geodynamik der Alpen wichtig. In Abb. 2 ist das oben besprochene ALPS-GPS-QUAKENET dargestellt mit den Absolutschweremessungen 2005. In den Signaturen ist angedeutet, dass eine Station (Breitenberg) aus Witterungsgründen noch nicht beobachtet werden konnte. Zusätzlich

**Die Absolutschweremessungen auf bayerischen Alpengipfeln 2005**

Ein Fallversuch geht nur über eine Höhendifferenz von ca. 5 cm innerhalb von ca. 0,1 sec; dabei werden jeweils ca. 700 einzelne Punkte längs der Trajektorie nach Höhe und Zeitpunkt ( $T_i, D_i$ , s. o.) vermessen und daraus durch eine gemeinsame Anpassung einer Fallparabel die Schwere ermittelt. In Abb. 6 sieht man, dass die Residuen – also die Abweichungen der einzelnen Messwerte von der glatten Parabel – von der Größenordnung von 0,1 Nanometer sind.

Je Station werden üblicherweise ca. 1000 bis 3000 einzelne Fallversuche („Drops“) in Gruppen („Sets“) und mit gelegentlicher zwischenzeitlicher Neuaufstellung durchgeführt, um systematische Fehler vermeiden und zufällige statistisch beschreiben zu können. Je Messpunkt werden

Punkt	Drops	Schwere [ $\text{m s}^{-2}$ ]	Höhe ca. [m]
Hochgrat	1000	9,80372056	1762
Fahrenberg	2000	9,80406676	1600
Wankbahn.	1000	9,80584564	735
Zugspitzbahn Tal	1248	9,80524362	985
Zugspitze Gipfel	3000	9,80055946	2955
Hochries	4000	9,80430887	1588
Wartsteinkpf	1350	9,80390150	1747

Tabelle 1: Absolutschweremessungen 2005.

wurden noch Beobachtungen an den Talstationen der Wank-Bergbahn in Garmisch-Partenkirchen sowie der Zugspitzbahn durchgeführt. (Im Rahmen einer anderen Messkampagne 2005 war die BEK auch an Absolutschweremessungen auf der Zugspitze selbst beteiligt.) Der Pfänder gehört bereits zum österreichischen Teilnetz.

**Messergebnisse**

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Dabei gab es zwischen den einzelnen Aufstellungen am

Absolutschweremessungen hoher Präzision auf Außenpunkten auf Berggipfeln – und somit ein Stück Neuland!

*Die Autoren sind wissenschaftliche Mitarbeiter der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Sie danken insbesondere Drs. Wilmes und Falk vom BKG für freundliche Zusammenarbeit sowie Dr. T. Niebauer, Micro-g Solutions, Inc. für die Abbildungen zum A-10.*

