

# Spezielle Störungen in Registrierungen des Supraleitenden Gravimeters SG-056 am BFO

Walter Zürn<sup>1</sup> und Peter Duffner<sup>2</sup>

1 privat, Black Forest Observatory (BFO)  
E-Mail: walter.zuern@partner.kit.edu

2 Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Black Forest Observatory (BFO)  
E-Mail: peter.duffner@kit.edu

## 1 Einleitung

Das Karlsruher Institut für Technologie und die Universität Stuttgart betreiben über ihre geophysikalischen und geodätischen Institute das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium bei Schiltach im Schwarzwald, auch Black Forest Observatory (BFO) genannt. Alle Geräte sind unter Tage im Granitstollen aufgestellt, mit Horizontalabständen zur Oberfläche von mehr als 450 m und mit einer Gesteinsüberdeckung von mehr als 150 m (<https://www.gpi.kit.edu/BFO.php>). Der hintere Teil des Stollensystems, in dem die Geräte installiert sind, die dauerhaft Daten hoher Qualität und hoher Verfügbarkeit für die Forschung liefern sollen, ist durch zwei Druckschleusen abgeschottet, die dafür sorgen, dass Schwankungen des Atmosphärendrucks nur stark gedämpft in der Nähe dieser Sensoren stattfinden. Die Schleusen wirken wie Tiefpass-Filter für Luftdruckschwankungen mit Zeitkonstanten von 40 - 60 h. Um Störsignale durch Besucher zu vermeiden, verfolgt das BFO die Strategie, die Luftdruck-Schleusen nur zu öffnen, wenn es notwendig ist, an den Instrumenten Arbeiten durchzuführen. Seit 2009 ist am BFO auch ein supraleitendes Gravimeter (GWR SG-056) mit zwei übereinander angeordneten Schweresensoren im Betrieb. Die Sensoren bestehen jeweils aus einer supraleitenden Hohlkugel aus Niob, die in einem Magnetfeld schwebt, das durch sehr konstante Ströme in supraleitenden Spu-

len erzeugt wird. Die vertikale Position der Kugeln wird durch kapazitive Wegaufnehmer gemessen. Über weitere Spulen werden solche Kräfte auf die Kugeln ausgeübt, dass die Auslenkungen durch Schwereänderungen und Trägheitskräfte gerade kompensiert werden, allerdings nur bei kleinen Frequenzen. Die entsprechenden Ströme durch die Rückkopplungs-Spulen sind proportional zur Schwereänderung und stellen dann die Messsignale dar. Die beiden Niob-Kugeln sind gleich groß, aber verschieden schwer. Die obere Kugel hat eine „normale“ Masse von 4,34 g, die untere Kugel von 17,7 g. Das SG-056 ist das erste Doppelkugelgerät mit zwei verschiedenen Massen. Die erhöhte Masse der einen Kugel sollte die Frage klären, ob durch Verringerung der Brown'schen Bewegung der Kugel das im Frequenzband der Erdeigenschwingungen vorliegende instrumentelle Rauschen herabgesetzt werden kann. Dieses Rauschen war durch Vergleich mit den besten Breitbandseismometern eindeutig als instrumentell identifiziert worden (Banka und Crossley, 1999). In der Tat stellte sich der untere Sensor des SG-056 bei einer Untersuchung von Rosat und Hinderer (2011) als der im Eigenschwingungsband am wenigsten gestörte aller weltweit registrierenden supraleitenden Gravimeter heraus (Crossley und Hinderer, 2009).



## 2 Beobachtungen von Schwerestörungen durch Besucher

Am 30. April 2013 fand am BFO ein Treffen statt, bei dem es um die Zukunft des Observatoriums ging. Da die Betreiber des BFO sich gegen die Aufstellung von Windenergie-Anlagen in unmittelbarer Nähe zur Wehr gesetzt hatten, stand die Drohung im Raum, dass die Benutzung des Stollens gekündigt werden könnte.

Um den Teilnehmern des überlebenswichtigen Treffens die Investitionen klar zu machen, die mit dem Betrieb des SG-056 zusammenhängen, wurden diese Besucher entgegen der obengenannten Strategie durch die erste der Druckschleusen zum Gravimeter geführt. Insgesamt hielten sich dann für ca. 15 Minuten 9 Menschen, darunter der Direktor des BFO Professor Bernhard Heck, in unmittelbarer Nähe (Abstände im 1 - 2 m Bereich) des SG-056 auf. Die Abb. 2.1 zeigt die geeichten Registrierungen der beiden Sensoren sowie deren Differenz für die Stunde, in der dieser Besuch stattfand. Es zeigt sich eine zeitlich klar mit dem Besuch korrelierte Abnahme der Schwere von ca.  $10 \text{ nm/s}^2$ . Diese Abnahme ist beim unteren Sensor um etwa 1 - 2  $\text{nm/s}^2$  größer als beim oberen.

Im Dewar des Gravimeters SG-056 sind zusätzlich zwei kleine Tiltmeter orthogonal zueinander eingebaut, die normalerweise dazu benutzt werden, Neigungen des Untergrundes der Station mittels weiterer Rückkopplungen zu kompensieren und dadurch die Sensoren genau vertikal zu halten. Dieses Kompensationsverfahren wird jedoch am BFO nicht benutzt, da der Sockel, auf dem das Gravimeter steht, sehr stabil ist. Schon früher wurden mit anderen Neigungsmessern auf diesem Sockel die Erdgezeiten mit guter Qualität gemessen. Deren Größenordnung (100 nrad) ist zu klein, um sich in der Schwereregistrierung als systematischer Fehler signifikant auszuwirken. Es ist trotz der Installation im Granit nicht verwunderlich, dass sich beim Betreten des Gravimeter-Containers der Boden neigt. Dies ist einer der Gründe dafür, sich nicht in die Nähe der hochsensiblen Geräte zu begeben. Zum Vergleich zeigt Abb. 2.2 sowohl die beiden orthogonalen Neigungen, die beim Besuch der neun Personen im Gravimeter-Container aufgetreten sind, als auch das Signal in der Schwere des unteren Sensors G1, das zum besseren Vergleich mit dem Faktor  $0,00025 \mu\text{rad}/(\text{nm}\cdot\text{s}^{-2})$  multipliziert wurde. Der

zeitliche Verlauf der Neigungen ist sehr verschieden vom zeitlichen Verlauf der Schwere. Außerdem ergibt eine Abschätzung des durch die Neigungen erzeugten scheinbaren Schwereeffekts unter vernünftigen Annahmen eine Amplitude von  $2 \cdot 10^{-6} \text{ nm/s}^2$ , und ist also vernachlässigbar. Das heißt, das beobachtete Signal kann nicht durch Neigungen des SG-Sockels erklärt werden. Der genaue Verlauf der Neigungen ist allerdings noch nicht richtig verstanden.

Ganz kurz nach der Inbetriebnahme des SG-056 fand in Freudenstadt die jährliche Sitzung der Arbeitsgruppe Seismologie des FKPE (Forschungskollegium Physik des Erdkörpers) statt. Die Teilnehmer wurden zu einer Führung durch das BFO eingeladen und erstens, weil die Seismologen mit den supraleitenden Gravimetern kaum vertraut sind, und zweitens, weil noch nicht ernsthaft mit den Dauerregistrierungen des SG-056 begonnen worden war, auch zum letzteren geführt. Dazu wurde die relativ große Gesamtgruppe in drei kleinere Gruppen von je etwa 10 Leuten eingeteilt, die dann nacheinander den Gravimeter-Container betraten. Dieser Besuch fand am 24. September 2009 statt und die entsprechenden Schweresignale sind in Abb. 2.3 dargestellt. Die Besucher befanden sich etwa zwischen 13:30 und 14:00, 14:25 und 15:10 sowie 15:20 und 16:10 in der unmittelbaren Nähe des SG-056. Wieder betrug die Schwereabnahme jeweils etwa  $10 \text{ nm/s}^2$ . Die genaue Anzahl der Menschen in jeder Gruppe wurde leider nicht festgehalten.

Ein weiterer Besuch beim SG-056 fand am 31. Januar 2013 statt. Eine notwendige elektrische Umstellung im Gravimeter-Container erforderte einen Besuch durch einen Wissenschaftler. Diese Gelegenheit wurde dazu benutzt, drei Studenten, die sich mit den Schwereregistrierungen im Rahmen ihrer Arbeiten beschäftigten, mit dem Instrument bekannt zu machen. Es betraten an diesem Tag also insgesamt 4 Leute den Container. Abb. 2.4 zeigt die dabei entstandenen Signale. Der Wiederanstieg der Schwere beim Verlassen der Kammer verschwindet in den viel stärkeren Signalen durch ein Erdbeben (9:53 UTC vor der Südküste Alaskas,  $M_w = 5,9$ ), so dass nur die Vorderflanke des Rechteckimpulses abgeschätzt werden kann. Diese beträgt hier 2,5 - 3  $\text{nm/s}^2$ .

Van Camp u. a. (2017) beschreiben ein Experiment, das zu unseren Beobachtungen gut passt. Der 11-jährige Sohn Clément des ersten Autors setzte sich

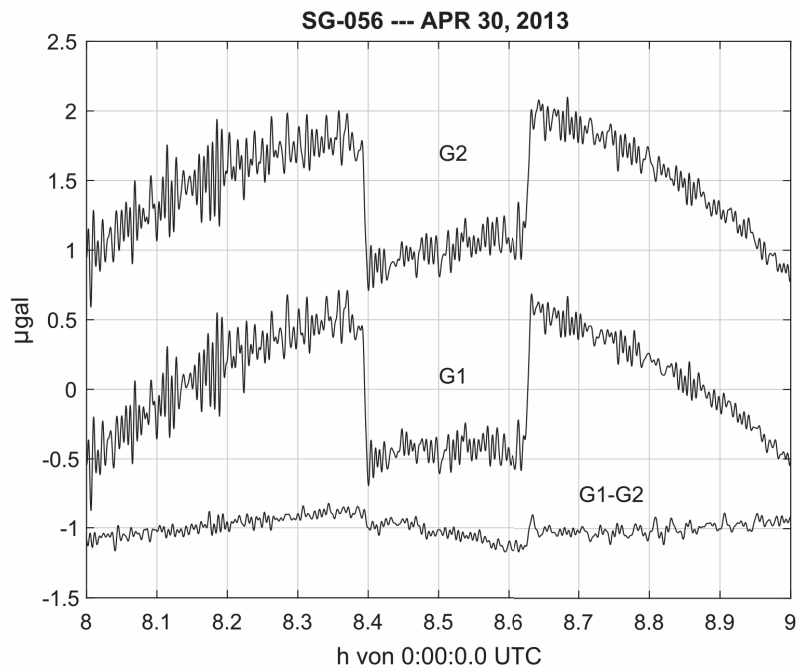


Abbildung 2.1: Zeitlicher Verlauf der Schwerestörungen, die von den beiden Sensoren des SG-056 beim Besuch von 9 Personen registriert wurden. G1 bezeichnet den unteren Sensor mit der schwereren Kugel, G2 den oberen Sensor mit der leichteren Kugel. Die Polarität der Rechteckimpulse entspricht einer scheinbaren Abnahme der Schwere. Bei den überlagerten höherfrequenten Schwingungen handelt es sich um die bekannte Meeres-Mikroseismik. Der parabelförmige Verlauf der Schwere, dem die Rechteckimpulse überlagert sind, wird durch die Gezeiten verursacht. Die beiden Sensoren erfahren nicht dieselbe Schwereänderung, da die Störung auch in der Differenz der beiden Signale auftaucht (unterste Kurve).

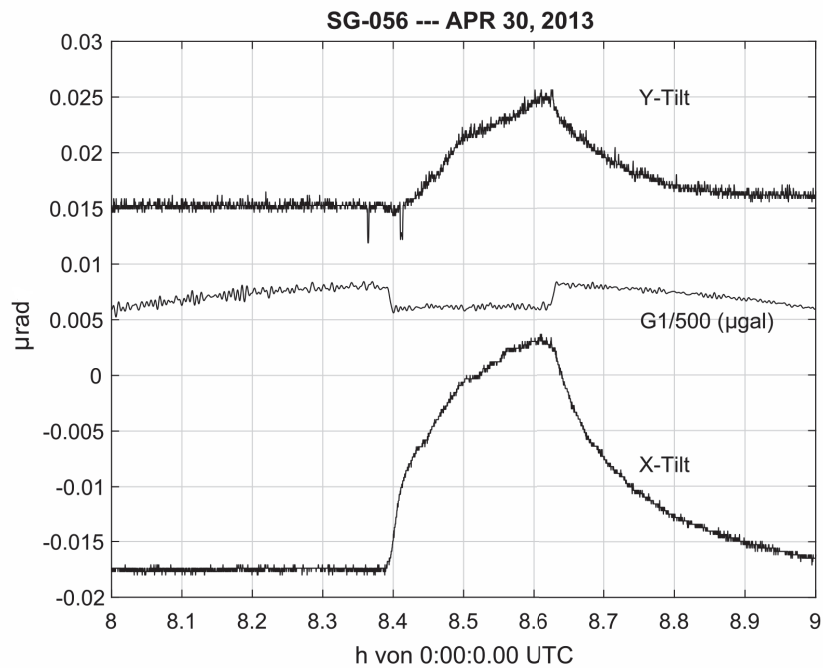


Abbildung 2.2: Zeitlicher Verlauf der Neigungen des Gravimeters in zwei zueinander orthogonalen Richtungen im Vergleich zum Verlauf der Schwere beim Besuch von 9 Personen. Das Schweresignal wurde zur besseren Veranschaulichung mit dem Faktor  $0,00025 \mu\text{rad}/(\text{nm}\cdot\text{s}^{-2})$  multipliziert. Der zeitliche Verlauf ist sehr verschieden für die beiden Messgrößen.

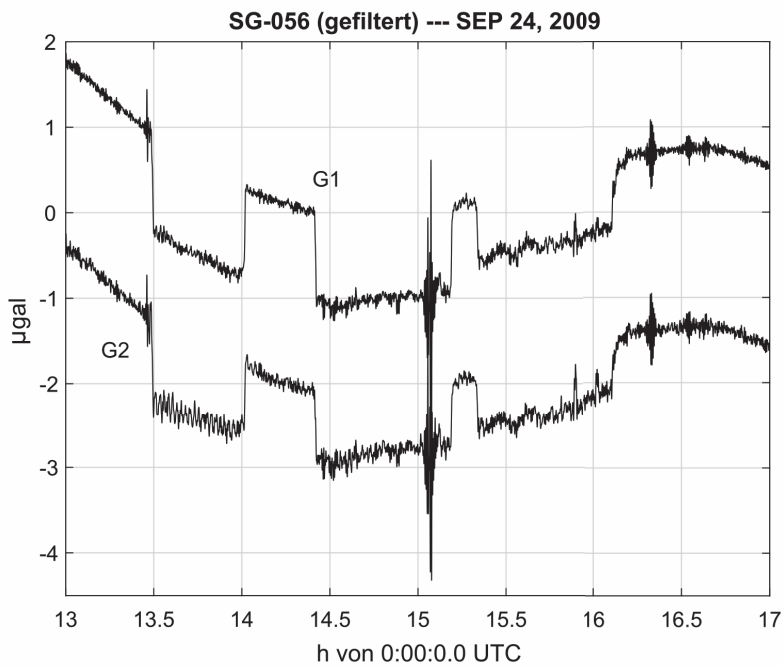


Abbildung 2.3: Schweresignale, die von den beiden Sensoren des SG-056 bei drei Besuchergruppen am 24. September 2009 registriert wurden. Kurz nach 15:00 und um ca. 16:20 sind Signale von Erdbeben zu erkennen. Die jeweilige Anzahl von Leuten in den Besuchergruppen ist nicht mehr genau bekannt (ca. 10).

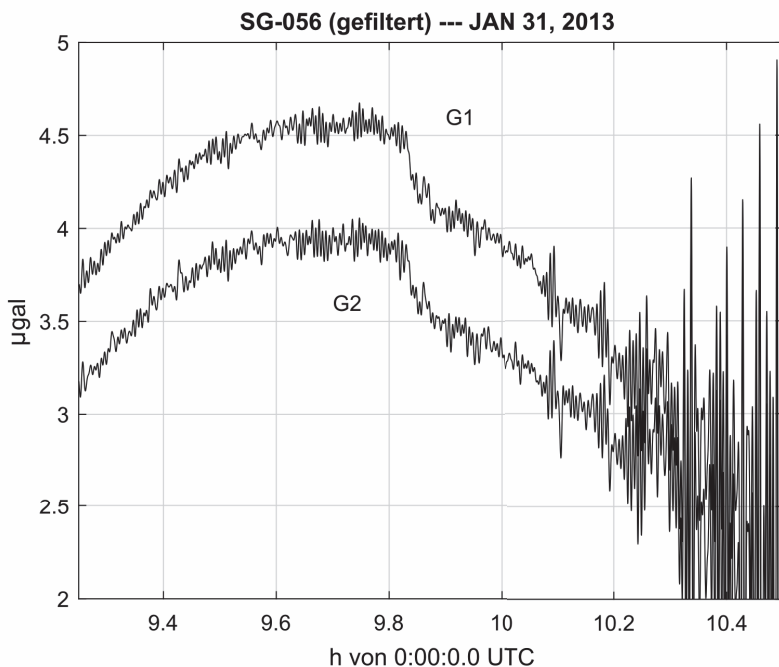


Abbildung 2.4: Schweresignale, die von den beiden Sensoren des SG-056 am 31. Januar 2013 aufgezeichnet wurden. Diese wurden durch den Besuch von 4 Personen im Gravimeter-Container verursacht. Die Rückflanke des Rechteck-Impulses findet etwa um 10:15 statt, ist aber durch die Rayleighwellen eines Erdbebens (9:53 UTC,  $M_w = 5.9$ , vor der Südostküste Alaskas) fast unkenntlich gemacht.

für etwa 6 Minuten über ein supraleitendes Gravimeter (iGrav-019), das in einer Grube an der Station Rochefort in Belgien installiert ist. Der Bauchnabel des Jungen mit einer Gesamtmasse von 45 kg befand sich etwa 1 m über der schwebenden Kugel. Ersetzt man den Jungen durch eine Punktmasse von 45 kg im Abstand von 1 m vom Sensor ergibt sich rechnerisch eine Schwereabnahme von ca.  $3,0 \text{ nm/s}^2$ , beobachtet wurden  $2,8 \text{ nm/s}^2$ .

### 3 Interpretation

#### 3.1 Schwerewirkung einer linienförmigen Massenverteilung auf eine Punktmasse

Nachdem Neigungen nicht als Ursache der scheinbaren Schwereabnahmen in Frage kamen, wurde die Hypothese ins Auge gefasst, dass die Besucher durch ihre Massen einen echten Gravitationseffekt erzeugen. Dazu wurde ein einfaches Modell zur Abschätzung solcher Effekte entwickelt. Abb. 3.1 zeigt die Geometrie dieses Modells. Im Abstand  $a_0 = 1 \text{ m}$  von der Sensorkugel in der Höhe  $h_x$  über dem Boden steht eine vertikale Massenlinie mit der Massendichte  $\sigma$  mit der Dimension  $\text{kg/m}$  (als Näherungswert dafür wurde  $42,9 \text{ kg/m} = 75 \text{ kg/1,75 m}$  gewählt). Die Höhen der beiden Sensorkugeln wurden zu  $h_1 = 0,321 \text{ m}$  und  $h_2 = 0,521 \text{ m}$  aus Konstruktionszeichnungen bestimmt.  $h_u$  und  $h_o$  sind die unteren und oberen Enden der Linienmasse, die ein einfaches Modell eines „mittleren Durchschnittsmenschen“ simulieren soll.  $\sigma \cdot \delta h$  ist ein Massenelement in der Höhe  $h_x$  auf dieser Linienquelle, das sich im Abstand  $r$  von der Sensorkugel befindet und von ihr unter dem Winkel  $\psi$  gegen die Horizontale gesehen wird. Die Schwerewirkung  $\delta g$  dieses Massenelements ist dann

$$\delta g = \sigma \cdot \frac{G}{r^2(h)} \cdot \sin \psi(h) \cdot \delta h, \quad (3.1)$$

wobei sich  $r$  aus

$$r^2(h) = (h - h_x)^2 + a_0^2 \quad (3.2)$$

ergibt.

Der Winkel  $\psi$  ergibt sich aus:

$$\sin \psi(h) = \frac{h - h_x}{\sqrt{(h - h_x)^2 + a_0^2}} \quad (3.3)$$

Die gesamte Schwerewirkung der Linienquelle ist dann das Integral

$$g_x = G \cdot \sigma \cdot \int_{h_u}^{h_o} \frac{(h - h_x) \cdot dh}{((h - h_x)^2 + a_0^2)^{3/2}}, \quad (3.4)$$

das geschlossen ausgewertet werden kann zu:

$$g_x = -G \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{(h_o - h_x)^2 + a_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h_u - h_x)^2 + a_0^2}} \right] \quad (3.5)$$

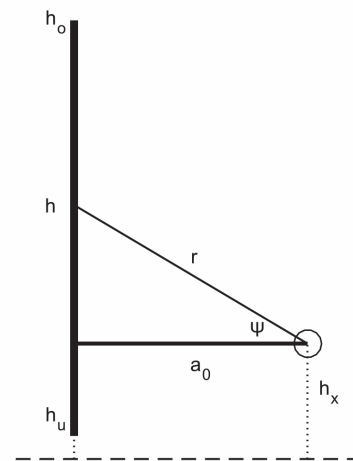


Abbildung 3.1: Skizze zur Geometrie der Schwerewirkung einer vertikalen Linienmasse auf eine Punktmasse in der Höhe  $h_x$ . Die angeschriebenen Größen sind in Abschnitt 3.1 definiert.

#### 3.2 Auswertung

Abb. 3.2 zeigt die Schwerewirkungen von  $N$  Linienmassen mit jeweils gleicher Geometrie und zwar für die Positionen der oberen und unteren Sensorkugeln des SG-056. Die Gravitationsbeschleunigung nach oben der unteren Kugel ist größer, weil der Winkel  $\psi$  für diese Kugel immer größer ist. Die Schwerpunkte der Linienmassen (bzw. Menschen) liegen klar oberhalb der Kugeln. Die Parameter zur Berechnung der Effekte sind in der Abbildung angegeben. Ebenso eingetragen sind die aus den Abb. 2.1 und 2.4 entnommenen Amplituden. Insgesamt sind diese Abschätzungen sehr zufriedenstellend und damit ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die richtige Erklärung gefunden. Nicht ganz zufriedenstellend erklärt sind die Differenzen der Effekte für die beiden Kugeln. Ein Eichfehler in dieser Größenordnung kann aber ausgeschlossen werden.

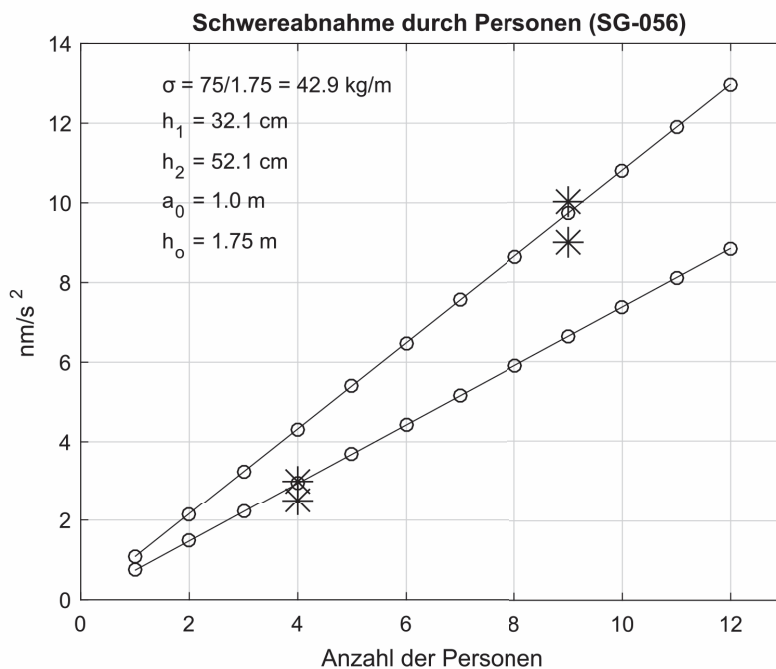


Abbildung 3.2: Scheinbare Schwerereduktion durch eine Anzahl von Menschen in der unmittelbaren Nähe zum Gravimeter, die durch eindimensionale vertikale Massenverteilungen modelliert werden. Parameter sind im Diagramm aufgelistet und in Abschnitt 3.1 definiert. Durchgezogene Linien sind die theoretischen Werte für die untere (obere Gerade) und obere (untere Gerade) Kugel des SG-056. Sterne bei  $N = 9$  und  $N = 4$  sind die aus den Abb. 2.1 und 2.4 abgeschätzten Schwerereduktionen. Die höheren Werte gehören jeweils zur unteren Kugel.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass die Gravitationswirkung von Professor Bernhard Heck auf die Kugeln des supraleitenden Gravimeters im Abstand von etwa 1 m die Schwere scheinbar um ca.  $1 \text{ nm/s}^2$  verringert.

## Danksagung

Unser Dank gebührt Thomas Forbriger, Ruedi Widmer-Schmidrig, Erhard Wielandt, Helmut Wilhelm und Jacques Hinderer für viele Hilfestellungen. Michel VanCamp stellte sein unveröffentlichtes Manuskript zur Verfügung. Unser besonderer herzlicher Dank gilt Bernhard Heck für die jahrzehntelange freundschaftliche Zusammenarbeit am BFO.

## Literatur

- Banka, D. und Crossley, D. (1999): Noise levels of superconducting gravimeters at seismic frequencies. *Geophys. J. Int.* 139(1):87–97.
- Crossley, D. und Hinderer, J. (2009): A review of the GGP network and scientific challenges. *J. Geodyn.* 48(1):299–304.
- Rosat, S. und Hinderer, J. (2011): Noise Levels of Superconducting Gravimeters: Updated Comparison and Time Stability. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(3):1233–1241. DOI: 10.1785/0120100217.
- Van Camp, M., de Viron, O., Watlet, A., Meurers, B., Francis, O. und Caudron, C. (2017): Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements. *Rev. Geophys.* 2017. ISSN: 1944-9208. DOI: 10.1002/2017RG000566. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2017RG000566>.