
Drift des supraleitenden Gravimeters SG056 am BFO

(Drift of the Superconducting Gravimeter
SG056 at BFO)

Bachelorarbeit
von

Clara Bützler

am Institut für Geophysik

Referent: Prof. Dr. Andreas Rietbrock
Korreferent: Dr. Thomas Forbriger

Bearbeitungszeit: 31.08.2017 – 21.12.2017

Überarbeitete Version zur Veröffentlichung auf KITopen vom 18.04.2018

Erklärung zur Selbstständigkeit

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der gültigen Fassung vom 17.05.2010 beachtet habe.

Karlsruhe, den 21.12.2017, _____
Clara Bützler

Als Ansichtsexemplar genehmigt von

Karlsruhe, den 21.12.2017, _____
Prof. Dr. Andreas Rietbrock

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Fragestellung | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 Supraleitende Gravimeter | 3 |
| 2.2 Das supraleitende Gravimeter SG-056 | 4 |
| 2.3 Beiträge zum gemessenen Schweresignal | 5 |
| 2.3.1 Gezeiten | 5 |
| 2.3.2 Veränderungen in der Erdrotation | 6 |
| 2.3.3 Einflüsse der Atmosphäre und Luftdruckkorrektur | 6 |
| 2.3.4 Instrumentelle Effekte | 7 |
| 2.3.5 Einflüsse der Hydrologie | 8 |
| 2.3.6 Langzeiteffekte | 8 |
| 2.4 Absolutschweremessungen und deren Genauigkeit | 8 |
| 3 Auswahl der Datenbasis | 9 |
| 3.1 Daten des supraleitenden Gravimeters SG-056 | 9 |
| 3.2 Absolutschwerewerte | 10 |
| 4 Relative Drift | 15 |
| 5 Absolute Drift | 17 |
| 5.1 Korrektur der Daten um bekannte Beiträge zum Schweresignal | 17 |
| 5.2 Entfernen von Ausreißern und Sprüngen | 18 |
| 5.3 Drift von Sensor 2 | 19 |
| 5.4 Drift von Sensor 1 | 19 |
| 5.5 Einfluss verschiedener Parameter auf das Ergebnis | 19 |
| 6 Vergleich der Daten des SG-056 mit Absolutschwerewerten | 35 |
| 7 Gründe für die Sprünge in den Messreihen | 41 |
| 8 Untersuchung der Daten der seismischen Datenerfassung | 49 |
| 9 Zusammenfassung | 57 |
| Anhang | 61 |
| Literaturverzeichnis | 63 |

1. Fragestellung

In dieser Arbeit, sollen die Driften der beiden Sensoren des supraleitenden Gravimeters SG-056 untersucht werden. Dieses steht am Black Forest Observatory (BFO) in Schiltach und ist seit September 2009 in Betrieb.

Supraleitende Gravimeter zeichnen sich im Vergleich zu Federgravimetern durch eine sehr kleine Drift aus. Die Drift von Federgravimetern liegt im Bereich von einigen $\frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$, beispielsweise nennen *Crossley et al.* (2013) für das Modell Micro-g/L gPhone eine Drift von $10 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ bis $15 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$. Im Vergleich dazu haben Untersuchungen an anderen supraleitenden Gravimetern bereits gezeigt, dass deren Drift im Bereich von einigen $\frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ liegt. *Crossley et al.* (2004) haben die Drift von 10 verschiedenen supraleitenden Gravimetern in Europa bestimmt. Sie liegt zwischen $0,1 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ für das Gravimeter T003 in Brüssel und $4,9 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ für das C021 in Membach. Einzige Ausnahme bildet das SG103 in Wettzell, für das eine wesentlich größere Drift von $-253,95 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ gefunden wurde. Dieses ist aber bereits 1999 durch das CD029 mit einer geringen Drift von $0,18 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ ausgetauscht worden. Weitere Angaben für die Drift supraleitender Gravimeter sind in *Crossley et al.* (2013) zu finden. Interessant sind hier vor allem die Unterschiede in den Driftangaben für identische Gravimeter in beiden Artikeln. So geben beispielsweise *Crossley et al.* (2004) für das Gravimeter C026 in Straßburg eine Drift von $3,65 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ an, wohingegen *Crossley et al.* (2013) für das selbe Gravimeter ein Drift von $6,34 \cdot 10^{-8} \frac{\mu\text{Gal}}{\text{s}} \approx 2,00 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ angeben. Das könnte ein Anzeichen für den Einfluss der Länge der untersuchten Zeitreihe auf die bestimmte Drift sein. Allerdings zitiert *Crossley et al.* (2013) die Driftangabe von *Riccardi et al.* (2011), wo ich diese aber nicht wiederfinden kann.

Auch die Drift des SG-056 wurde bereits untersucht. *Widmer-Schnidrig et al.* (2012) geben für den schwereren Sensor eine Drift von $0,06 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ und für den leichteren Sensor eine Drift von $12,8 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ an. Zu dem Zeitpunkt dieser Untersuchung lagen allerdings weniger als drei Jahre Messdaten vor. Daher ist es interessant, diese Angaben jetzt mit einer längeren Messreihe von ungefähr sieben Jahren zu überprüfen.

Wichtig ist die Kenntnis der Drift, wenn Langzeiteffekte der Schwere untersucht werden sollen. Das können zum Beispiel die 18,6-Jahres-Periode in den Gezeiten oder säkulare Schwereänderungen sein, die beispielsweise auf Grund einer Hebung oder Senkung des Schwarzwaldes entstehen könnten. Dann kann die Drift nicht mehr durch einfaches Hochpassfiltern der Daten entfernt werden, da so auch das zu untersuchende Signal entfernt würde.

Von *Hinderer et al.* (2007) wird beschrieben, dass die Drift supraleitender Gravimeter zunächst für 4-6 Monate exponentiell verläuft und dann linear wird. Da es im ersten Jahr der Messungen des SG-056 Probleme mit der Datenaufzeichnung gab, kann dies hier nicht untersucht werden. Da allerdings bei Eingriffen in das Messgerät Sprünge in den Daten auftreten, stellt sich die Frage, ob sich nach solchen Sprüngen ebenfalls ein exponentielles Verhalten zeigt, oder sich die Drift nach solchen Eingriffen anderweitig ändert.

Die Daten des SG-056 werden mit zwei verschiedenen Datenerfassungen aufgezeichnet, einmal mit digitalen Voltmetern und mit einer seismischen Datenerfassung. Die Drift soll

zunächst für die Daten der Voltmeterdatenaufzeichnung untersucht werden. Zum Schluss soll untersucht werden, ob sich für die seismische Datenerfassung Unterschiede ergeben. In dieser Arbeit sollen daher folgende Fragen beantwortet werden:

1. Ist in den Messdaten eine Drift zu erkennen?
2. Mit welchem Modell lässt sich die Drift beschreiben? Ist sie linear, exponentiell oder zeigt sie ein anderes Verhalten? Wie lässt sie sich quantitativ beschreiben?
3. Ändert die Drift nach Sprüngen, die durch Eingriffe in das Messgerät entstehen, ihr Verhalten?
4. Gibt es Unterschiede bezüglich der Drift zwischen den Daten der seismischen Datenaufzeichnung und den Daten der Voltmeterdatenaufzeichnung?

2. Grundlagen

2.1 Supraleitende Gravimeter

Jedes Relativgravimeter beruht auf dem Prinzip, dass eine Probemasse von einer Tragkraft \vec{F}_T gehalten wird, die der Schwere entgegengesetzt ist. Bei einem einfachen Federgravimeter wird diese Tragkraft von einer Feder erzeugt. Sie ist abhängig von der Auslenkung $\vec{x} - \vec{x}_0$ der Feder aus der Ruhelage und damit von der Lage der Masse:

$$\vec{F}_T = D(\vec{x}_0 - \vec{x}) \quad (2.1)$$

D ist die Federkonstante der Feder. Die Masse stellt sich daher immer so ein, dass die Tragkraft, in diesem Fall die Federkraft, betragsmäßig genauso groß ist wie die Schwere. In der Praxis ist die Funktionsweise von Federgravimetern komplizierter, das Grundprinzip ist aber das gleiche.

Bei einem supraleitenden Gravimeter ist die Probemasse eine Kugel aus supraleitendem Niob. Die Tragkraft entsteht durch die Wechselwirkung der Kugel mit einem Magnetfeld, das von zwei supraleitenden Spulen, die ebenfalls aus Niob bestehen, erzeugt wird. Damit die Tragkraft langzeitstabil ist, und die Drift des Gravimeters somit klein, muss das Magnetfeld dieser Spulen langzeitstabil sein. Dazu muss der Strom in den Spulen konstant sein. Das wird dadurch erreicht, dass einmal ein Strom in die Spulen eingespeist wird, die Spulen dann mit sich selbst kurzgeschlossen werden und der Strom dann durch die supraleitenden Eigenschaften der Spulen für alle Zeiten konstant bleibt. Alle weiteren Ursachen, die zu einer Änderung des Magnetfelds, das durch diese beiden Spulen erzeugt wird, führen, wie zum Beispiel eine Verformung der Spulen in ihrem eigenen Magnetfeld, werden durch einen geschickten Messaufbau abgefangen. So wird eine sehr große Langzeitstabilität der Tragkraft im Vergleich zu Federgravimetern erreicht.

Ändert sich die Schwere, so muss sich auch die Tragkraft ändern, damit sich die Kugel weiter im Kräftegleichgewicht befindet. Dazu wird eine weitere Kraft mit Hilfe einer dritten Spule der Feedback-Spule erzeugt, die ebenfalls supraleitend ist. Das geschieht folgendermaßen: Die Lage der Kugel wird mit Hilfe von Kondensatoren, in deren Inneren sich die Kugel befindet, kontrolliert: Ändert die Kugel auf Grund einer Schwereänderung ihre Lage, so ändert sich die Spannung an den Kondensatoren, durch die Feedback-Spule muss gerade so viel Strom fließen, dass die Spannung an den Kondensatoren wieder der Ausgangsspannung entspricht, das heißt sich die Kugel wieder in ihrer Ausgangslage befindet. Die Schwereänderung ist dann proportional zur Änderung des Stroms in der Feedback-Spule. Dieser Strom wird von der Steuerelektronik in eine Spannung umgewandelt. Eine Darstellung der Kugel, der Kondensatoren und der drei Spulen befindet sich in Abbildung 2.1. Zusammen bilden sie einen Sensor eines supraleitenden Gravimeters.

Damit die beschriebenen Effekte der Supraleiter auftreten, muss sich die Messanordnung bei einer Temperatur unterhalb von 9,5 K, der Sprungtemperatur von Niob befinden. Die Kühlung erfolgt mit Hilfe von flüssigem Helium, so wird eine Temperatur der Sensoren von

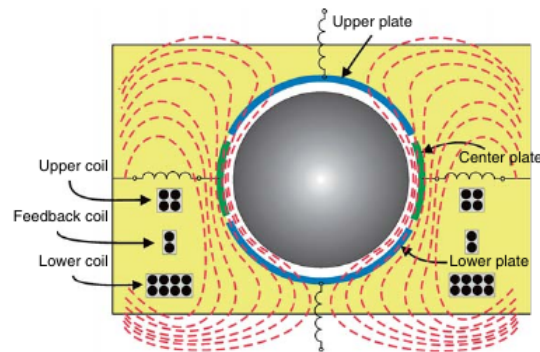


Abbildung 2.1: Sensor eines supraleitenden Gravimeters. Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Sensors eines supraleitenden Gravimeters. Dargestellt sind die Niob-Kugel, die Kondensatoren zur Kontrolle der Lage der Kugel und die 3 Spulen. Die Magnetfeldlinien sind in rot eingezeichnet (*Hinderer et al., 2007*).

ungefähr 4 K erreicht. Dieses wird von einem Kühlkopf immer wieder verflüssigt, wenn es verdampft, somit muss das Helium nicht nachgefüllt werden. Der Kühlkopf verschleißt allerdings mit der Zeit und muss ungefähr alle 4 Jahre gewechselt werden. Der Kühlkopf besteht aus einem Kolben, und einer kalten Spitze. Der Kolben ist durch eine Membran vom „Dewar“ getrennt, damit keine mechanischen Schwingungen vom Kolben auf den Sensor übertragen werden. „Dewar“ wird der Behälter genannt, in dem sich das flüssige Helium und der Sensor befinden.

Außerdem muss die Messanordnung vom Erdmagnetfeld abgeschirmt sein. Dies geschieht mit Hilfe einer supraleitenden Umhüllung der Anordnung.

Eine ausführlichere Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise supraleitender Gravimeter geben *Hinderer et al. (2007)*.

2.2 Das supraleitende Gravimeter SG-056

Das supraleitende Gravimeter SG-056 steht am BFO in Schiltach in einer ehemaligen Mine. Zur besseren Abschirmung befindet es sich hinter einer Druckschleuse. Der Raum hinter der Druckschleuse heißt SG-Kammer.

Eine Besonderheit des SG-056 ist, dass es aus zwei Sensoren besteht. Das heißt die Anordnung aus den drei Spulen, der Kugel und den Kondensatoren, befindet sich zweimal im Instrument. Die beiden Kugeln unterscheiden sich in ihrer Masse. Die Kugel des unteren Sensors (Sensor 1) hat eine Masse von 17,7 g, die des oberen Sensors (Sensor 2) eine Masse von 4,34 g (*Widmer-Schnidrig et al., 2012*). Das heißt jede Schwereänderung wird gleichzeitig mit Sensor 1 und Sensor 2 gemessen. Die beiden Sensoren dienen sich daher gegenseitig als Kontrolle.

Das Messgerät wird mit zwei Datenerfassungen betrieben: mit einer Voltmeterdatenerfassung und einer seismischen Datenerfassung. Bei der Voltmeterdatenerfassung wird die Ausgangsspannungen der Sensoren mit digitalen Voltmetern gemessen. Der Vorteil dieser Datenerfassung ist die Langzeitstabilität. Der Hersteller der Voltmeter gibt für die hier auftretenden Spannungen in der Größenordnung von 1 V eine Drift von $0,0035 \frac{\%}{\text{Jahr}}$ an (*Agilent Technologies, 2003*). Das heißt, von dieser Datenerfassung ist keine nennenswerte Drift zu erwarten. Gleichzeitig wird die Spannung auch mit einer seismischen Datenerfassung ausgelesen. Diese hat den Vorteil, dass sie auch höhere Frequenzen im Hz-Bereich noch genau auslesen kann und kein analoges anti-alias-Filter benötigt. Es kann aber sein, dass diese Datenerfassung selbst eine Drift verursacht. Zusätzlich zur Ausgangsspannung der Sensoren wird auch der Luftdruck in der SG-Kammer am Gravimeter von der Voltmeter

erfasst. Da der Luftdruck außerhalb des Stollens aber besser für die in Abschnitt 2.3.3 erläuterte so genannte Luftdruckkorrektur geeignet ist, wird seit September 2011 auch der Luftdruck an der Nordwand des Laborhauses von der Voltmeterdatenerfassung erfasst.

2.3 Beiträge zum gemessenen Schweresignal

Eine gemessene Schwerezeitreihe enthält folgende Beiträge, sortiert nach ihrer Amplitude:

1. Gezeiten
2. Veränderungen in der Erdrotation
3. Einflüsse der Atmosphäre
4. Instrumentelle Effekte
5. Einflüsse der Hydrologie
6. Langzeiteffekte, die beispielsweise durch Tektonik entstehen
7. Eventuell weitere noch unbekannte Effekte

Diese Beiträge werden im Folgenden genauer erklärt.

2.3.1 Gezeiten

Im Massenmittelpunkt der Erde gleichen sich Zentrifugalkraft und Gravitationskraft vollständig aus. Die Zentrifugalkraft, die aus allen Bahnbewegungen der Erde um andere Himmelskörper entsteht, ist in allen Punkten der Erde gleich groß. Für die Gravitationskraft, die durch andere Himmelskörper entsteht, ist das aber nicht der Fall. Somit kommt es zu einer resultierenden Kraft, der Gezeitenkraft. Die zugehörige Beschleunigung $\vec{a}_{Gez}(P)$ am Punkt P ist gegeben durch:

$$\vec{a}_{Gez}(P) = \vec{a}_{Grav}(P) - \vec{a}_{Zent}(P) = \vec{a}_{Grav}(P) - \vec{a}_{Grav}(0) \quad (2.2)$$

Dabei ist $\vec{a}_{Grav}(P)$ die Gravitationsbeschleunigung am Punkt P und $\vec{a}_{Zent}(P)$ die Zentrifugalbeschleunigung am Punkt P , die gleich der Zentrifugalbeschleunigung im Erdmittelpunkt und somit gleich der Gravitationsbeschleunigung im Erdmittelpunkt $\vec{a}_{Grav}(0)$ ist. Die Gezeitenkräfte, die durch den Mond entstehen, sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Ihre Verteilung ist achsensymmetrisch zur Verbindungslinie zwischen Erde und Mond. Durch die Bewegung der Himmelskörper sind die Gezeitenkräfte zeitabhängig. Die größten Amplituden im zeitabhängigen Anteil der Gezeitenkräfte entstehen durch die Rotation der Erde um sich selbst um die in Abbildung 2.2 eingezeichnete Achse RA. Dadurch passiert jeder Punkt auf der Erde täglich zwei mal ein Maximum und zwei mal ein Minimum in der Gezeitenbeschleunigung. So entsteht die halbtägige Periode in den Gezeiten. Da die Rotationsachse der Erde aber, wie in Abbildung 2.2, eingezeichnet nicht senkrecht zur Verbindungslinie zwischen Erde und Mond steht, sind die beiden Maxima, bzw. die beiden Minima, am Tag nicht gleich groß, somit ergibt sich eine tägliche Periode in den Gezeiten. Die Kurve, die ein beispielhafter Punkt an einem Tag durchläuft, ist ebenfalls in Abbildung 2.2 eingezeichnet. Durch die Rotation des Mondes um die Erde, die Rotation der Erde um die Sonne und viele weitere himmelsmechanische Bewegungen entstehen eine Vielzahl weiterer Frequenzanteile in den Gezeiten. Insgesamt lässt sich die räumliche Verteilung der Gezeiten über eine Summe von Kugelflächenfunktionen und die zeitliche Verteilung über eine Summe von Kosinusfunktionen ausdrücken. Die Koeffizienten der Kugelflächenfunktionen, sowie die Amplituden und Phasen der Kosinusfunktionen stehen in sogenannten Gezeitenkatalogen. Bis jetzt wurden nur die durch die Himmelskörper verursachten Kräfte auf die Erde, nicht aber die Reaktion der Erde auf die Kräfte besprochen. In der durch Gravimeter an der

Erdoberfläche gemessenen Schwere ist die Reaktion der Erde aber enthalten. Auf Grund der elastischen Eigenschaften der Erde verformt sich diese durch die Gezeitenkräfte, wodurch sich ein Punkt auf der Erdoberfläche als Reaktion auf die halbtägigen Gezeiten täglich zweimal bis zu 50 cm auf und ab bewegt. Diese Verformung hat zwei Effekte auf die gemessene Schwerezeitreihe: Zum Einen ändert sich die Entfernung zwischen Gravimeter und Massenmittelpunkt der Erde. Zum Anderen ändert sich die Massenverteilung in der Erde. Beides führt zu einer Veränderung des Gravitationsfeldes der Erde am Ort des Gravimeters. Das Gravimeter misst also die Summe aus der Gezeitenbeschleunigung, die die Himmelskörper verursachen und der daraus resultierenden Veränderung der Schwerbeschleunigung durch die Erde. Daher müssen die Amplituden des Gezeitenkatalogs mit einem weiteren Faktor multipliziert werden, um die gemessenen Amplituden zu erhalten. Dieser Faktor wird Gravimeterfaktor δ genannt. Für eine sphärisch geschichtete Erde liegt er ungefähr bei 1,16. Außerdem muss zu der Phase des Gezeitenkatalogs eventuell eine weitere Phase dazu addiert werden. Gezeitenfaktor und Phase bilden zusammen die Gezeitenparameter, sie können an unterschiedlichen Orten auf der Erde verschieden sein.

Bestimmt werden die Gezeitenparameter durch Gezeitenanalyse. Dabei werden die Gezeitenparameter durch einen Least-Square-Fit so angepasst, dass das berechnete Signal möglichst gut zu dem gemessenen Signal passt. Dazu werden, die Frequenzen des Gezeitenkatalogs in Wellengruppen eingeteilt. Allen Frequenzen einer Wellengruppe wird dann ein Gravimeterfaktor und eine Phase zugeordnet. Das ist notwendig, da das Problem sonst unterbestimmt ist.

Die auf diese Weise bestimmten Gravimeterfaktoren enthalten ebenfalls den Einfluss der Ozeangezeiten auf die gemessene Schwere. Grund dafür ist, dass die Ozeanmassen mit den gleichen Frequenzen durch die Bewegung der Himmelskörper auf der Erde verschoben werden und damit die gemessene Schwere mit diesen Frequenzen beeinflussen, was wiederum zu einer Änderung der Gravimeterfaktoren und der Phasen führt.

Die Amplituden der gemessenen Gezeiten liegen in der Größenordnung von bis zu 200 μGal . Eine detailliertere Erläuterung der Gezeitenkräfte und des zugehörigen Potentials gibt *Wenzel* (1997b), die Antwort der Erde auf die Gezeiten wird von *Wang* (1997) ausführlich diskutiert und *Wenzel* (1997a) erklärt die Gezeitenanalyse genau.

2.3.2 Veränderungen in der Erdrotation

Ein Anteil der Schwere an der Erdoberfläche ist die Zentrifugalbeschleunigung, die aus der Rotation der Erde um sich selbst resultiert. Sie lässt sich berechnen durch:

$$\vec{a} = \omega^2 \vec{d} \quad (2.3)$$

Dabei ist ω die Rotationsgeschwindigkeit der Erde und \vec{d} der senkrechte Verbindungsvektor zwischen der Rotationsachse und dem Punkt auf der Erdoberfläche. Die Erdrotation ist aber nicht konstant. Sie unterliegt verschiedenen Veränderungen. Zum Einen bewegt sich die Rotationsachse innerhalb des Erdkörpers, was zu einer Veränderung des Abstands zwischen Gravimeter und Rotationsachse führt. Zum anderen ist die Rotationsgeschwindigkeit nicht konstant. Beide Effekte führen zu einer Veränderung der Zentrifugalbeschleunigung und damit zu einer Veränderung der Schwere. Der Einfluss der Bewegung der Rotationsachse auf die Schwere wird Poltide genannt und liegt im Bereich von bis zu 7 μGal . Der Einfluss der Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit wird „Length of Day Variation“ genannt und ist wesentlich kleiner. Er liegt im Bereich von 0,1 μGal .

2.3.3 Einflüsse der Atmosphäre und Luftdruckkorrektur

Die gemessene Schwere an der Erdoberfläche wird durch die Massen in der Atmosphäre beeinflusst. Zum einen üben die Luftmassen eine direkte Anziehungskraft auf die Probemasse des Gravimeters aus, zum anderen verformen die Luftmassen die Erdoberfläche. Den

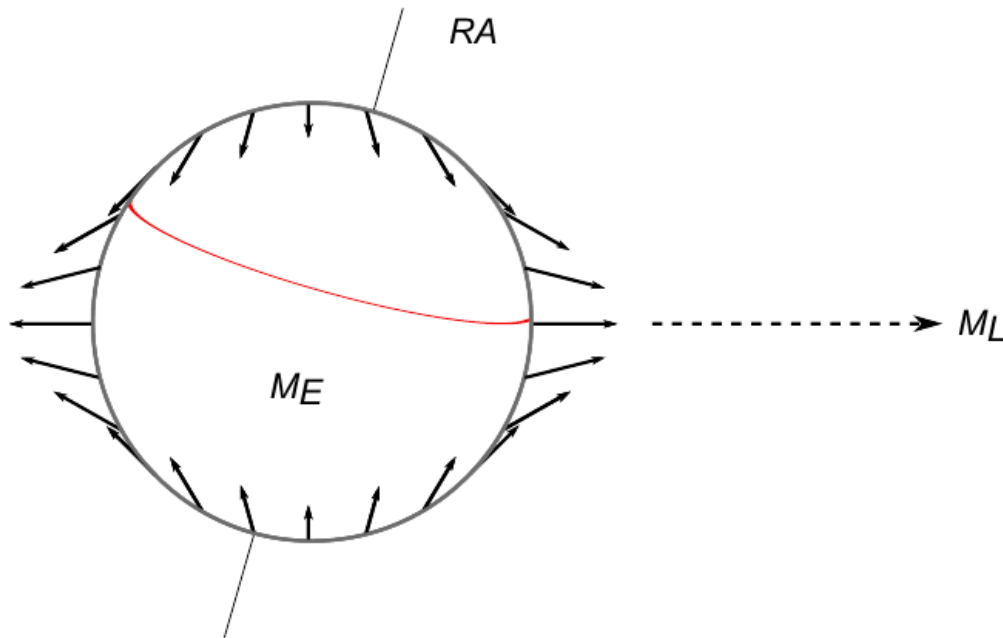


Abbildung 2.2: Gezeitenkräfte auf die Erde auf Grund des Mondes. In der Abbildung sind die Gezeitenkräfte des Mondes auf die Erde dargestellt. Ihre Verteilung ist rotationssymmetrisch um S. Die Rotationsachse RA der Erde ist ebenfalls eingezeichnet. In rot ist die Kurve dargestellt, die ein Punkt auf der Erde auf Grund der Erdrotation an einem Tag durchläuft. (Schroth (2013))

größten Einfluss hat dabei die lokale Atmosphäre. Er lässt sich gut durch das Produkt aus einem empirischen Faktor f und dem Luftdruck p am Ort des Gravimeters beschreiben:

$$g_{Luft} = f \cdot p \quad (2.4)$$

Dabei ist f negativ, denn wenn der Luftdruck steigt sinkt die Schwere. f beträgt im Frequenzband der Gezeiten ungefähr $-3 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{hPa}}$. Soll der Einfluss der lokalen Atmosphäre aus den Daten entfernt werden, so muss g_{Luft} von den Daten abgezogen werden. Diese Berechnung wird im Folgenden Luftdruckkorrektur genannt. Die Amplitude von g_{Luft} liegt in der Größenordnung von bis zu $10 \mu\text{Gal}$.

2.3.4 Instrumentelle Effekte

Zusätzlich zu den realen Schweränderungen sind in den Messdaten auch Effekte enthalten, die ausschließlich vom Messgerät kommen. Dazu zählen instrumentelles Rauschen, instrumentelle Langzeiteffekte und Sprünge. Langzeiteffekte des Messgeräts werden als Drift bezeichnet. Bei Federgravimetern kann diese beispielsweise durch ein sukzessives Absinken der Probemasse zustande kommen, das nicht auf Grund einer Erhöhung der Schwere, sondern weil die Feder ausleiert, das heißt weil sich die Federkonstante ändert, entsteht. Wie in Kapitel 1 erläutert, liegt die Drift von Federgravimetern in der Größenordnung von $10 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ bis $15 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$. Durch die in Abschnitt 2.1 erläuterte Messtechnik von supraleitenden Gravimetern können solche Drifteffekte stark verringert werden. Eine Drift wird aber dennoch beobachtet, sie liegt, wie in Kapitel 1 diskutiert, im Bereich von einigen $\frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Ihre Ursache ist noch nicht bekannt. Im Folgenden werden zwei Arten von Drift untersucht: Zum Einen die absoluten Driften der beiden Sensoren des Gravimeters. Diese beschreiben den instrumentellen Langzeitrend, den jeder einzelne Sensor hat. Sie kann für beide Sensoren unterschiedlich sein. Zum Anderen geht es um die relative Drift, sie beschreibt

den Langzeittrend in der Differenz der Messwerte der beiden Sensoren, die im Folgenden „Sensordifferenz“ genannt wird. Für ideale Messinstrumente sollte diese Differenz null sein, da beide Sensoren die gleiche Schwereänderung erfahren. Die relative Drift sollte der Differenz der beiden absoluten Driften entsprechen.

Sprünge in den Daten entstehen, wenn Eingriffe am Messgerät vorgenommen werden. Diese Sprünge können einige hundert μGal groß sein.

2.3.5 Einflüsse der Hydrologie

Die Hydrologie kann durch Wassermassenbewegung im Untergrund Schwereänderungen verursachen.

2.3.6 Langzeiteffekte

In den Schweredaten können auch reale Langzeittrends enthalten sein. Diese entstehen beispielsweise durch die Tektonik. Hebt sich ein Gebiet, so sinkt dort die Schwere, da es sich vom Massenmittelpunkt der Erde entfernt.

2.4 Absolutschweremessungen und deren Genauigkeit

Absolutgravimeter werden benutzt, um den absoluten Wert der Schwere zu messen, da mit Relativgravimetern, wie beispielsweise dem supraleitenden Gravimeter, nur Veränderungen der Schwere, aber nicht ihr absoluter Wert bestimmt werden können. Das Messprinzip von Absolutgravimetern beruht darauf, dass die Fallzeit eines Körpers von der Schwerebeschleunigung abhängt. Beim Absolutgravimeter ist der fallende Körper ein Prisma im Vakuum. Die Fallstrecke wird dabei mit Hilfe eines Laserinterferometers gemessen, die Zeit mit einer Atomuhr.

Bei einer Messung der Absolutschwere, wird das Prisma stündlich ungefähr 100 mal fallen gelassen. Aus allen Einzelmessungen soll dann ein Mittelwert gebildet werden. Dafür müssen die Messungen zunächst mit Hilfe eines Gezeitenmodells gezeitenkorrigiert werden. Außerdem werden die Einflüsse der Atmosphäre und der Poltide korrigiert. Aus den Einzelmessungen kann außerdem die Standardabweichung des Mittelwerts berechnet werden. Diese beschreibt den statistischen Fehler der Messung und liegt im Bereich von weniger als $0,5 \mu\text{Gal}$. Schwer zu quantifizieren ist dagegen der systematische Fehler der Absolutmessungen. Um seine Größenordnung besser abschätzen zu können finden regelmäßig Vergleichsmessungen von ungefähr 20 Absolutgravimetern statt. Eine dieser Vergleichsmessungen fand im November 2015 an der Universität Luxemburg statt. Dabei lagen die Abweichung in den Ergebnissen, abgesehen von zwei Ausreißern, im Bereich von bis zu $\pm 4 \mu\text{Gal}$ (*Pálinkáš et al.*, 2015). Die beiden Gravimeter, von denen in dieser Arbeit Messwerte verwendet werden, haben ebenfalls an dieser Vergleichsmessung teilgenommen und gehörten nicht zu den beiden Ausreißern. Daher werden $\pm 4 \mu\text{Gal}$ als möglicher systematischer Fehler für diese Messungen angenommen. Diese Vergleichsmessungen können allerdings nur einen Anhaltspunkt für die Größe des systematischen Fehlers geben, da alle Absolutgravimeter das gleiche Messprinzip haben. Da die Ursachen der systematischen Fehler nicht ausreichend bekannt sind, können sie nicht korrigiert werden.

Da Absolutgravimeter keine Drift besitzen, werden in dieser Arbeit Absolutschweremessungen verwendet, um die Drift des SG-056 von einer Langzeitänderung der Schwere, die beispielsweise durch eine Hebung oder Senkung des Schwarzwaldes entstehen könnte zu unterscheiden.

3. Auswahl der Datenbasis

3.1 Daten des supraleitenden Gravimeters SG-056

Für die Untersuchungen dieser Arbeit liegen folgende Datensätze der Voltmeterdatenerfassung des SG-056 als mögliche Datenbasis vor:

1. „Sekundendaten“: Sekündlich abgetastete Messwerte, die von der Datenerfassung erzeugt werden. Diese liegen nicht als Schwerewerte sondern als Spannungswerte, die die Voltmeter des SG-056 messen vor. (Zeitraum, in dem die Daten vorliegen: 9.9.2009 bis 15.8.2017)
2. „Minutendaten“: Mit einem FIR-Dezimierfilter auf ein Abtastintervall von 1 Minute dezimierte Daten, die ebenfalls von der Datenerfassung erzeugt werden. Sie liegen ebenfalls als Spannungswerte vor. (Zeitraum, in dem die Daten vorliegen: 9.9.2009 bis 23.8.2017)
3. „MinutendatenIGETS“: Minütlich abgetastete Messwerte, die vom Datenzentrum IGETS zur Verfügung gestellt werden. Sie werden am BFO manuell aus den Sekundendaten erzeugt und dann an das Datenzentrum übermittelt. Hier liegen bereits die Schwerewerte vor. (Zeitraum, in dem die Daten vorliegen: 1.10.2009 bis 31.3.2017)
4. „StudendatenIGETS“: Stündlich abgetastete Messwerte, die vom Datenzentrum IGETS zur Verfügung gestellt werden. Sie werden vom Datenzentrum dezimiert. Dabei werden außerdem Sprünge und Lücken in den Daten entfernt. Auch hier liegen die Schwerewerte vor. (Zeitraum, in dem die Daten vorliegen: 1.7.2011 bis 30.3.2016)

Alle Datensätze werden erst ab dem 1.8.2010 verwendet, da zuvor Probleme mit der Voltmeterdatenerfassung aufgetreten sind.

Zu Beginn der Arbeit werden die Datensätze miteinander verglichen, dabei wird von den Sekundendaten nur der erste Wert jedes Tages verwendet, damit mit der großen Datenmenge besser umgegangen werden kann. Um Unterschiede in den Datensätzen besser erkennen zu können, werden nicht die gemessenen Schwerewerte miteinander verglichen, sondern es wird für alle Datensätze die Sensordifferenz berechnet und diese werden dann verglichen. Die Sensordifferenz S ist die in Abschnitt 2.3.4 eingeführte Differenz der Messwerte der beiden Sensoren des Gravimeters. Sie wird in Kapitel 4 genauer untersucht:

$$S(t) = g_{\text{Sensor1}}(t) - g_{\text{Sensor2}}(t) \quad (3.1)$$

Zuvor müssen für die Sekundendaten und die Minutendaten, die Spannungswerte U der Datensätze mit den Kalibrierungsfaktoren der Sensoren in Schwerewerte umgerechnet werden. Dabei gilt (Geib, 2010):

$$g_{\text{Sensor1}}(t) = -40,11 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{V}} \cdot U_{\text{Sensor1}}(t) \quad (3.2)$$

$$g_{\text{Sensor2}}(t) = -80,07 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{V}} \cdot U_{\text{Sensor2}}(t) \quad (3.3)$$

Zunächst werden die Minutendaten mit den MinutendatenIGETS verglichen. In Abbildung 3.1 sind die beiden Sensordifferenzen gemeinsam dargestellt. Auffallend ist zunächst, dass beiden Datensätze viele „Ausreißer“ enthalten. Diese entstehen auf Grund von Erdbeben. Außerdem sind Sprünge und ein linearer Trend in den Sensordifferenzen erkennbar. Darauf wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Hier ist zunächst wichtig, dass sich beide Datensätze vom Verlauf her nicht unterscheiden, aber bei den MinutendatenIGETS häufiger Datenlücken auftreten, als bei den Minutendaten. Daher sind die Minutendaten für die Untersuchungen geeigneter.

Als nächstes werden die Sekundendaten, die Minutendaten und die StundendatenIGETS miteinander verglichen. Ihre Sensordifferenzen sind gemeinsam in Abbildung 3.2 zu sehen. Da die Sekundendaten wie auch die Minutendaten recht viele Ausreißer aufweisen, werden, um mehr erkennen zu können, nur Werte deren Betrag kleiner als $100 \mu\text{Gal}$ ist, dargestellt. Es fällt auf, dass die Minutendaten und die Sekundendaten den gleichen Verlauf zeigen. Die StundendatenIGETS scheinen die gleiche Steigung aufzuweisen. Allerdings haben die auftretenden Sprünge eine andere Größe und teilweise auch eine andere Richtung. Das ist erst mal nicht überraschend, da die StundendatenIGETS vom Datenzentrum IGETS vorbearbeitet worden sind, was vor allem die Verkleinerung von Sprüngen bedeutet. Betrachtet man die Sensordifferenzen der Minutendaten und der StundendatenIGETS allerdings genauer, fällt auf, dass die Sensordifferenz der StundendatenIGETS teilweise Sprünge an Stellen aufweist, an denen die Sensordifferenz der Minutendaten und der Sekundendaten keine Sprünge aufweisen. Das ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Dort ist der Ausschnitt der Sensordifferenzen der Minutendaten und der StundendatenIGETS zwischen 950 und 1150 Tagen nach dem 1.8.2010 dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit wird von beiden Sensordifferenzen der Mittelwert des dargestellten Zeitraums abgezogen und nur Werte zwischen -5 und $5 \mu\text{Gal}$ abgebildet.

Da die Sensordifferenz der StundendatenIGETS eigentlich nur dort Sprünge aufweisen dürfte, wo die Minutendaten und die Sekundendaten dies auch tun, verwende ich für diese Arbeit nicht die StundendatenIGETS. Es bleiben also die Minutendaten und die Sekundendaten als mögliche Datenbasis. Ein Abtastintervall von einer Sekunde birgt aber keinen Vorteil, wenn ein Langzeiteffekt wie die Drift untersucht werden soll und die Minutendaten sind wegen der geringeren Datenmenge leichter handhabbar als die Sekundendaten. Daher verwende ich im Folgenden die Minutendaten.

3.2 Absolutschwerewerte

Um die Gravimeterdrift von einem Langzeittrend in der Schwere unterscheiden zu können, sollen die Daten SG056 mit Absolutschwerewerten verglichen werden. Dazu werden Absolutschweremessungen von Michel van Camp mit dem Messgerät FG5-202 und eine Messung des Instituts für Erdmessungen (Ludger Timmen, Hannover) mit dem FG5X-220 verwendet. Es werden immer die auf Sockelniveau reduzierten Messwerte verwendet. Die Messwerte sind in Abbildung 3.4 zu sehen. Sie sind mit einem Fehlerbalken von $4 \mu\text{Gal}$ versehen, der Größe des in Abschnitt 2.4 diskutierten systematischen Fehlers für Absolutschweremessungen. Dieser ist wesentlich größer als die statistischen Fehler der Absolutschweremessungen, die deshalb nicht dargestellt werden.

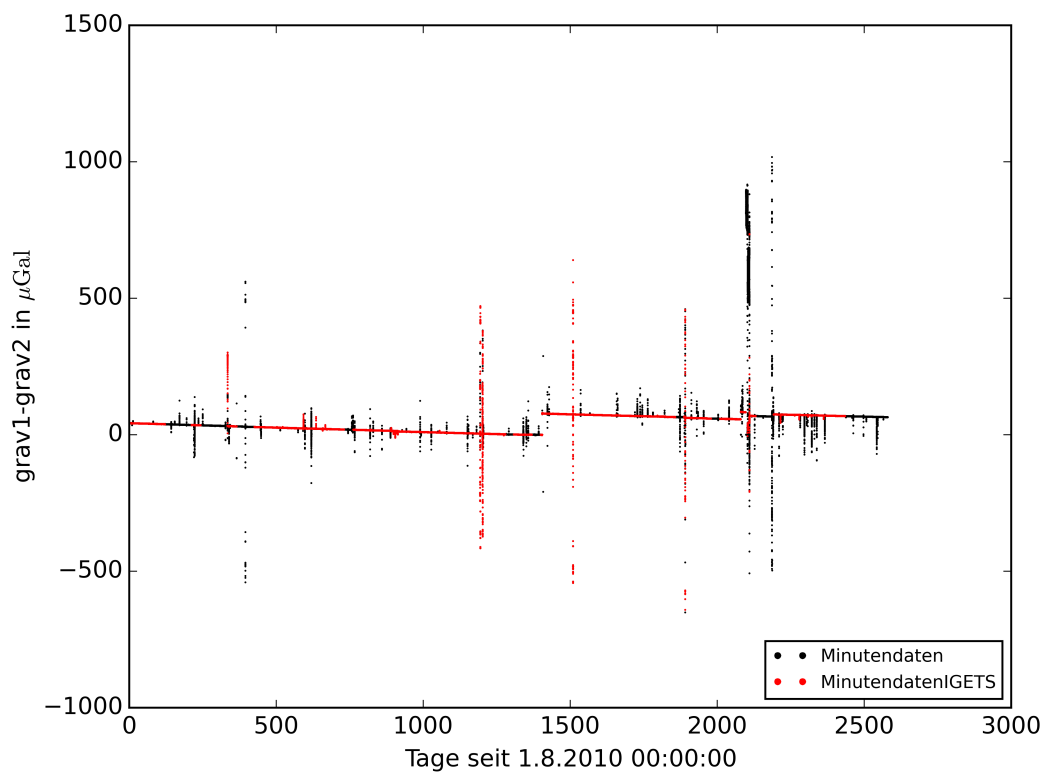


Abbildung 3.1: Vergleich Minutendaten. In der Abbildung sind die beiden Sensordifferenzen dargestellt, die aus den Minutendaten und den MinutendatenIGETS berechnet werden.

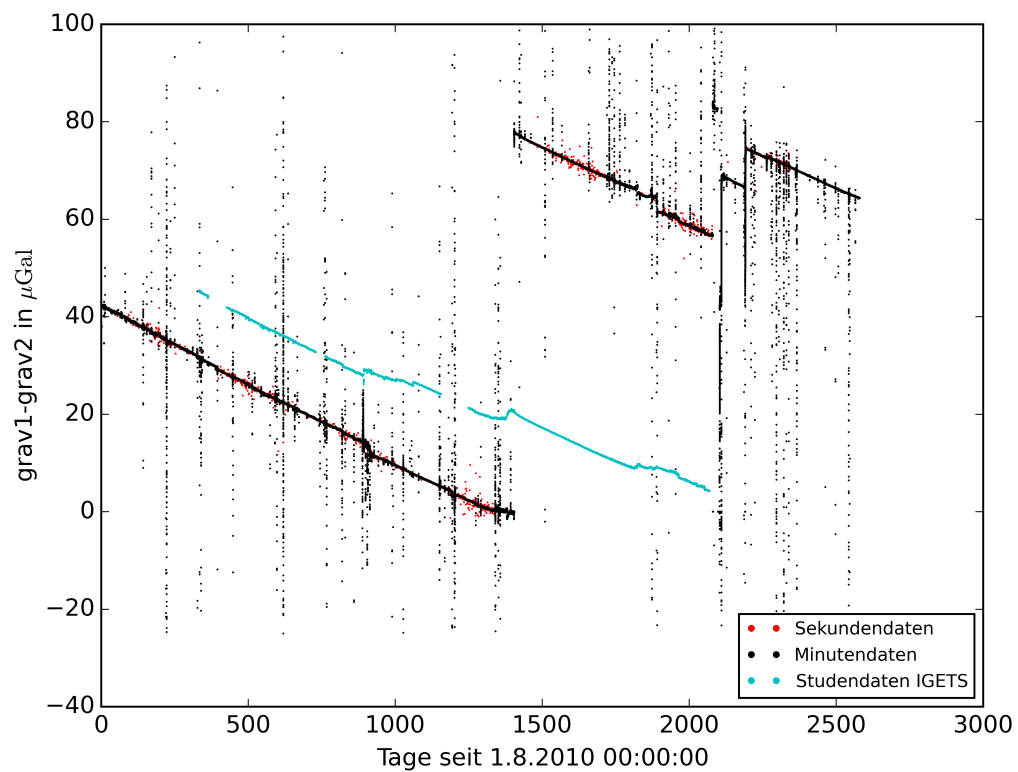


Abbildung 3.2: Vergleich Minutendaten, Sekundendaten und StundendatenIGETS. In der Abbildung sind die drei Sensordifferenzen dargestellt, die aus den Minutendaten, den Sekundendaten und den StudendatenIGETS berechnet werden. Dabei werden Ausreißer, deren Betrag größer als $100 \mu\text{Gal}$ sind, weggelassen.

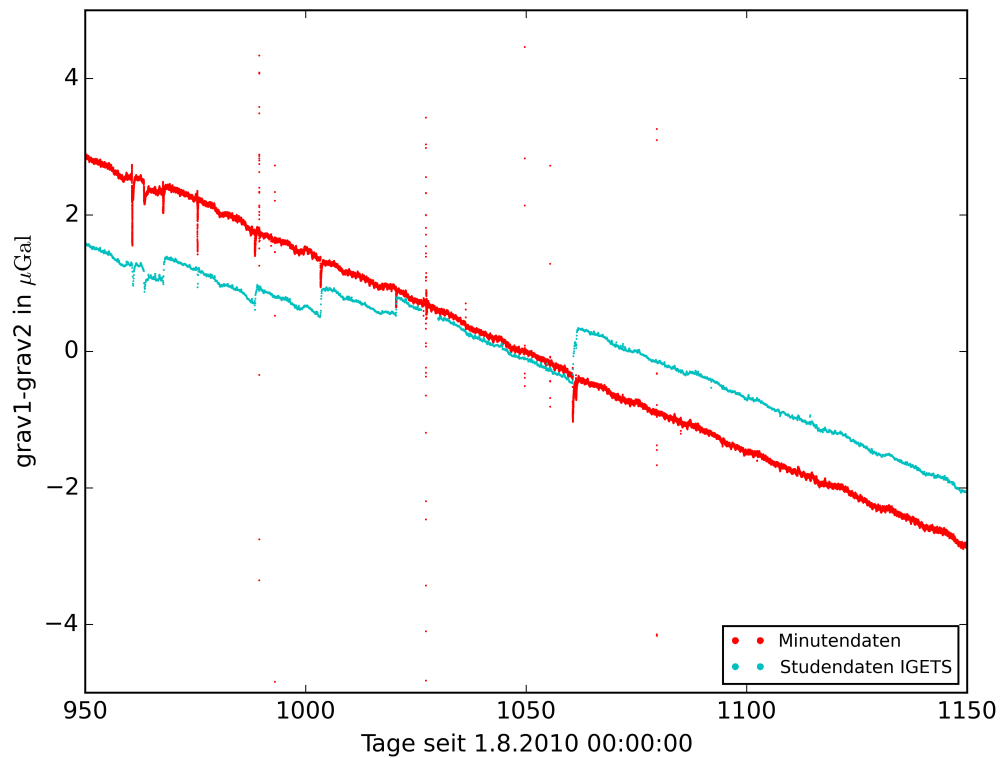


Abbildung 3.3: Vergleich Minutendaten, StundendatenIGETS Ausschnitt. In der Abbildung sind die beiden Sensordifferenzen, die aus den Minutendaten und den StundendatenIGETS berechnet werden, für den Zeitraum zwischen 950 und 1150 Tagen nach dem 1.8.2010 dargestellt. Von beiden relativen Driften ist der Mittelwert des gezeigten Zeitraums abgezogen worden und es werden nur Werte zwischen -5 und 5 μGal abgebildet

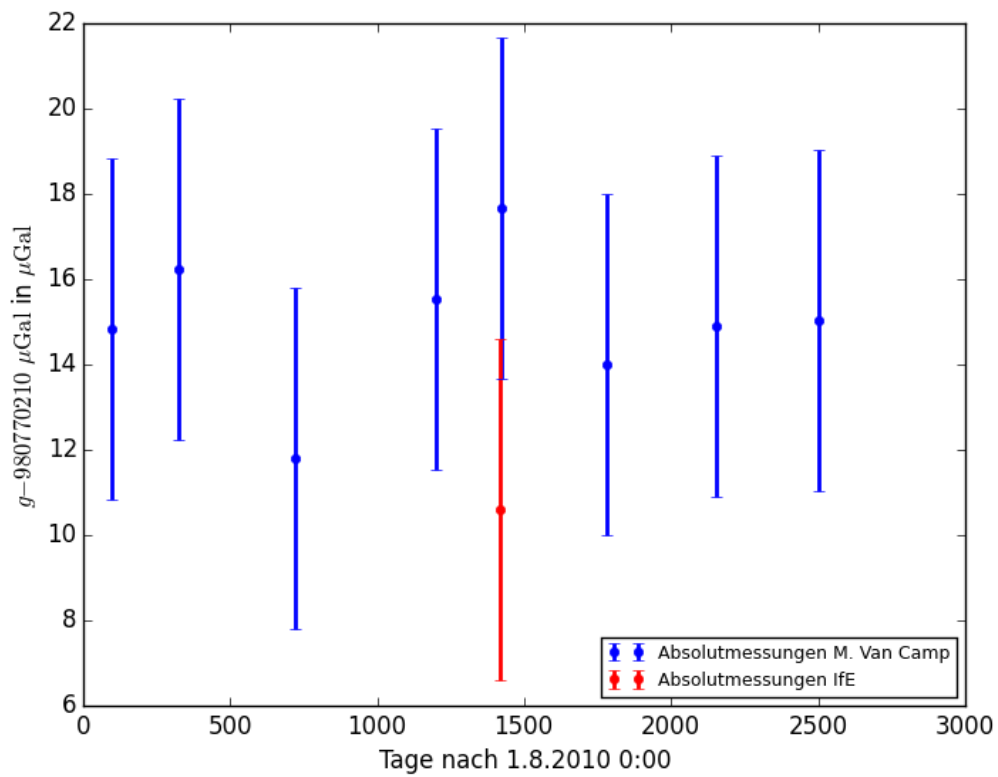


Abbildung 3.4: Absolutschweremessungen. In der Abbildung sind die verwendeten Absolutschwerewerte dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen den in Abschnitt 2.4 diskutierten systematischen Fehler von $4 \mu\text{Gal}$ für Absolutgravimeter.

4. Relative Drift

In diesem Kapitel soll die Sensordifferenz genauer untersucht werden. Sie ist die bereits in Kapitel 3 verwendete Differenz zwischen den Messwerten der beiden Sensoren des Gravimeters (siehe Gleichung 3.1). Da die Schwereänderungen an beiden Sensoren gleich sind, sollte diese Differenz für ein ideales Gravimeter verschwinden. Das heißt die Sensordifferenz beinhaltet nur noch Effekte des Gravimeters selbst. Der Langzeittrend in der Sensordifferenz ist die relative Drift, sie soll quantifiziert werden.

Die Sensordifferenz ist in Abbildung 4.1 ohne Ausreißer dargestellt. Dabei definiere ich Ausreißer folgendermaßen: Ein Wert ist ein Ausreißer, wenn sein Betrag größer als $100 \mu\text{Gal}$ ist oder die Differenzen zum vorherigen und zum nachfolgenden Wert größer als $0,01 \mu\text{Gal}$ ist. Das ist ungefähr ein Drittel der weiter unten bestimmten relativen Drift pro Tag. Diese Änderung kann daher nicht innerhalb von einer Minute auftreten.

Es wird deutlich, dass die Sensordifferenz weitgehend linear verläuft, dazwischen aber immer wieder Sprünge auftreten. Diese entstehen, wenn Eingriffe am Gravimeter vorgenommen werden. Ihre Ursachen werden im Einzelnen in Kapitel 7 diskutiert. In Abbildung 4.1 sind Sprünge mit Datum markiert. Dies habe ich folgendermaßen identifiziert: Ich habe zunächst alle Stellen bestimmt, an denen die Differenz zum nachfolgenden Wert größer als $1,2 \mu\text{Gal}$ ist. Danach habe ich alle diese Stellen genauer betrachtet, um festzustellen, ob es sich wirklich um einen Sprung handelt, oder um mit dem obigen Verfahren nicht identifizierte Ausreißer.

Es werden nun durch mehrere, möglichst lange Bereiche ohne Sprünge und mit möglichst wenigen Ausreißern lineare Fits gelegt. Diese sind ebenfalls in Abbildung 4.1 eingezeichnet. Die Fits werden mittels linearer Regression mit dem Least-Square-Kriterium berechnet. Die gewählten Zeiträume, die bestimmten Steigungen sowie deren Standardabweichungen stehen in Tabelle 4.1.

Diese Ergebnisse sind ein erstes Maß für die Größenordnungen der Einzeldriften der beiden Sensoren. Es ist nicht möglich, dass die absoluten Driften beider Sensoren gleichzeitig kleiner als die Hälfte der relativen Drift sind, also beide kleiner als $0,015 \mu\text{Gal}/\text{d}$ sind. Nach oben grenzt die relative Drift die absoluten Driften der Sensoren allerdings nicht ein, da beide eine ähnlich große Drift haben können, die sich dann durch die Differenzbildung größtenteils weg hebt.

Auffällig ist, dass die bestimmten relativen Driften mit der Zeit kleiner werden. Ob dies allerdings ein wirklicher Effekt ist, oder ob dies an der Wahl der Zeiträume für die linearen Fits liegt, lässt sich hier nicht eindeutig feststellen. In Kapitel 6 wird nochmals darauf eingegangen.

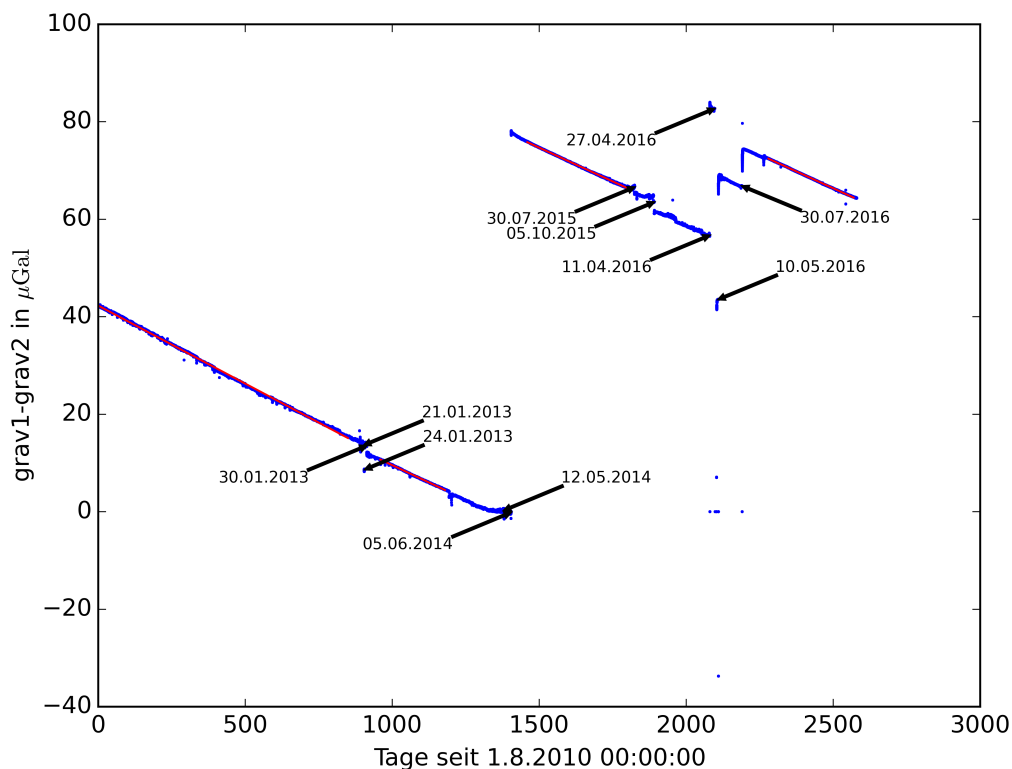


Abbildung 4.1: Relative Drift. In der Abbildung ist die Sensordifferenz in blau dargestellt. Die Stellen an denen Sprünge auftreten sind mit Pfeilen markiert. In 4 Bereichen ist eine lineare Regression durchgeführt worden. Die Fits sind in rot eingezeichnet. Die Zeiträume der Fits, ihre Steigungen und deren Standardabweichungen stehen in Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Lineare Fits an die Sensordifferenz. In der Tabelle stehen die Zeiträume der in Abbildung 4.1 eingezeichneten linearen Fits. Start- und Endzeitpunkte sind in Tagen seit dem 1.8.2010 angegeben. Außerdem sind die Steigungen der Fits sowie deren Standardabweichungen angegeben.

| Start | Ende | Steigung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ | Standardabweichung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ |
|-------|------|--------------------------------------|--|
| 0 | 850 | -0,0319862 | $8,2 \cdot 10^{-7}$ |
| 960 | 1180 | -0,0283999 | $1,7 \cdot 10^{-6}$ |
| 1460 | 1810 | -0,0277009 | $1,1 \cdot 10^{-6}$ |
| 2280 | 2570 | -0,0275614 | $7,6 \cdot 10^{-7}$ |

5. Absolute Drift

In diesem Kapitel sollen die absoluten Driften der beiden Sensoren bestimmt werden. Dafür werden zunächst alle bekannten Schweresignale vom gemessenen Signal abgezogen. Im nächsten Schritt werden Ausreißer und Sprünge entfernt. Der Langzeittrend im übrigbleibenden Signal kann dann als Drift interpretiert werden. Dass dieser Langzeittrend keine echte Änderung der Schwere auf Grund von Hebung, Senkung oder ähnlichen Effekten ist, schließe ich daraus, dass in den in Abbildung 3.4 in Kapitel 3 dargestellten Absolutschwerewerten kein Trend zu erkennen ist.

5.1 Korrektur der Daten um bekannte Beiträge zum Schweresignal

Die Ausgangssignale von Sensor 1 und 2 sind in Abbildung 5.1 zu sehen. Der Hauptanteil der Signale ist das gut zu erkennende Gezeitensignal. Außerdem sind deutlich Sprünge zu sehen, die durch Eingriffe am Gravimeter entstehen. Ihre Ursachen werden im Einzelnen in Kapitel 7 diskutiert. Um das Gezeitensignal aus den Daten zu entfernen, wird mit Hilfe der Gezeitenparameter, die mittels Gezeitenanalyse aus den Messdaten des SG056 von Eva Schroth bestimmt worden sind, eine synthetische Zeitreihe berechnet. Nach der Gezeitenanalyse sind die Gravimeterfaktoren der beiden langperiodischsten Wellengruppen SA und SSA mit Frequenzen zwischen 0 und 0.020884 cpd manuell auf 1,16 und ihre Phasenfaktoren auf 0° gesetzt worden. Das dient dazu, dass die Drift nicht als langwelliger Gezeitenanteil interpretiert wird. 1,16 und 0° sind die theoretischen Werte für eine sphärisch geschichtete Erde. Die Gezeitenparameter und die verwendeten Wellengruppen stehen im Anhang in Tabelle .1. Die Poltide und die „Length of Day Variation“ sind ebenfalls in der synthetischen Zeitreihe enthalten, sie werden auch mit einem Gravimeterfaktor von 1,16 berücksichtigt. Die Summe aus Gezeiten, Poltide und „Length of Day Variation“ wird von den Signalen von Sensor 1 und Sensor 2 abgezogen. Diese Korrektur wird im Folgenden Gezeitenkorrektur genannt.

Außerdem bestimme ich nach dem gleichen Verfahren wie im Kapitel 4 Ausreißer. Diesmal entferne ich für Sensor 1 alle Werte, deren Betrag größer als $300 \mu\text{Gal}$ ist, und für Sensor 2 alle Werte, die größer als $300 \mu\text{Gal}$ oder kleiner als $-350 \mu\text{Gal}$ sind. Für beide Sensoren fallen außerdem alle Werte weg, bei denen sowohl die Differenz zum vorherigen als auch zum nachfolgenden Wert größer als $0,5 \mu\text{Gal}$ ist. Dieser Wert muss hier größer gewählt werden als in Kapitel 4, da die Variationen der gezeitenkorrigierten Schwere wesentlich größer sind als die der relativen Drift. Das Ergebnis der Korrektur ist in Abbildung 5.2 nach Eliminierung der Ausreißer zu sehen. Das Gezeitensignal ist nicht mehr zu sehen, die Sprünge sind deutlicher als zuvor und für Sensor 2 lässt sich bereits eine Drift erkennen. In Abbildung 5.3 ist für Sensor 1 ein Ausschnitt der korrigierten Werte gemeinsam mit dem Luftdruck dargestellt. Es ist gut das gegenläufige Verhalten zwischen Luftdruck und Schwere zu erkennen. Es soll jetzt die in Abschnitt 2.3.3 erläuterte Luftdruckkorrektur durchgeführt werden, um einen Großteil der Schwerewirkung der Atmosphäre aus den Daten zu entfernen. Ich führe die Korrektur mit verschiedenen Faktoren f durch. Da das verbliebene Signal mit $f = 0,3 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{hPa}}$ am wenigsten Ähnlichkeit mit dem Luftdrucksignal

aufweist, wähle ich diesen Faktor für die Korrektur. Dabei ist anzumerken, dass in den Dateien der Voltmeterdatenerfassung zwei Werte für den Luftdruck stehen: der Druck in der SG-Kammer am Messgerät, der im Folgenden „Innendruck“) genannt wird, und der Druck an der äußeren Nordwand des Laborhauses, der im Folgenden „Außendruck“ genannt wird. In Abbildung 5.4 sind für einen Ausschnitt von 10 Tagen der Innendruck und der Außendruck gemeinsam dargestellt. Es ist zu sehen, dass die beiden Drucksignale um ungefähr einen halben Tag versetzt sind und im Innendruck die hohen Frequenzen nicht enthalten sind. Das liegt daran, dass das Gravimeter hinter der Druckschleuse steht. Dadurch dringen nur niederfrequente Druckvariationen in die SG-Kammer durch, und zwar einen halben Tag versetzt. Da der Außendruck den Druck in der Atmosphäre über dem Gravimeter besser repräsentiert, ist er für die Luftdruckkorrektur besser geeignet. Allerdings wurde er zu Beginn des verwendeten Zeitraums noch nicht von der Voltmeterdatenerfassung des SG056 mit aufgezeichnet. Seit September 2011 erfasst die Datenerfassung auch den Außendruck. Um nicht die Daten einer anderen Datenerfassung mit hinzuziehen zu müssen, wird dort, wo er in den Daten der Voltmeterdatenerfassung des SG056 steht, der Außendruck verwendet, ansonsten der Innendruck. Das Ergebnis der Luftdruckkorrektur ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Für Sensor 2 ist dort neben den Sprüngen bereits deutlich eine Drift zu erkennen, für Sensor 1 nicht. In Abbildung 5.3 ist für den dort gezeigten Ausschnitt auch das Signal nach der Luftdruckkorrektur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Korrelation mit dem Luftdruck fast verschwunden ist. Das verbleibende Signal wird vermutlich durch die Hydrologie, die durch Wassermassenbewegung im Untergrund Schwereänderungen hervorrufen kann, oder durch globale Effekte der Atmosphäre verursacht. Der Einfluss des verwendeten Gezeitenmodells auf die Endergebnisse wird in Abschnitt 5.5 diskutiert.

5.2 Entfernen von Ausreißern und Sprüngen

Bevor die Driften der Sensoren bestimmt werden können, müssen verbliebene kleinere Ausreißer und die Sprünge aus den Daten entfernt werden.

Um feinere Ausreißer zu entfernen, teile ich den Messzeitraum zunächst in fünf Abschnitte ein, in denen keine Sprünge auftreten. Start- und Endzeitpunkte der Abschnitte für beide Sensoren stehen in Tabelle 5.1. In jedem dieser Abschnitte wende ich dann folgendes Verfahren zum Entfernen der Ausreißer an:

1. An die Daten wird eine Regressionsgerade mittels Least-Square-Kriterium angepasst.
2. Der Messwert, der am meisten von der Ausgleichsgeraden abweicht, wird verworfen.
3. Es wird wieder bei 1. begonnen.

Das mache ich so lange, bis die größte Abweichung eines Messwertes von der Geraden nicht mehr als $15 \mu\text{Gal}$ beträgt. Die Daten vor und nach der Ausreißerentfernung sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Sie zeigt, dass so ein großer Teil der Ausreißer entfernt werden konnte.

Als Nächstes müssen die Sprünge aus den Daten entfernt werden. Dazu bestimme ich die Stellen in den Daten, an denen zwei aufeinander folgende Werte eine Differenz von mehr als $50 \mu\text{Gal}$ aufweisen. Dann lege ich durch 30000 Datenpunkte vor dem Sprung einen lineareren Fit (Fit1) und durch 30000 Datenpunkte nach dem Sprung ebenfalls einen (Fit2). 30000 Datenpunkte sind die Daten von ungefähr 20 Tagen. Das kann aber variieren, je nachdem wie viele Ausreißer in dem entsprechenden Bereich entfernt worden sind. Die Differenz zwischen Fit2 und Fit1 an der Stelle des Sprungs bestimmt dann die Größe des Sprungs. Diese ziehe ich von allen Werten nach dem Sprung ab. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt zwischen Sprung 2 und 3. Dieser enthält keine 30000 Datenpunkten, daher breche ich den Fit2 nach dem zweiten Sprung 10 Datenpunkte vor dem dritten Sprung

ab und beginne mit dem Fit1 vor dem dritten Sprung 10 Datenpunkte nach dem zweiten Sprung. Diese Fits enthalten dann 23828 Datenpunkte für Sensor 1, beziehungsweise 23859 Datenpunkte für Sensor 2. Die 10 Datenpunkte Abstand der Fits zum nächsten Sprung sollen verhindern, dass die Sprünge sich gegenseitig beeinflussen. Allerdings ist dies vermutlich unnötig, da 10 Datenpunkte sehr wenig im Vergleich zu den mehr als 2000 Datenpunkten des Fits sind. Die Sprünge und ihre Größen stehen in Tabelle 5.2. Die Daten vor und nach der Entfernung der Sprünge sowie die verwendeten linearen Fits sind in Abbildung 5.7 zu sehen. In Abbildung 5.8 ist für Sensor 2 ein Ausschnitt von Abbildung 5.7 um den Sprung am 29.7.2016 herum zu sehen. Am Verlauf der linearen Fits wird deutlich, dass sie lang genug sind, sodass der Einfluss von Ausreißern an den Sprungstellen auf ihren Verlauf nicht zu groß ist. Sie sind aber auch noch kurz genug, um kürzere Variationen der Schwere, das heißt Veränderungen, die innerhalb weniger Monate auftreten, mit abzubilden. Der Einfluss der Länge der linearen Fits (hier 30000 Datenpunkte) sowie die Genauigkeit der Bestimmung der Größe der Sprünge wird in Abschnitt 5.5 diskutiert.

5.3 Drift von Sensor 2

Aus den von Sprüngen und Ausreißern bereinigten Daten soll nun die Drift von Sensor 2 bestimmt werden. Dazu wende ich wieder das gleiche Verfahren an, welches ich auch schon zur Ausreißerentfernung in Abschnitt 5.2 verwendet habe, diesmal bis alle Werte nur noch um $7 \mu\text{Gal}$ vom letzten linearen Fit abweichen. Dieser Fit ist zusammen mit den Daten in Abbildung 5.9 dargestellt. Seine Steigung beträgt $0,030\,129\,5 \mu\text{Gal}/\text{d}$. In Abbildung 5.10 ist die Steigung in Abhängigkeit der Anzahl der entfernten Ausreißer zu sehen. Darin wird deutlich, dass die in diesem Schritt entfernten Ausreißer nur noch sehr geringen Einfluss auf die Steigung haben. Die Unterschiede sind nur noch im Bereich von $6 \cdot 10^{-6} \mu\text{Gal}/\text{d}$, das ist eine Variation um 0,020%. Diese Variationen sollen hier zunächst den Fehler der Driftbestimmung repräsentieren. Nur unter diesem Aspekt betrachtet ist es daher sinnvoll, die Drift auf $10^{-5} \mu\text{Gal}/\text{d}$ anzugeben. Sie beträgt damit $(0,030\,125 \pm 0,000\,003) \mu\text{Gal}/\text{d}$. Das sind $(10,9960 \pm 0,0011) \mu\text{Gal}/\text{Jahr}$. Wie genau die Drift allerdings insgesamt wirklich bestimmt ist, wird in Abschnitt 5.5 diskutiert. Es wird in Abbildung 5.9 auch deutlich, dass die Drift gut für den gesamten Zeitraum mit einer einzigen Geraden beschrieben werden kann. Offensichtlich führen die Sprünge in den Daten nicht zu einer hier erkennbaren Veränderung des Driftverhaltens.

5.4 Drift von Sensor 1

In Abbildung 5.11 ist das Signal von Sensor 1 nach dem Entfernen der Ausreißer und Sprünge zu sehen. Darin ist mit bloßem Auge keine Drift zu erkennen. Daher ist hier auch keine Regressionsgerade wie in Abschnitt 5.3 eingezeichnet. Trotzdem sind Ausreißer, die größer als $7 \mu\text{Gal}$ sind, wie in Abschnitt 5.3 entfernt worden. Ich stelle daher fest, dass falls eine Drift bei Sensor 1 vorhanden ist, diese kleiner ist als $\frac{5 \mu\text{Gal}}{7 \text{ Jahre}} = 0,71 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Denn $5 \mu\text{Gal}$ ist die halbe Spitze-Spitze-Amplitude des verbliebenen Signals. Wäre die Drift über den gesamten Zeitraum von 7 Jahren größer als diese $5 \mu\text{Gal}$, müsste sie in Abbildung 5.11 erkennbar sein.

5.5 Einfluss verschiedener Parameter auf das Ergebnis

In diesem Abschnitt soll die Genauigkeit der zuvor bestimmten Driften diskutiert werden. Dazu wird der Einfluss der folgenden zwei Parameter auf das Ergebnis untersucht:

1. Wahl des Gezeitenmodells
2. Länge der für die Bestimmung der Größe der Sprünge verwendeten linearen Fits

Um den Einfluss des Gezeitenmodells zu bestimmen, werden alle Schritte zur Bestimmung der absoluten Drift wiederholt, allerdings wird diesmal für die Gezeitenkorrektur das Modell von Michel van Camp verwendet, welches von ihm auch für die Korrektur der in dieser Arbeit verwendeten Absolutschwerewerte verwendet worden ist. Die Gezeitenparameter und die Wellengruppen dieses Modells stehen im Anhang in Tabelle .2. Für die Poltide und die „Length of Day Variation“ werden weiter die gleichen Modelle wie in Abschnitt 5.1 verwendet. Im Ergebnis ist für Sensor 1 wieder keine Drift erkennbar, für Sensor 2 ergibt sich ein Drift von $(0,030\,154 \pm 0,000\,004) \mu\text{Gal}/\text{d}$. Die Genauigkeitsangabe ergibt sich hier wieder aus der Größe mit der die Geradensteigungen im letzten Schritt der Driftbestimmung variiert. Dieser Wert weicht allerdings um $3 \cdot 10^{-5} \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ von dem Wert ab, der mit dem Gezeitenmodell von Eva Schroth bestimmt worden ist. Das heißt die Driftbestimmung ist auf Grund der Freiheit in der Wahl des Gezeitenmodells nur auf $10^{-4} \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$, also auf 0,3%, genau möglich.

Außerdem soll der Einfluss der Länge der linearen Fits zur Bestimmung der Größe der Sprünge untersucht werden. In Abschnitt 5.2 habe ich dafür 30000 Datenpunkte verwendet. Diese Zahl ist allerdings mehr oder weniger willkürlich gewählt, unter der Beobachtung, dass so der Einfluss von Ausreißern nahe des Sprungs gering gehalten wird und kurzzeitiges Verhalten der Schwere noch berücksichtigt wird. Kurzzeitiges Verhalten meint hier Veränderungen, die innerhalb weniger Monate auftreten. Es sollen jetzt drei weitere Fitlängen getestet werden und die Ergebnisse sowohl für die Größe der Sprünge, als auch für die Drift verglichen werden. Die gewählten Fitlängen sind: 43200, 262800 und 525600 Datenpunkte. Das entspricht ungefähr einem Monat, einem halben Jahr und einem Jahr. Wenn der Bereich zwischen zwei Sprüngen nicht genug Datenpunkte enthält, wird durch den gesamten Zeitraum, zwischen den Sprüngen ein Fit gelegt. Dabei lasse ich wieder 10 Datenpunkte vor dem nächsten, bzw. nach dem letzten Sprung weg. Ansonsten verfähre ich wie zuvor. Einzige Ausnahme ist, dass in dem Fall in dem die Höhe der Sprünge mit Hilfe von Fits über 262800 Datenpunkte bestimmt wird, im letzten Schritt nur Ausreißer größer als $10 \mu\text{Gal}$ entfernt werden, da sonst offensichtlich Signal mit entfernt wird, da der Verlauf des Signals dort nicht ausreichend linear ist. Die sich ergebenden Sprunghöhen stehen in Tabelle 5.3. Dort wird deutlich, dass die Sprunghöhe offensichtlich nur mit einer Genauigkeit von $4 \mu\text{Gal}$ bestimmt werden kann, denn das ist der Rahmen, in dem sie sich abhängig von der Länge der Fits ändert. In Abbildung 5.12 sind die sich nach Sprungkorrektur und allen Ausreißerentfernungen ergebenden Zeitreihen für Sensor 1 gemeinsam für alle Längen von Fits dargestellt. In allen 4 Kurven ist keine Drift erkennbar. Der Unterschied zwischen den Kurven beträgt am Ende des untersuchten Zeitraums bis zu $4 \mu\text{Gal}$. In Abbildung 5.13 sind die entsprechenden Kurven für Sensor 2 dargestellt, für alle vier Kurven ist ebenfalls, der zuletzt berechnete Fit eingezeichnet. Wieder weichen die Kurven am Ende des Zeitraums um bis zu ungefähr $4 \mu\text{Gal}$ voneinander ab. Auch ein Unterschied in den Ausgleichsgeraden ist deutlich zu erkennen. Die dazugehörigen Driften stehen in Tabelle 5.4. Sie sind dort auf $10^{-4} \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ genau angegeben, da ich bei der Untersuchung des Einflusses des Gezeitenmodells schon festgestellt habe, dass eine genauere Driftbestimmung nicht möglich ist. Hier wird aber deutlich, dass diese Driften um bis zu $0,0011 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ voneinander abweichen. Die Drift kann hier daher höchstens mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ bestimmt werden. Da bei anderen Längen von Fits zur Sprunghöhenbestimmung weitere Variationen in der gleichen Größenordnung wie hier auftreten können, gehe ich davon aus, dass die Drift von Sensor 2 hier auf $2 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ genau bestimmt worden ist. Das passt gut zu der Beobachtung, die ich in Abschnitt 5.4 gemacht habe, dass die Drift von Sensor 1 kleiner als $0,71 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}} = 0,0019 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ ist, sie also $(0,0000 \pm 0,0019) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ beträgt. Die Genauigkeiten der bestimmten Driften sind also für beide Sensoren fast gleich groß. Das war zu erwarten, da die Datenqualität und das Verfahren zur Driftbestimmung für beide Sensoren das selbe ist. Ich gehe daher für beide Sensoren von einer Genauigkeit von $\pm 0,7 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ aus. Somit beträgt die Drift von Sensor 2 $(0,030 \pm 0,002) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}} = (11,0 \pm 0,7) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$,

Tabelle 5.1: Bereiche für die Ausreißerentfernung. Start und Ende sind in Tagen seit dem 1.08.2010 angegeben. Der letzte Bereich endet für beide Sensoren am Ende des Datensatzes.

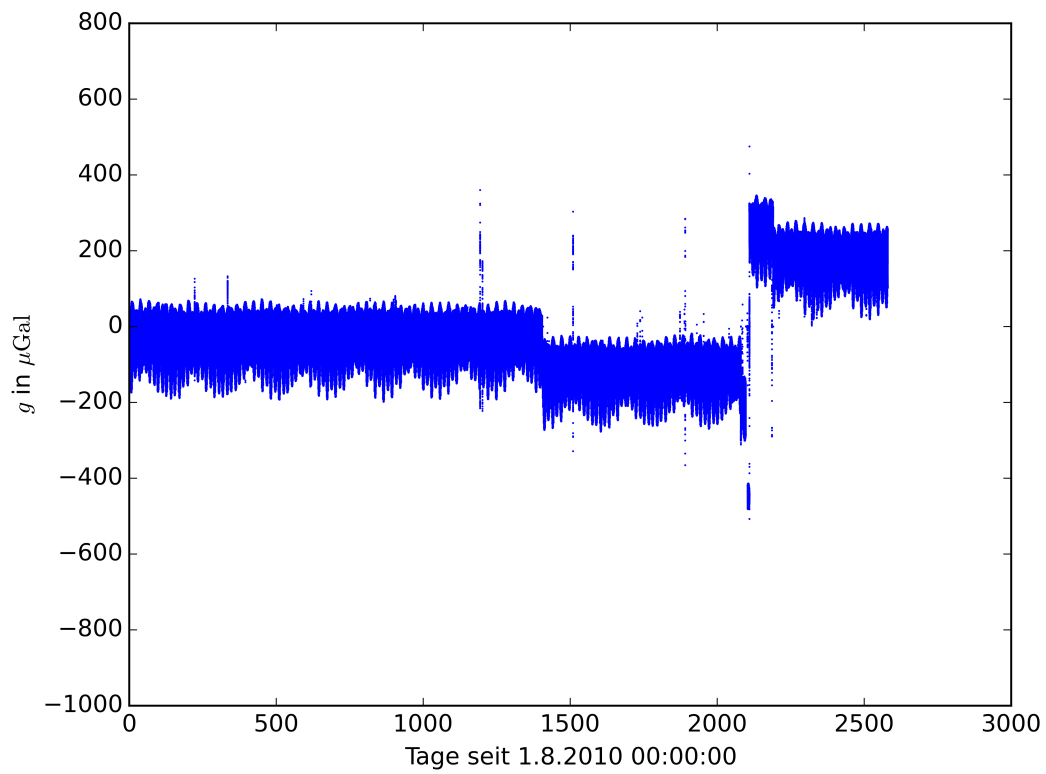
| Sensor 1 | | | Sensor 2 | | |
|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Bereich | Start | Ende | Bereich | Start | Ende |
| 1 | 0 | 1404,5403 | 1 | 0 | 1404,5403 |
| 2 | 1404,5403 | 2080,2576 | 2 | 1404,5403 | 2080,0632 |
| 3 | 2080,2576 | 2096,9313 | 3 | 2080,0632 | 2096,9313 |
| 4 | 2109,7083 | 2189,9479 | 4 | 2109,7153 | 2189,9507 |
| 5 | 2190,7979 | 2579,9993 | 5 | 2190,8951 | 2579,9993 |

Tabelle 5.2: Entfernte Sprünge. Die Tabelle zeigt den Zeitpunkt und die Höhe der entfernten Sprünge. Dabei ist der Zeitpunkt des letzten Datenpunkts vor dem Sprung in Tagen nach dem 1.8.2010 angegeben, außerdem wird das Datum des Sprungs angegeben.

| Sensor 1 | | | Sensor 2 | | |
|-----------|------------|-------------------------------|-----------|------------|-------------------------------|
| Zeitpunkt | Datum | Sprunghöhe in μGal | Zeitpunkt | Datum | Sprunghöhe in μGal |
| 1404,4604 | 05.06.2014 | -90,30 | 1404,4604 | 05.06.2014 | -168,39 |
| 2080,0632 | 11.04.2016 | -81,15 | 2080,0625 | 11.04.2016 | -107,85 |
| 2096,9306 | 27.04.2016 | 455,67 | 2096,9306 | 27.04.2016 | 468,84 |
| 2189,9472 | 29.07.2016 | -77,42 | 2189,9500 | 29.07.2016 | -84,71 |

die Drift von Sensor 1 $(0,000 \pm 0,002) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}} = (0,0 \pm 0,7) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$.

Sensor 1:



Sensor 2:

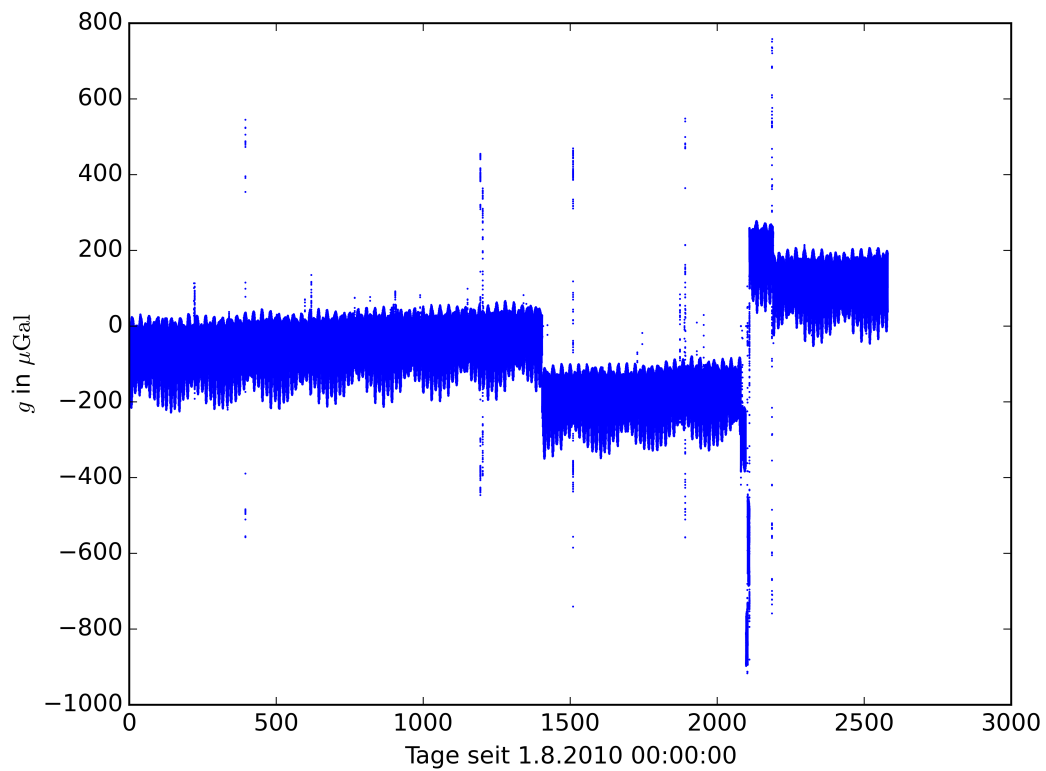
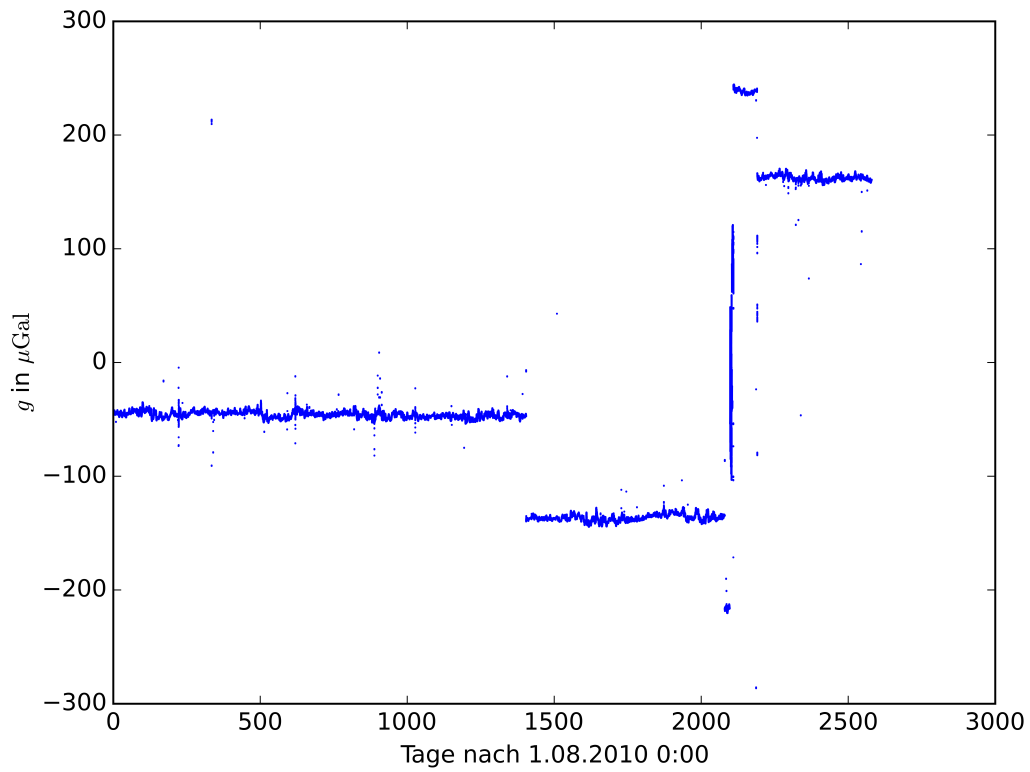


Abbildung 5.1: Unbearbeitete Daten. Die Abbildung zeigt die Ausgangsdaten von Sensor 1 und Sensor 2.

Sensor 1:



Sensor 2:

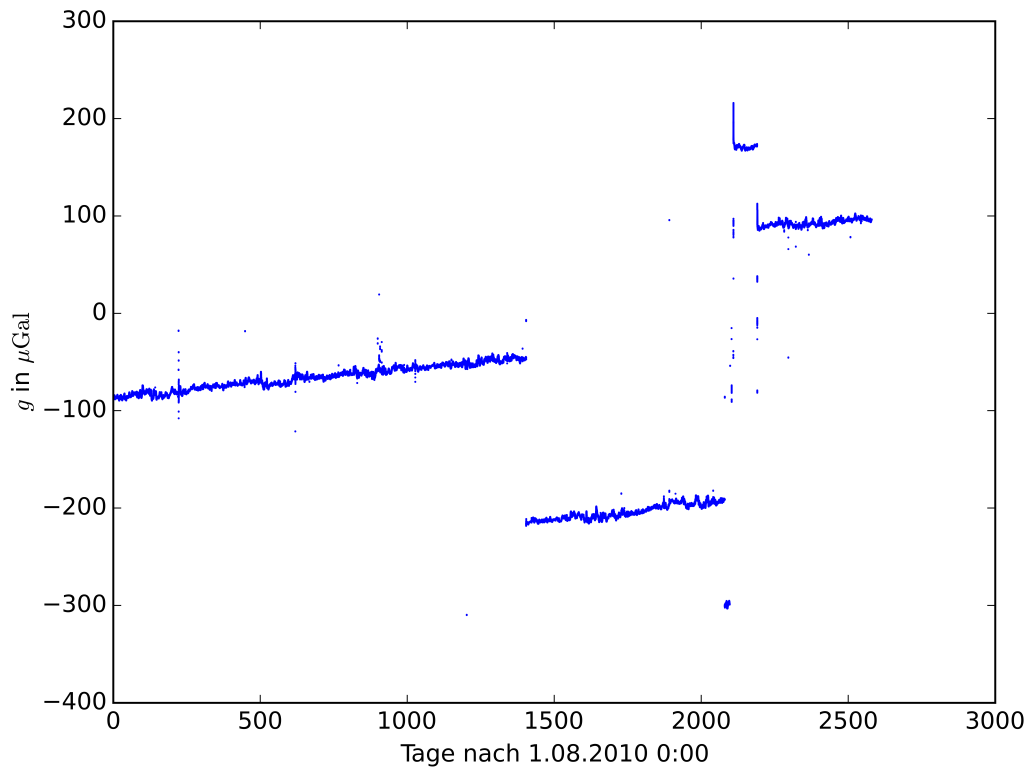


Abbildung 5.2: Nach der Gezeitenkorrektur. Die Abbildung zeigt die Daten von Sensor 1 und Sensor 2 nach der Gezeitenkorrektur und der Eliminierung der Ausreißer.

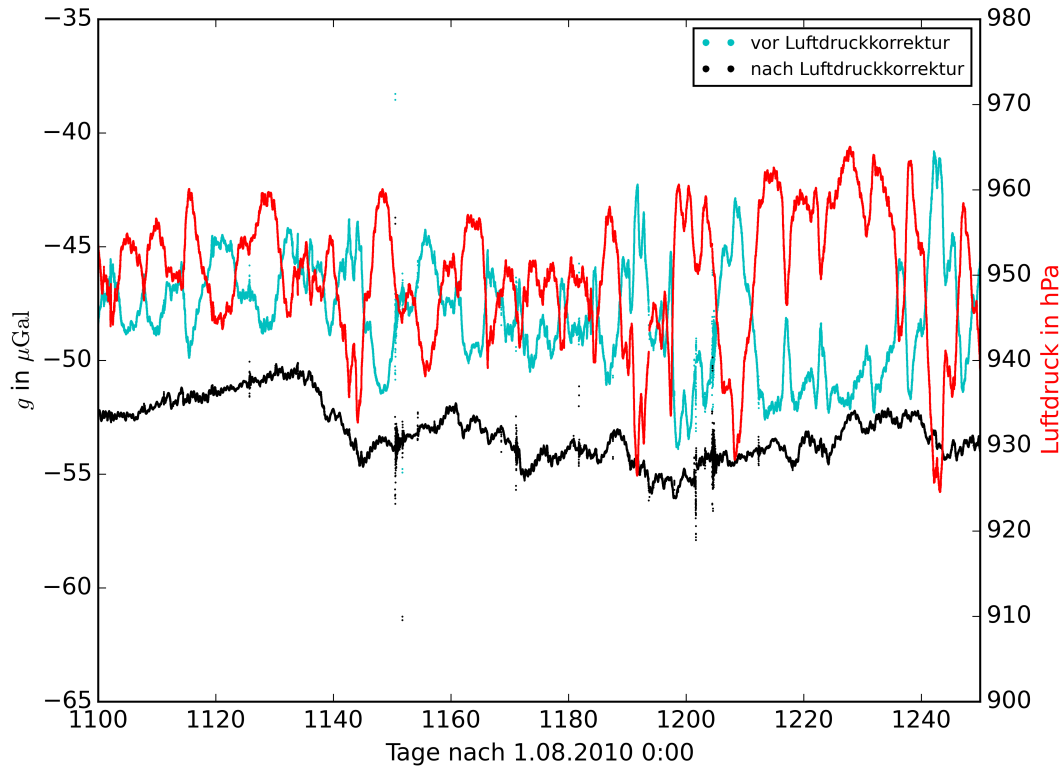


Abbildung 5.3: Luftdruck und Schwere vor und nach der Luftdruckkorrektur. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des zeitenkorrigierten Signals von Sensor 1 nach der Eliminierung der Ausreißer (türkis) gemeinsam mit dem Luftdruck (rot). In schwarz ist das Signal gezeigt, bei dem außerdem die Luftdruckkorrektur vorgenommen worden ist.

Tabelle 5.3: Variationen der Sprunghöhen. Die Tabelle zeigt den Zeitpunkt und die Höhe der entfernten Sprünge, in Abhängigkeit der Länge x der Fits mit Hilfe derer die Höhen bestimmt worden sind.

| Sensor 1: | | | | | |
|-----------|------------|---|-------------|--------------|--------------|
| Zeitpunkt | Datum | Sprunghöhe in μGal bei Fits aus x Datenpunkten | | | |
| | | $x = 30000$ | $x = 43200$ | $x = 262800$ | $x = 525600$ |
| 1404,4604 | 05.06.2014 | -90,30 | -89,64 | -90,73 | -89,06 |
| 2080,0632 | 11.04.2016 | -81,15 | -81,02 | -78,86 | -82,72 |
| 2096,9306 | 27.04.2016 | 455,67 | 457,04 | 454,87 | 454,87 |
| 2189,9472 | 29.07.2016 | -77,42 | -77,45 | -73,36 | -73,59 |
| Sensor 2: | | | | | |
| Zeitpunkt | Datum | Sprunghöhe in μGal bei Fits aus x Datenpunkten | | | |
| | | $x = 30000$ | $x = 43200$ | $x = 262800$ | $x = 525600$ |
| 1404,4604 | 05.06.2014 | -168,39 | -167,85 | -169,08 | -167,89 |
| 2080,0625 | 11.04.2016 | -107,85 | -107,82 | -105,73 | -110,09 |
| 2096,9306 | 27.04.2016 | 468,84 | 470,18 | 467,99 | 467,99 |
| 2189,9500 | 29.07.2016 | -84,71 | -84,95 | -81,29 | -81,68 |

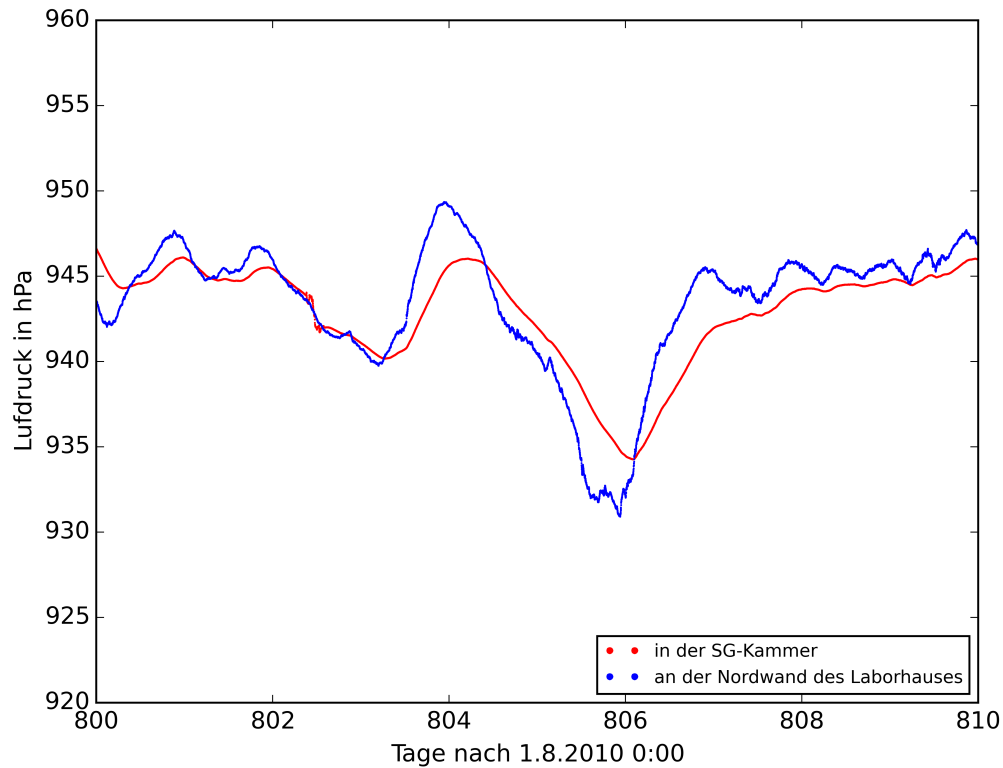
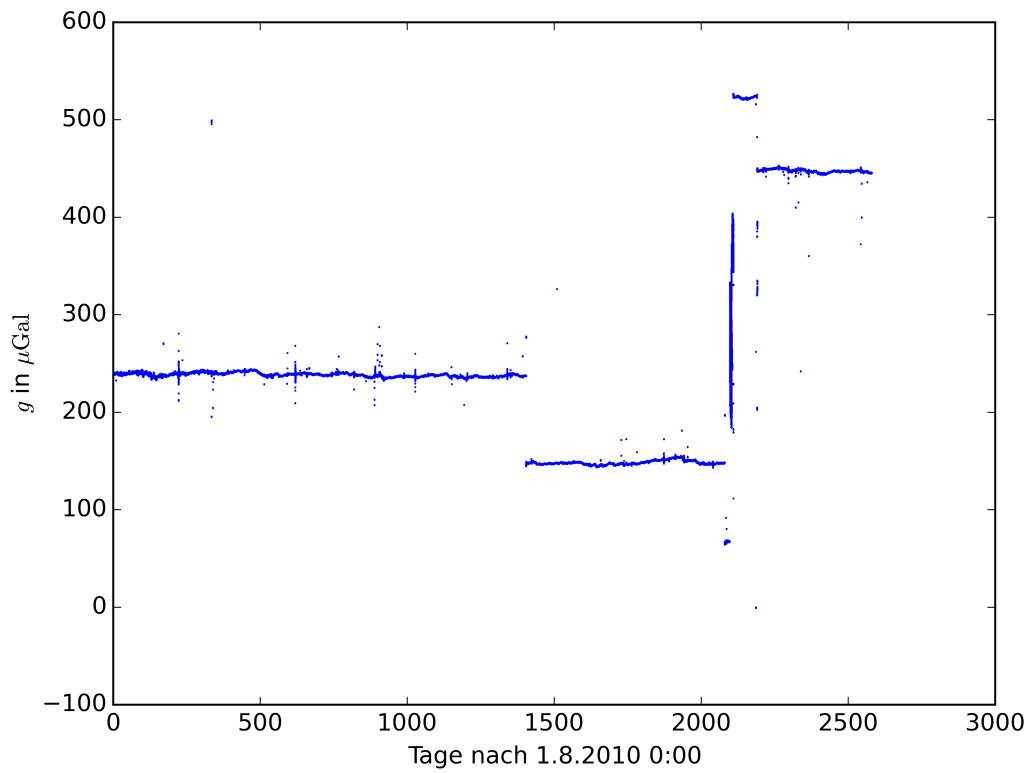


Abbildung 5.4: Vergleich Innen- und Außenluftdruck. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Luftdrucks, der in der SG-Kammer direkt am Gravimeter gemessen wird, und des Luftdrucks der außen an der Nordwand des Laborhauses gemessen wird.

Tabelle 5.4: Drift von Sensor 2 in Abhängigkeit der Länge der zur Bestimmung der Größe der Sprünge verwendeten Fits. In der Tabelle steht für jede getestete Länge der zur Sprunghöhenbestimmung verwendeten Fits die sich ergebende Drift von Sensor 2.

| Länge der Fits in Datenpunkten | Drift in $\frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ |
|--------------------------------|---|
| 30000 | 0,0301 |
| 43200 | 0,0294 |
| 262800 | 0,0290 |
| 525600 | 0,0300 |

Sensor 1:



Sensor 2:

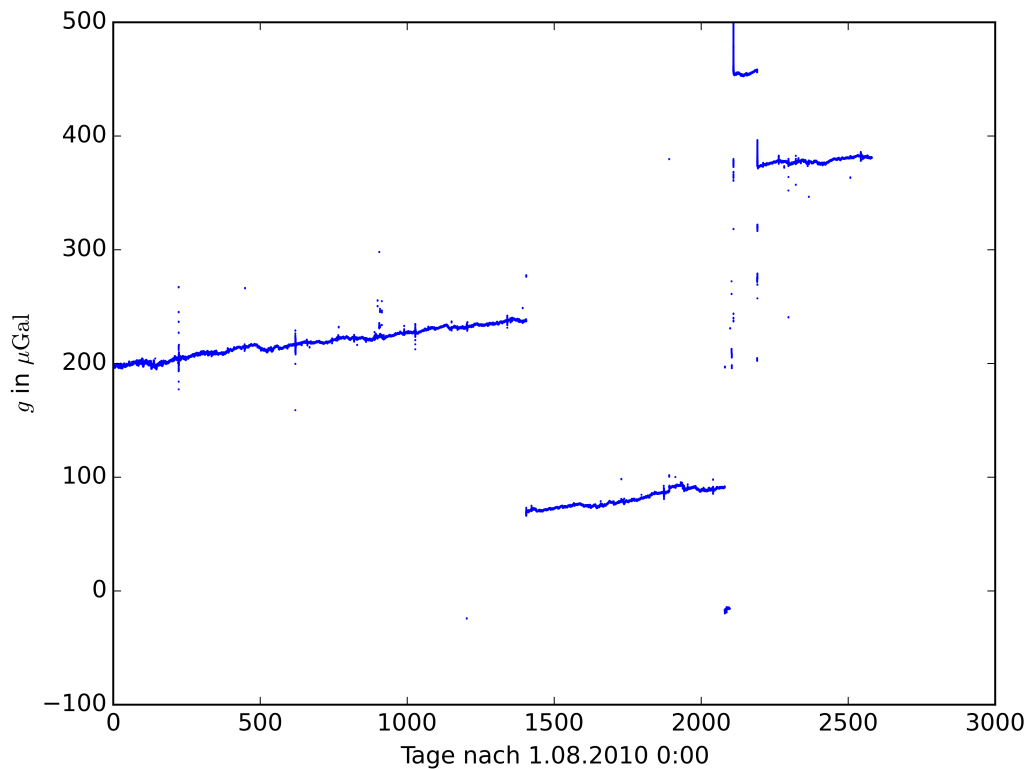
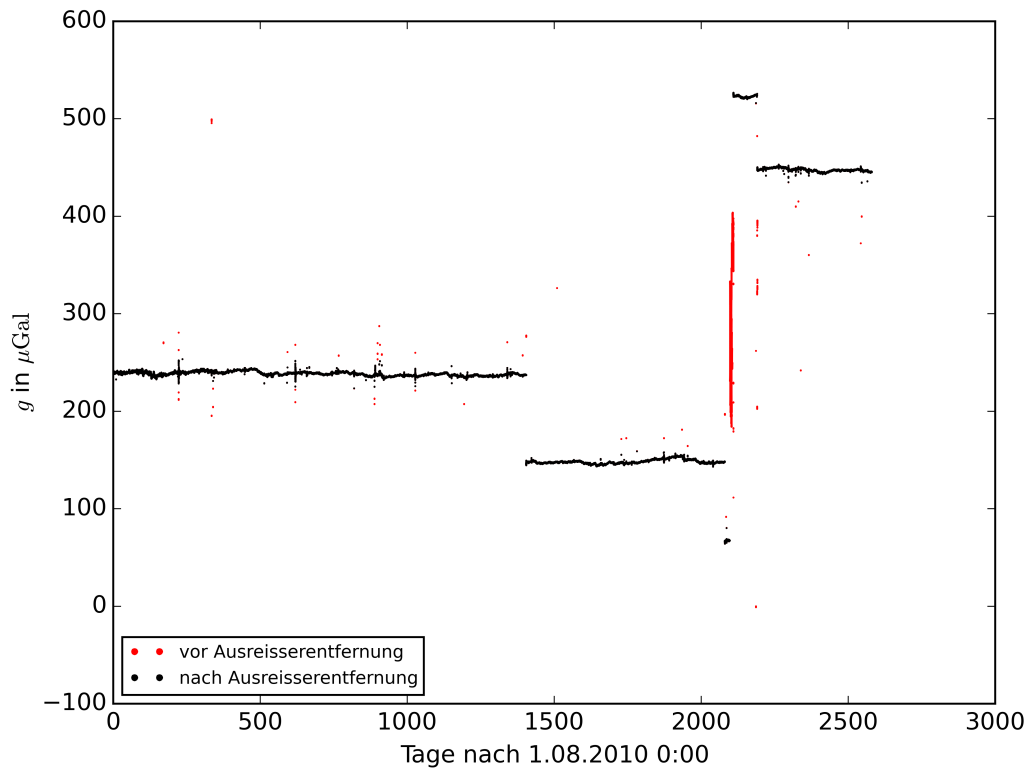


Abbildung 5.5: Nach der Luftdruckkorrektur. Die Abbildung zeigt die Daten von Sensor 1 und Sensor 2 nach der Gezeitenkorrektur, der Eliminierung der Ausreißer und der Luftdruckkorrektur.

Sensor 1:



Sensor 2:

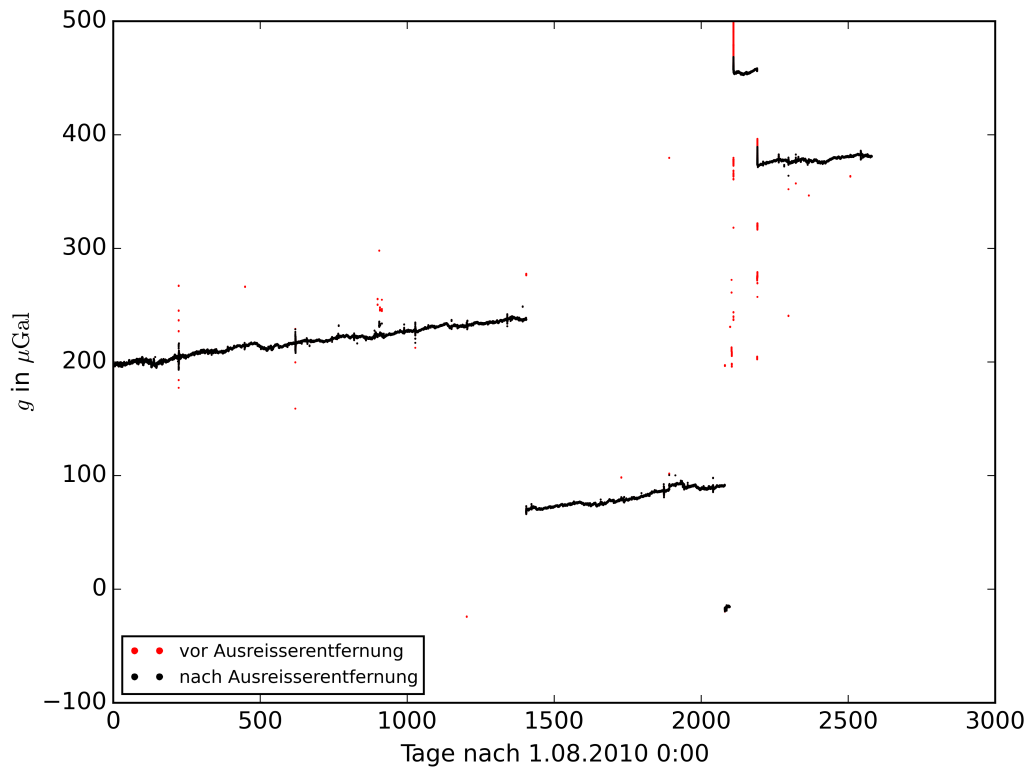
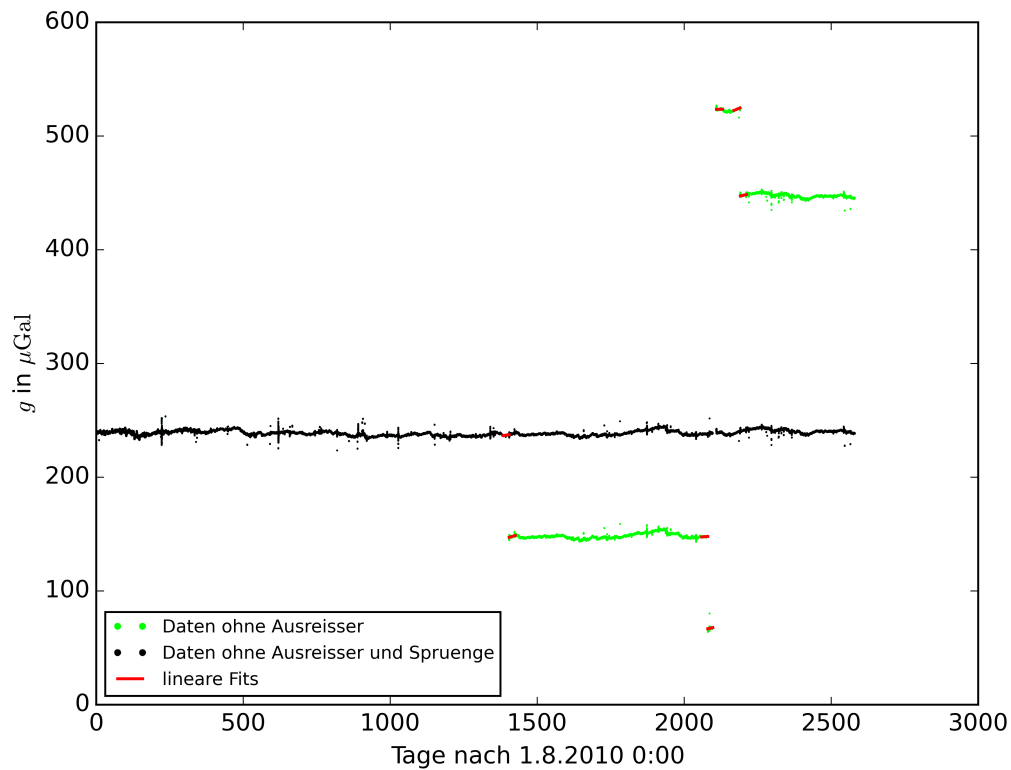


Abbildung 5.6: Ausreißerentfernung. Die Abbildung zeigt Daten von Sensor 1 und Sensor 2 vor und nach der Ausreißerentfernung.

Sensor 1:



Sensor 2:

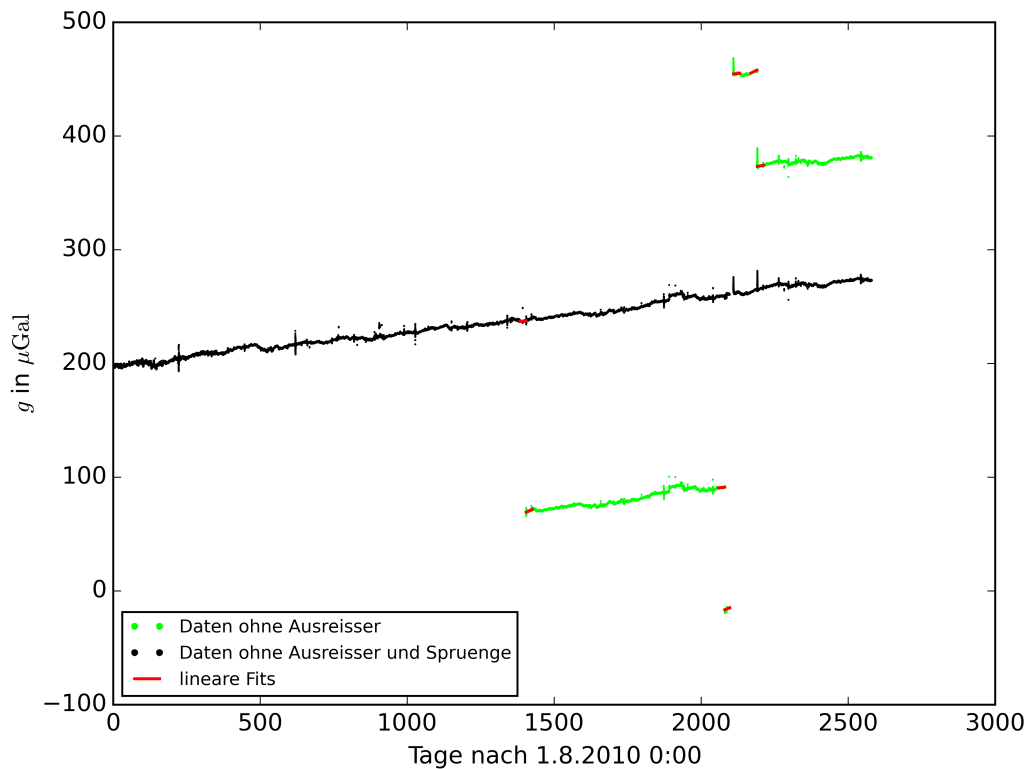


Abbildung 5.7: Entfernung der Sprünge. Die Abbildung zeigt Daten von Sensor 1 und Sensor 2 vor und nach der Entfernung der Sprünge. Außerdem sind die zum berechnen der Sprunghöhe verwendeten linearen Fits eingezeichnet.

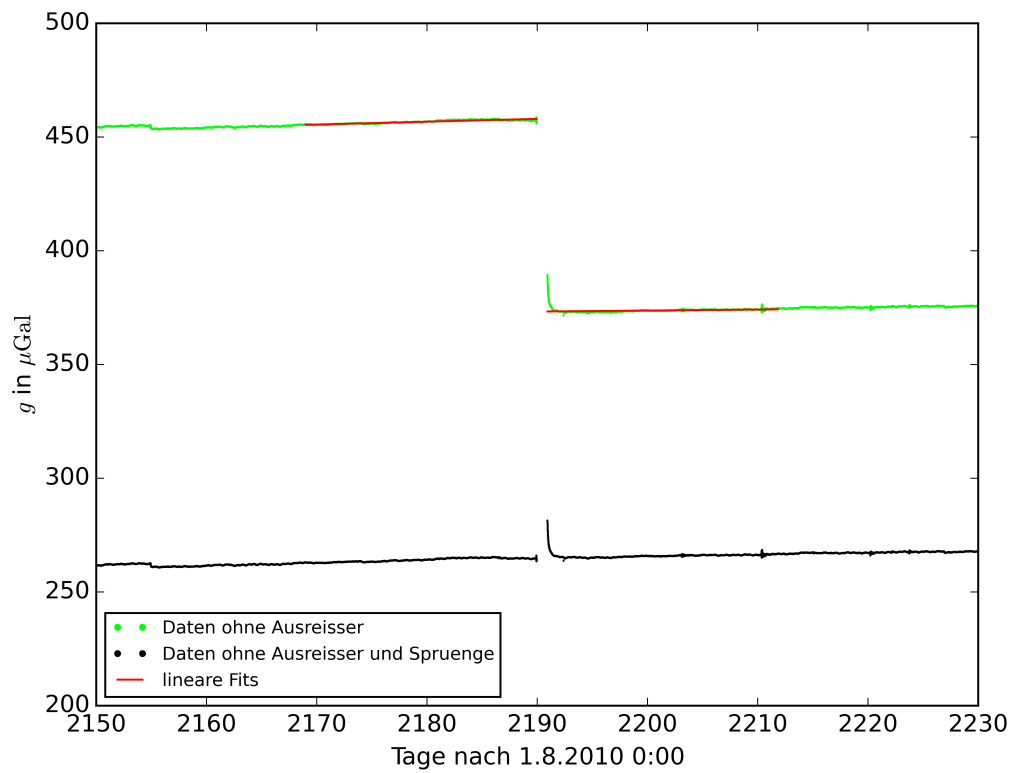


Abbildung 5.8: Entfernung des Sprungs am 29.7.2016 von Sensor 2. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt von Abbildung 5.7 für Sensor 2 um den vierten Sprung am 29.7.2016 herum.

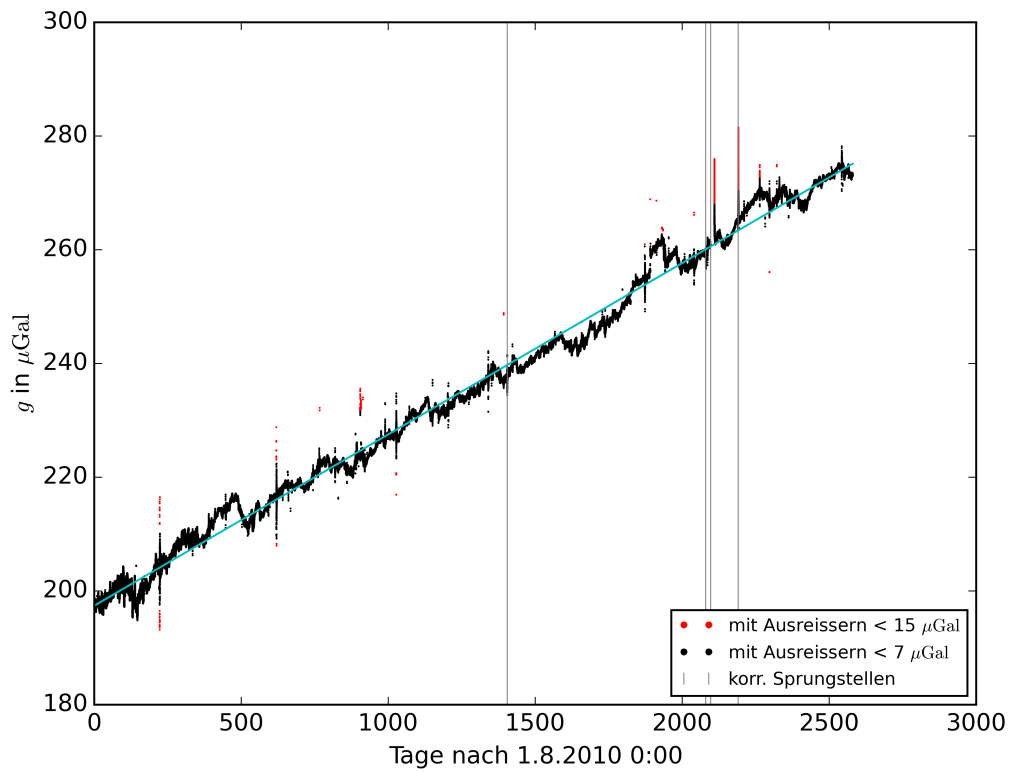


Abbildung 5.9: Drift von Sensor 2. In der Abbildung sind die Daten von Sensor 2 nach der Ausreißerentfernung aus Abschnitt 5.2 (verbliebene Ausreißer < 15 μGal), sowie nach der Ausreißerentfernung aus 5.3 (verbliebene Ausreißer < 7 μGal) dargestellt. Außerdem ist der lineare Fit durch die Daten mit Ausreißern kleiner als 7 μGal dargestellt.

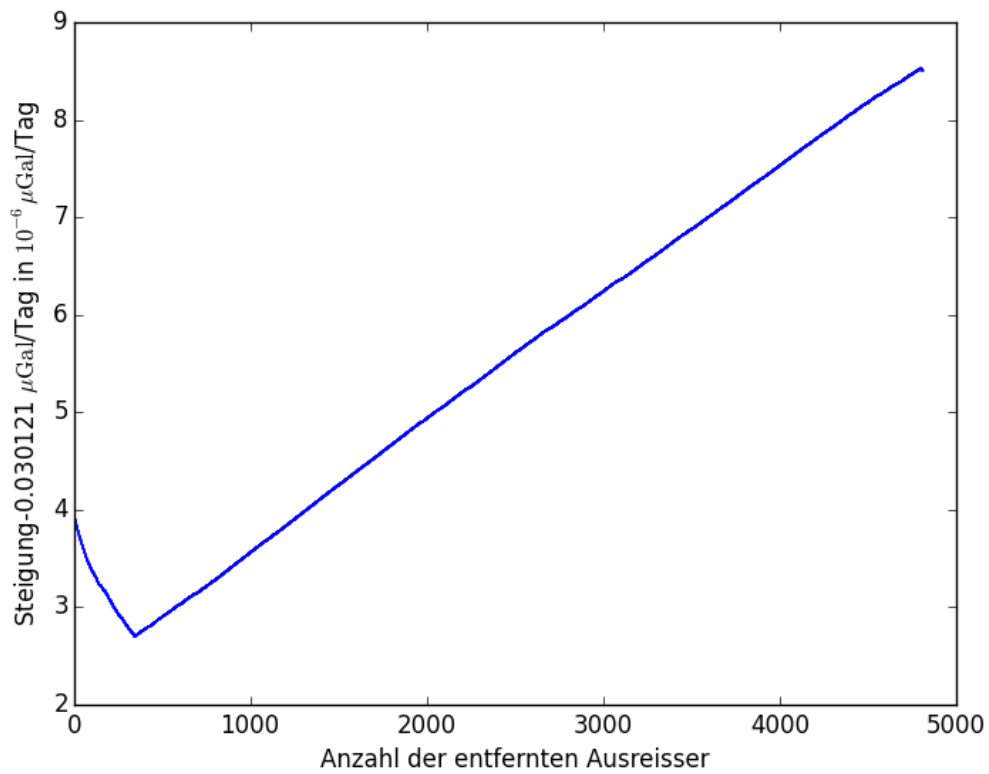


Abbildung 5.10: Steigungen der Regressionsgeraden. In der Abbildung ist die Steigung der berechneten Regressionsgeraden durch die Daten von Sensor 2 in Abhängigkeit der Anzahl der entfernten Ausreißer, die alle kleiner als $15 \mu\text{Gal}$ und größer als $7 \mu\text{Gal}$ sind, dargestellt.

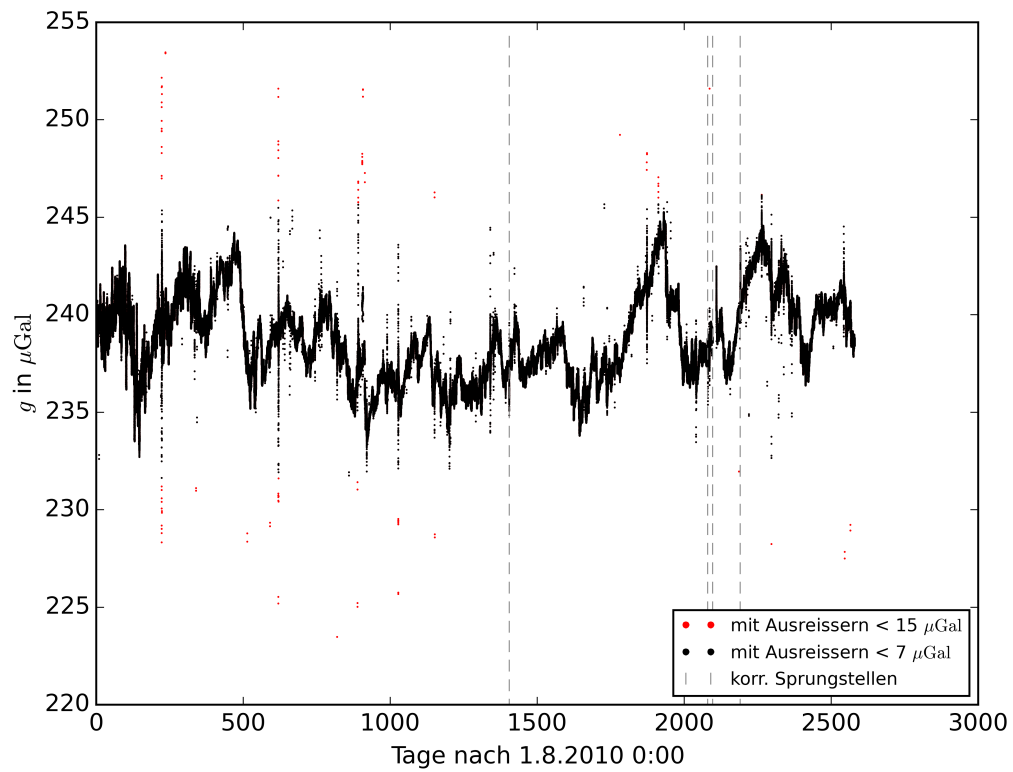


Abbildung 5.11: Drift von Sensor 1. In der Abbildung sind die Daten von Sensor 1 nach der Ausreißerentfernung aus Abschnitt 5.2 (verbliebene Ausreißer < 15 μGal), sowie nach der Ausreißerentfernung aus Abschnitt 5.4 (verbliebene Ausreißer < 7 μGal) dargestellt. Es ist kein Driftverhalten zu erkennen.

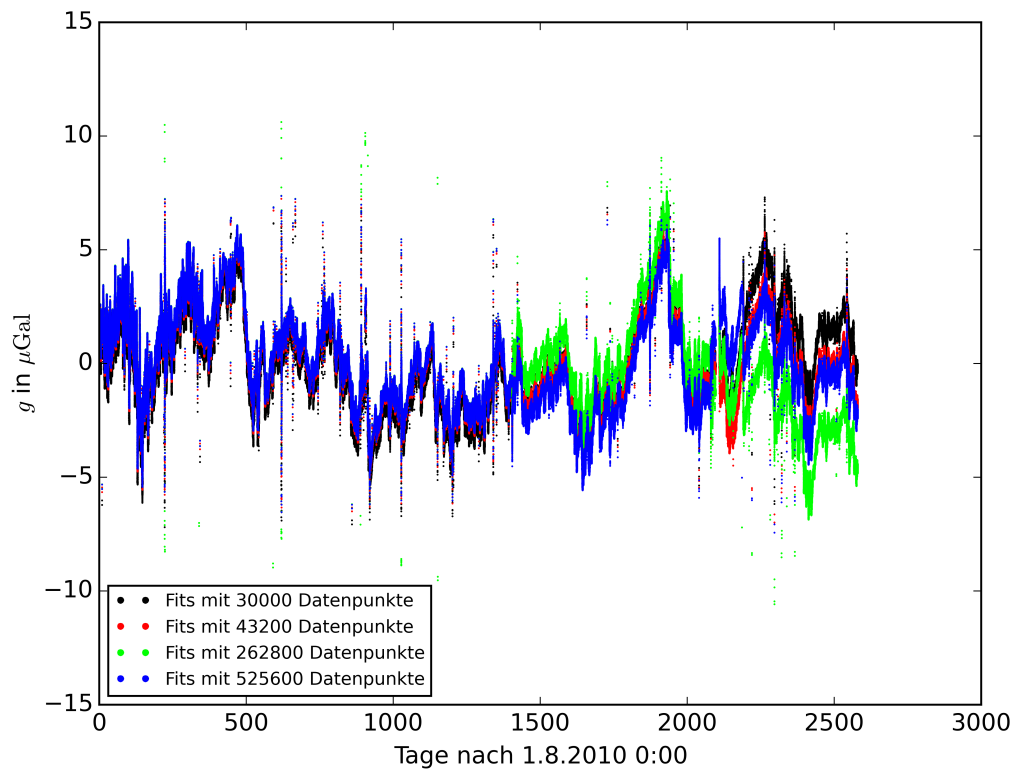


Abbildung 5.12: Einfluss der Fitlängen zur Bestimmung der Sprunghöhen auf das Ergebnis für Sensor 1. In der Abbildung sind die sich nach allen Korrekturen, Ausreißerentfernungen und Sprungentfernungen ergebenden Zeitreihen dargestellt, für die Fälle dass die linearen Fits zur Sprunghöhenbestimmung mit 30000, 43200, 262800 oder 525600 Datenpunkten berechnet worden sind.

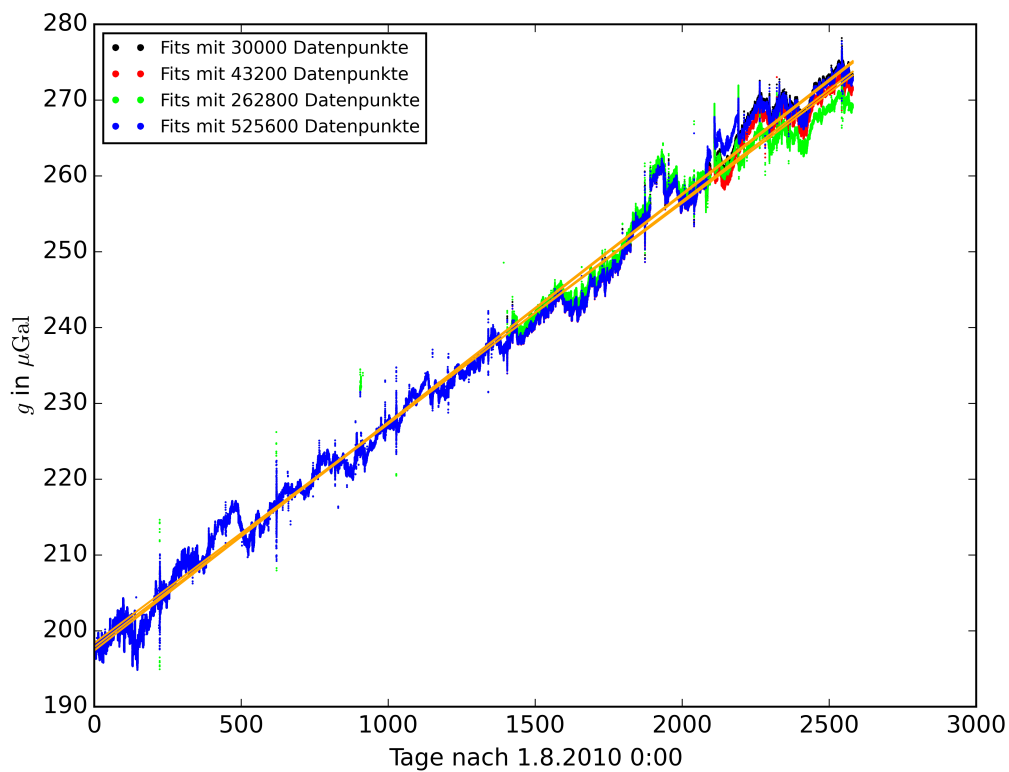


Abbildung 5.13: Einfluss der Fitlängen zur Bestimmung der Sprunghöhen auf das Ergebnis für Sensor 2. In der Abbildung sind die sich nach allen Korrekturen, Ausreißerentfernungen und Sprungentfernungen ergebenden Zeitreihen dargestellt, für die Fälle, dass die linearen Fits zur Sprunghöhenbestimmung mit 30000, 43200, 262800 oder 525600 Datenpunkten berechnet worden sind. Außerdem ist für jede Zeitreihe, der zugehörige lineare Fit in orange eingezeichnet.

6. Vergleich der Daten des SG-056 mit Absolutschwerewerten

In diesem Kapitel sollen die driftbefreiten Daten des SG056 mit den in Kapitel 3 gezeigten Absolutschwerewerten verglichen werden. In Abbildung 6.1 sind alle Daten gemeinsam dargestellt. Für Sensor 1 sind das die Werte, die sich nach der Gezeitenkorrektur, der Luftdruckkorrektur, allen Ausreißerentfernungen und dem Entfernen der Sprünge mit Fits aus 30000 Datenpunkten ergeben. Bei den Daten für Sensor 2 ist zusätzlich die Geradengleichung der letzten berechneten Ausgleichsgerade über den gesamten Zeitraum, die Drift, abgezogen worden. Diese Daten von Sensor 1 und Sensor 2 sind an die Absolutschwerewerte angehängt worden. Das heißt zu den korrigierten relativen Werten ist jeweils ein konstanter Wert addiert worden, sodass die Werte von Sensor 1, Sensor 2 und der Absolutschwere zum Zeitpunkt der ersten Absolutschweremessung exakt übereinstimmen. Idealerweise sollten der Verlauf der Daten von Sensor 1 und Sensor 2 jetzt gleich sein und zu den Zeitpunkten der Absolutschweremessungen mit diesen übereinstimmen, denn mit der Drift und den Sprüngen wurden alle instrumentellen Effekte aus den Daten entfernt. Das Restsignal sollte nur nicht korrigierte Variationen der Schwere, wie die Hydrologie oder globale Effekte des Luftdrucks enthalten. Diese sind für alle drei Messinstrumente die gleichen.

Grundsätzlich scheinen der Verlauf der Daten von Sensor 1 und Sensor 2 sehr ähnlich zu sein. Allerdings treten auch Differenzen zwischen den Signalen auf. Deren Größe in diesem Abschnitt genauer untersucht wird. Die Signale von Sensor 1 und Sensor 2 gehen, bis auf für die vierte Absolutschweremessung, durch die Fehlerbalken der Absolutschwerewerte. In Abbildung 6.2 ist die Differenz zwischen den verbliebenen Signalen von Sensor 1 und Sensor 2 dargestellt. Darin sind ebenfalls die Zeitpunkte der korrigierten Sprünge eingezeichnet. Außerdem sind die Stellen markiert, in denen in der Sensordifferenz in Kapitel 4 Sprünge gefunden wurden. Diese können auch jeweils bei mindestens einem der beiden Sensoren wiedergefunden werden. Sie sind aber alle kleiner als $4 \mu\text{Gal}$, also kleiner als die Genauigkeit mit der die Sprunghöhe bestimmt werden kann. Deshalb war es sinnvoll sie nicht zu korrigieren. An allen Stellen, an denen ein Sprung markiert ist, macht auch die Differenz der korrigierten Daten einen Sprung. Das liegt daran, dass die Sprünge nicht perfekt oder gar nicht korrigiert worden sind. Die Differenz der korrigierten Daten springt auch noch an weiteren Stellen, wie zum Beispiel ungefähr 1200 Tage nach dem 1.8.2010 und 2200 Tage nach dem 1.8.2010. Dies könnte darauf hindeuten, dass dort ebenfalls ein Sprung bei mindestens einem der beiden Sensoren aufgetreten ist, dieser aber zu klein war, um mit der Methode aus Kapitel 4 in der Sensordifferenz erkannt zu werden. Zwischen den Sprüngen ist jeweils eine Drift in der Differenz der korrigierten Daten zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass nicht die gesamte Drift aus den Daten entfernt worden ist. Die verbleibende Drift ändert sich nach jedem Sprung. Sie ist zu Beginn negativ, ist dann ungefähr 700 Tage nach dem 1.8.2010 nahezu 0, danach ist sie positiv und wird mit Ausnahmen nach jedem Sprung größer. Die Drift scheint sich daher doch nach jedem Sprung zu ändern, allerdings in so geringem Maße, dass diese Änderung kleiner als die Genauigkeit der hier bestimmten Drift ist. Dies passt auch zu den in Kapitel 4 gemachten Beobachtungen. Dort

ist der Betrag der relativen Drift in der Sensordifferenz kleiner geworden, da sie negativ ist, ist die relative Drift damit insgesamt größer geworden, genauso wie hier die Drift in der Differenz der korrigierten Signale zunimmt. In beiden Fällen sind die Daten von Sensor 2 von den Daten von Sensor 1 abgezogen worden. Um zu überprüfen, ob die Änderungen in der relativen Drift auch quantitativ mit den hier auftretenden Veränderungen der übrigen bleibenden Drift übereinstimmen, lege ich durch die Differenz der korrigierten Daten zwei Ausgleichsgeraden, eine zu Beginn und eine zum Ende des Zeitraums. Sie sind ebenfalls in Abbildung 6.2 eingezeichnet. Die Zeiträume der Ausgleichsgeraden, ihre Steigungen und deren Standardabweichungen stehen in Tabelle 6.1. Die Differenz der beiden Steigungen beträgt $0,004\,079 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$. Das passt gut mit der in Kapitel 4 beobachteten Differenz von $0,004\,425 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ zusammen. Daraus schließe ich, dass diese Differenzen in der relativen Drift nicht zufällig durch die Wahl der Zeiträume der Fits entstehen, sondern dass es tatsächlich zu einer Änderung der Drift nach jedem Sprung kommt. Diese Änderungen summieren sich über den gesamten Zeitraum zu einer Verringerung der Drift um $0,004 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}}$ auf.

Insgesamt sind die Differenzen zwischen den korrigierten Daten von Sensor 1 und Sensor 2 aber nie größer als $2,5 \mu\text{Gal}$ und somit immer kleiner als die Genauigkeit der Sprungkorrektur. Daher sind beide Signale im Rahmen ihrer Genauigkeit gleich.

Es soll jetzt überprüft werden, wie weit die vierte Absolutschweremessung von den Daten von Sensor 1 zu diesem Zeitpunkt abweicht. Dazu ist in Abbildung 6.3 ein Ausschnitt von Abbildung 6.1 um den Zeitpunkt der vierten Absolutschweremessung herum dargestellt. Die dort ebenfalls eingezeichneten Daten, die mit dem Gezeitenmodell von Michel van Camp korrigiert worden sind, spielen weiter unten eine Rolle. Dieser Vergleich zeigt, dass das Signal von Sensor 1 hier ungefähr $2 \mu\text{Gal}$ außerhalb des Fehlerbalkens der Absolutmessung liegt. Diese Abweichung ist wieder kleiner als $4 \mu\text{Gal}$, also kleiner als die Ungenauigkeit der Sprungkorrektur. Somit stimmen alle Absolutmessungen im Rahmen der diskutierten Ungenauigkeiten mit den korrigierten Relativdaten überein.

Als letztes soll getestet werden, ob der hier unternommene Vergleich aussagekräftig ist, denn die von Michel van Camp verwendeten Korrekturmodelle zur Gezeiten- und Luftdruckkorrektur sind nicht exakt die gleichen, wie die von mir verwendeten. Das könnte Auswirkungen auf den Vergleich von Absolutdaten und korrigierten Relativdaten haben. Zunächst soll der Einfluss der verschiedenen Gezeitenmodelle untersucht werden. Dazu wird die gemeinsame Darstellung aller Daten auch für die bereits in Kapitel 5.5 mit dem Gezeitenmodell von Michel van Camp korrigierten Daten erstellt. Dabei wird genauso vorgegangen wie oben beschrieben. Als Drift wird von den Daten von Sensor 2 der letzte lineare Fit durch die mit Michel Van Camps Gezeitenmodell korrigierten Daten abgezogen. Die sich ergebene Darstellung ist für den gesamten Zeitraum in Abbildung 6.4 zu sehen. Für den Zeitraum um die vierte Absolutmessung herum ist sie in Abbildung 6.3 gemeinsam mit den Daten dargestellt, die mit dem Gezeitenmodell von Eva Schroth korrigiert worden sind. In der Abbildung für den gesamten Zeitraum ist fast keine Veränderung im Vergleich zu der mit dem Gezeitenmodell von Eva Schroth erstellten Abbildung zu erkennen. In der Abbildung des Ausschnitts um die vierte Absolutmessung herum, fällt zwar auf, dass in den Daten, die mit dem Gezeitenmodell von Michel van Camp korrigiert worden sind, mehr Gezeitenreste zu erkennen sind als in den Daten, die mit dem Gezeitenmodell von Eva Schroth korrigiert worden sind. Die Abweichung des Signals von Sensor 1 von der Absolutmessung wird aber nur minimal kleiner. Das andere Gezeitenmodell ändert daher nichts an der Tatsache, dass alle drei Datensätze im Rahmen der Ungenauigkeiten übereinstimmen. Die Unterschiede in den von mir und von Michel van Camp verwendet Korrekturen der Polbewegung und der Atmosphäre sind immer jeweils kleiner als $0,6 \mu\text{Gal}$. Daher können sie keinen signifikanten Einfluss auf den Vergleich haben.

Insgesamt lässt sich daher sagen, dass die gezeiten-, luftdruck-, sprung- und driftkorrigierten Werte von Sensor 1 und Sensor 2 sowohl untereinander als auch mit den Absolutschwerewerten im Rahmen aller Unsicherheiten übereinstimmen. Das zeigt, dass die Driften in

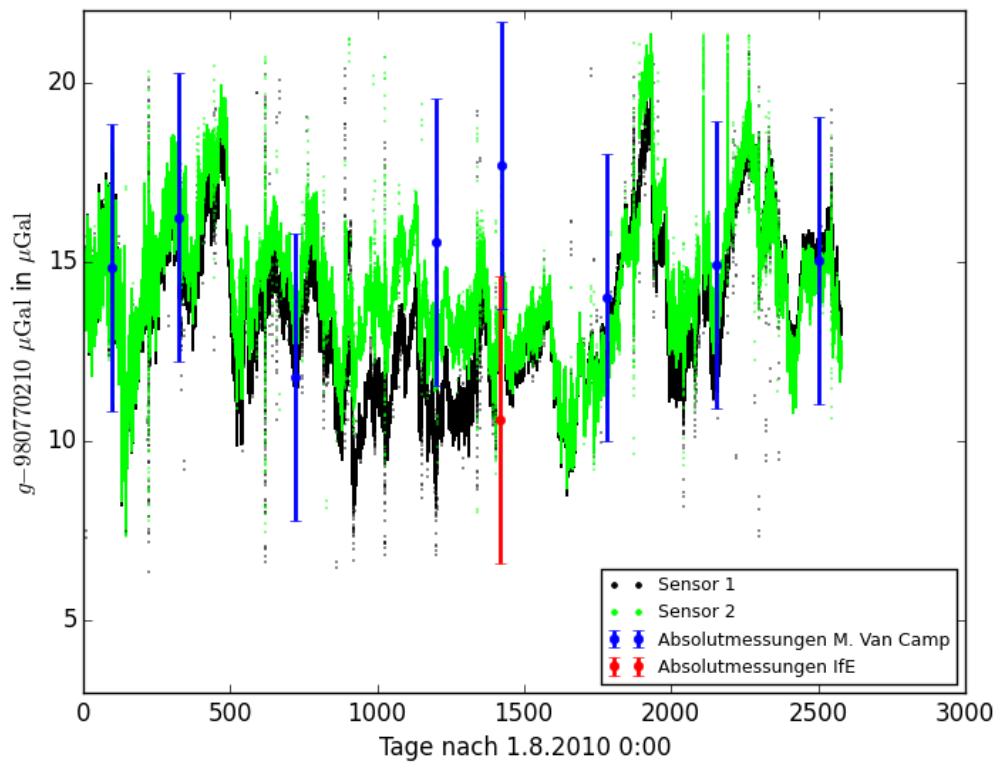


Abbildung 6.1: Vergleich Sensor1, Sensor 2 und Absolutschweremessungen.

Die Abbildung zeigt die Daten von Sensor 1 und Sensor 2 nach der Gezeitenkorrektur, der Luftdruckkorrektur allen Ausreißerentfernungen und dem Entfernen der Sprünge mit Fits aus 30000 Datenpunkten. Von den Daten von Sensor 2 ist außerdem die in Abschnitt 5.3 bestimmte Drift abgezogen worden. Die Werte der Absolutschweremessungen von Michel van Camp und dem IfE sind ebenfalls dargestellt. Die Daten von Sensor 1 und 2 sind an die erste Absolutschweremessung angehängt.

Kapitel 5 korrekt bestimmt worden sind.

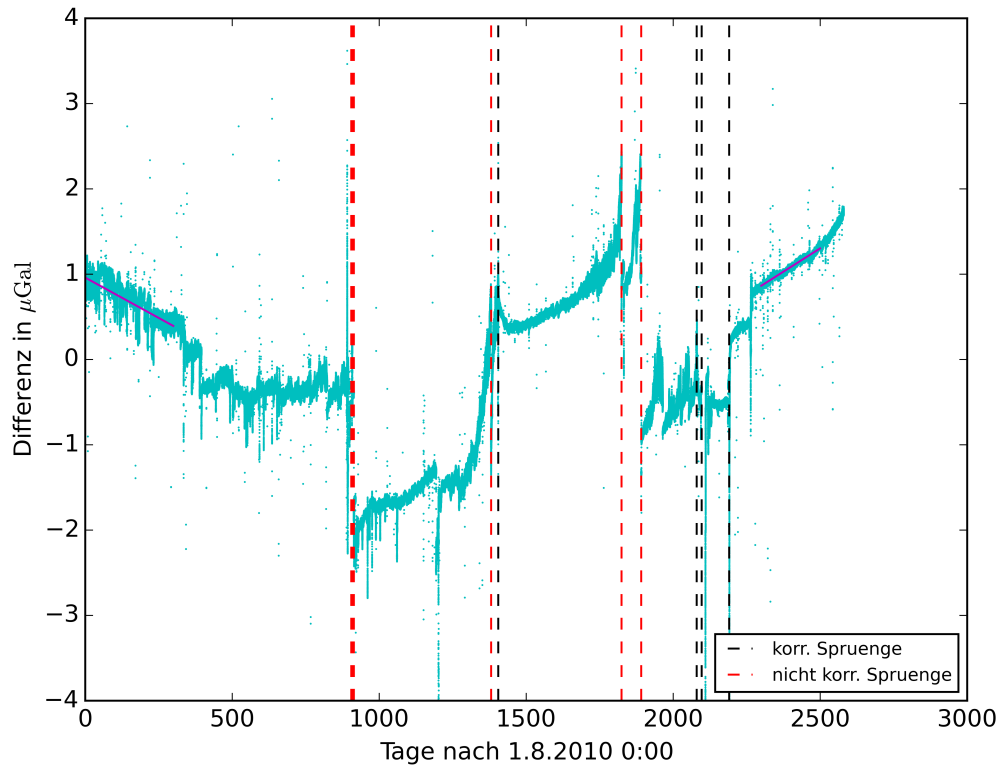


Abbildung 6.2: Differenz der korrigierten Daten von Sensor 1 und Sensor 2. Die Abbildung zeigt die Differenz der gezeiten- und luftdruckkorrigierten Daten von Sensor 1 und Sensor 2 nach allen Ausreißerentfernungen und dem Entfernen der Sprünge mit Fits aus 30000 Datenpunkten. Für Sensor 2 ist außerdem die in Abschnitt 5.3 bestimmte Drift abgezogen worden. In schwarz sind die Zeitpunkte der korrigierten Sprünge, in rot die der nicht korrigierten Sprünge, die alle kleiner als $4 \mu\text{Gal}$ sind, eingezeichnet. Zu Beginn und am Ende des Zeitraums ist ein linearer Fit an die Daten angelegt worden. Diese sind in magenta in der Abbildung eingezeichnet. Die Zeitabschnitte der Ausgleichsgeraden, ihre Steigungen und deren Standardabweichungen stehen in Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Lineare Fits an die Differenz in den korrigierten Daten. In der Tabelle stehen die Zeiträume der in Abbildung 6.2 eingezeichneten linearen Fits. Start- und Endzeitpunkte sind in Tagen seit dem 1.8.2010 angegeben. Außerdem sind die Steigungen der Fits sowie deren Standardabweichungen angegeben.

| Start | Ende | Steigung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ | Standardabweichung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ |
|-------|------|--------------------------------------|--|
| 0 | 300 | -0,001891 | $2,4 \cdot 10^{-6}$ |
| 2300 | 2500 | 0,002188 | $1,22 \cdot 10^{-6}$ |

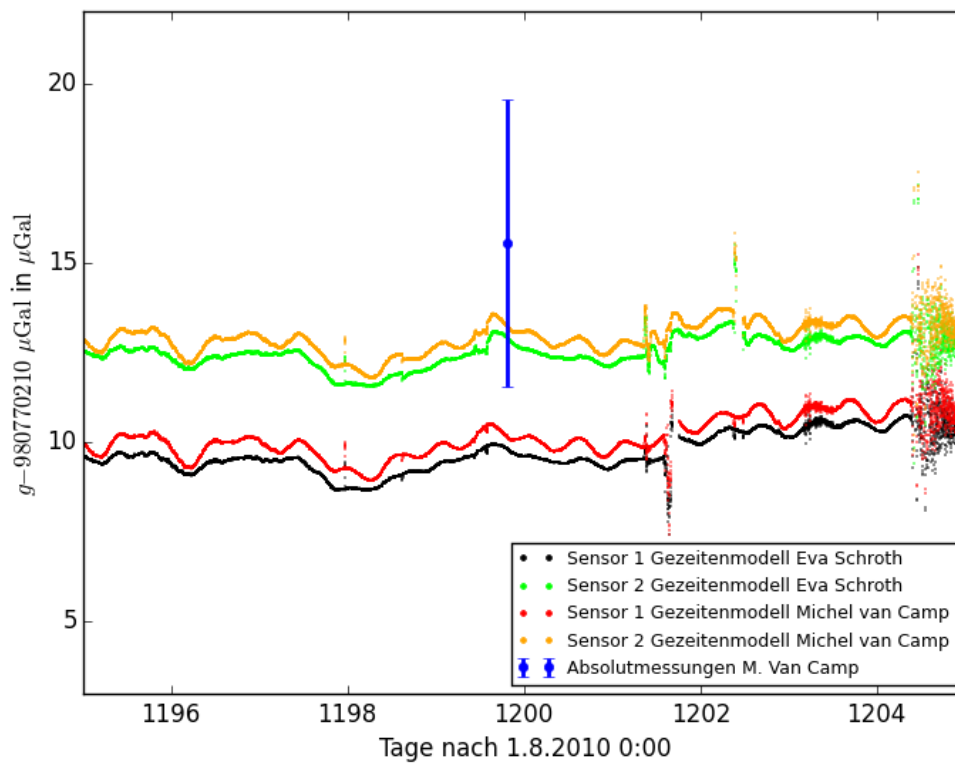


Abbildung 6.3: Vierte Absolutmessung. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt von Abbildung 6.1 um die vierte Absolutmessung herum. Bei den Daten von Sensor 1 und Sensor 2 ist für die Gezeitenkorrektur einmal das Gezeitenmodell von Eva Schroth und einmal das Gezeitenmodell von Michel van Camp verwendet worden.

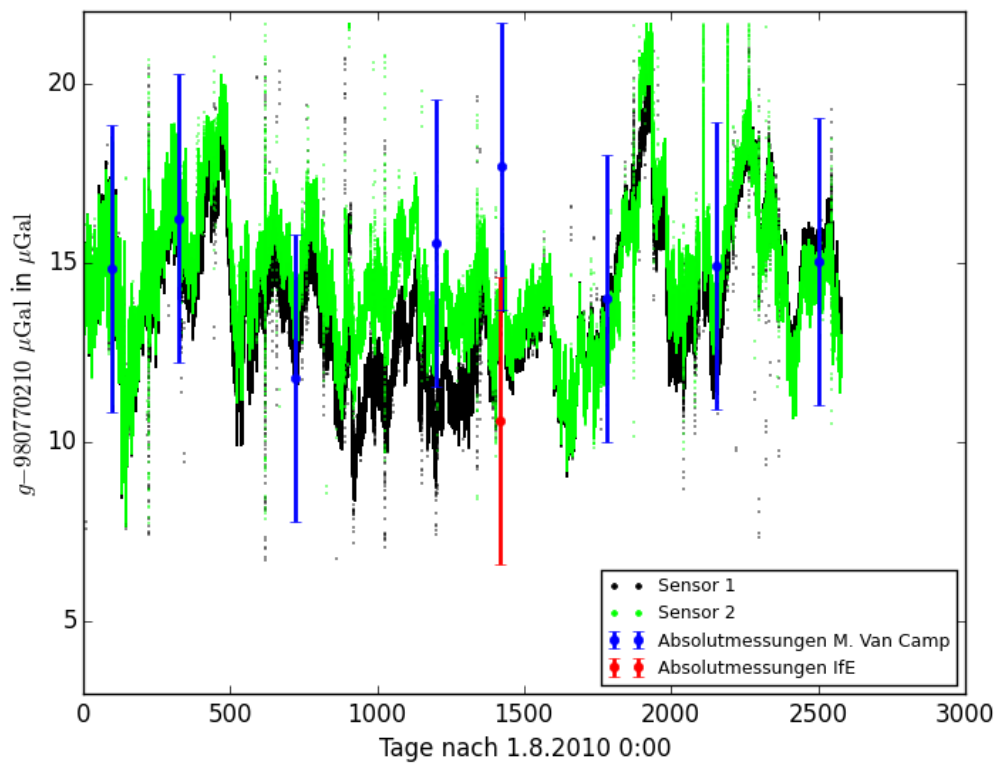


Abbildung 6.4: Vergleich Sensor 1, Sensor 2 und Absolutschweremessungen. Die Abbildung zeigt den gleichen Vergleich wie Abbildung 6.1. Allerdings ist diesmal für die Gezeitenkorrektur der Daten von Sensor 1 und Sensor 2 das Gezeitenmodell von Michel van Camp benutzt worden.

7. Gründe für die Sprünge in den Messreihen

In diesem Abschnitt soll soweit möglich geklärt werden, was die in Abschnitt 5.2 gefundenen Sprünge in den korrigierten Daten, sowie die in Kapitel 4 gefundenen Sprünge in der relativen Drift jeweils verursacht hat.

Zunächst betrachte ich die vier großen Sprünge in den korrigierten Schweredaten, die in Abschnitt 5.2 korrigiert wurden. Für alle 4 Sprünge ist in den Abbildungen 7.1 bis 7.3 ein Ausschnitt der korrigierten Daten um den Sprung herum dargestellt. Für die Sprünge am 11.4.2016 und am 27.4.2016 gibt es eine gemeinsame Darstellung. Die gezeigten Daten sind gezeiten- und luftdruckkorrigiert, es sind aber diesmal keine Ausreißer entfernt worden. An den Sprungstellen des Sprungs am 5.6.2014 und des Sprungs am 11.4.2016 ist außer den Sprüngen nichts auffälliges zu sehen. Der Sprung am 27.4.2016 besteht eigentlich aus 3 Sprüngen im Abstand von wenigen Tagen. Für Sensor 1 ist dort außerdem zwischendurch ein Signal, dass die Form von Gezeiten hat, zu sehen. Beim vierten Sprung ist in den Daten beider Sensoren zusätzlich zum Sprung ein pulsartiges Signal zu sehen. Mit Hilfe der Log-Files der Voltmeterdatenaufzeichnung¹, des Instrumentenhandbuchs und Erklärungen von Thomas Forbriger, der am BFO arbeitet, will ich jetzt die in den Abbildungen sichtbaren Sprünge möglichen Ursachen zuordnen:

5.6.2014
Abbildung 7.1

Auf Grund eines Stromausfalls war das SG-056 zwei Stunden ohne Strom. Da der Kühkopf danach ratternde Geräusche von sich gegeben hat, wurde er aus dem Dewar gehoben und sowohl der Kühkopf als auch der Dewar wurden mit Helium-Gas gespült. Danach lief der Kühkopf wieder normal.

11.4.2016
Abbildung 7.2

Die Stromversorgung des SG-056 ist ausgefallen.

¹Log-Files sind Dateien, die die Voltmeterdatenaufzeichnung erzeugt. Darin stehen Kommentare, die bei einer Arbeit am Messgerät, direkt dort eingegeben werden können.

27.4 bis 10.5.2016
Abbildung 7.2

Am 27.4. ist die Stromversorgung spät abends wieder ausgefallen. Dies blieb bis zum 28.4. mittags unbemerkt. Durch den Ausfall des thermischen Regelkreises kam es zu einer starken Unterkühlung der Sensoren, da die Kühlung weiter lief. Dadurch kommt es in den Daten von Sensor 2 zu einem Sprung in der Ausgangsspannung. Die Ausgangsspannung von Sensor 1 saturiert und bleibt konstant. Dadurch ist in den korrigierten Daten von Sensor 1 ein Signal in Form von Gezeiten sichtbar, da das Gezeitensignal in der Gezeitenkorrektur von einem konstanten Signal abgezogen wird. Am 4.5. wurde der Feedback von Sensor 1 in unterschiedlichen Betriebsmoden betrieben. Dadurch ist es gelungen das Signal von Sensor 1 teilweise in den Messbereich zurückzuholen. Eine halbe Gezeitenwelle wurde von da an immer korrekt aufgezeichnet, für die andere Hälfte der Gezeitenwelle ist die Ausgangsspannung weiterhin saturiert. Somit wird in der Gezeitenkorrektur die eine Hälfte der Welle korrekt korrigiert und zeigt danach einen konstanten Wert. Für die andere Hälfte der Welle wird weiterhin, das Gezeitensignal von einem konstanten Wert abgezogen. Am 10.5 wurden die Tragströme neu eingestellt. Ab diesem Zeitpunkt läuft alles fehlerfrei weiter.

29.7.bis 30.7.2016
Abbildung 7.3

Am 29.7 ist erneut die Stromversorgung ausgefallen. Es kam wieder zu einer Unterkühlung der Sensoren, die zu einem starken Unterdruck im Dewar geführt hat. Dieser kann die Membran zwischen dem Kolben des Kühlkopfes und dem Dewar schädigen, was zu Fremdgaseintritt in den Dewar führen kann. Daher wurde Wärme in Form von einzelnen Wärmepulsen zugeführt. Diese Pulse wirken sich auf die Sensoren aus, was zu einer scheinbaren pulsartigen Schwereänderung führt, die in den Messdaten zu sehen ist.

In Kapitel 4 habe ich am 21.1.2013, am 24.1.2013, am 30.1.2013, am 12.5.2014, am 5.10.2015 und am 30.7.2015 weitere Sprünge in der Sensordifferenz gefunden, zusätzlich zu denen, die ich auch in den korrigierten Daten der einzelnen Sensoren gefundenen habe. Auch diese möchte ich möglichen Ursachen zuordnen:

21., 24. und 30.1.2013 An diesen drei Tagen wurden jeweils die Fußschrauben, des SG056 verstellt um die Vertikalität der Sensoren neu zu justieren. Da die beiden Sensoren nicht ganz exakt parallel zueinander ausgerichtet sind, wirken sich diese Justierungen nicht in gleicher Weise auf beide Sensoren aus und es kommt zu einem Sprung in der relativen Drift.

- 12.5.2014 Für einen Test, des Dieselgenerators wird die externe Stromversorgung des Elektrizitätswerk auf den Dieselgenerator umgeschaltet. Es kommt dabei unbeabsichtigt zu einem kurzen Ausfall des Kompressors und des Kaltkopfes, die eigentlich von der USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) am Kompressor weiter gespeist werden sollten. Warum dies zu einer scheinbaren Schwereänderung führt ist unklar. Es könnte sein, dass eine leichte Temperaturänderungen der Sensoren, die durch den Ausfall des Kaltkopfes entstanden sein könnte, dazu geführt hat.
- 5.10.2015 Für eine Frequenzkalibrierung wurden beide Sensoren mit Rechtecksignalen angeregt. Dabei wurden an Sensor 2 auch Rechteckanregungen im open loop modus vorgenommen, das heißt es fand keine Gegenregelung statt, wodurch sich die Kugel frei bewegen konnte. Das kann zum mechanischen Anschlag der Kugel geführt haben, wodurch der Sprung entstanden sein kann.
- 30.7.2015 An diesem Tag gab es einen längeren Aufenthalt von 3 Personen in der SG-Kammer, da die Presseabteilung des KIT Fotos vom SG-056 gemacht hat. Dabei war die Tür der SG-Kammer ungefähr zwei Stunden geöffnet, wodurch es zu einem Temperaturabfall in der SG-Kammer kam. Denn auf Grund der Elektronik beträgt die Temperatur in der SG-Kammer immer um die 23 °C, die Temperatur im Stollen aber nur 11 °C. Wodurch der plötzliche Sprung in der relativen Drift zustande kommt ist unklar.

Es gibt also an alle Daten, an denen ich Sprünge gefunden habe Einträge in den Log-Files oder dem Instrumentenhandbuch. Vor allem die Sprünge am 12.5.2014 und am 30.7.2015 zeigen aber, dass Sprünge in den Daten auch ohne größere Eingriffe entstehen können. Auffallend ist außerdem, dass ich mit den von mir verwendeten Methoden zum Finden von Sprüngen keine Sprünge am 10.1.2013 und am 11.10.2016 gefundenen habe. Denn das sind die beiden Tage, an denen der Kühlkopf gewechselt worden ist, was zu den größten Eingriffen ins Messinstrument gehört. Daher ist in den Abbildungen 7.4 und 7.5 die Sensordifferenz dieser beiden Tage noch einmal im Detail dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass es an beiden Tagen doch einen Sprung gegeben hat. Dieser beträgt aber am 10.1.2013 nur ungefähr 1 μGal und am 11.10.2016 nur ungefähr 0,25 μGal , daher habe ich sie vorher nicht gefunden. Es ist erstaunlich, dass diese Sprünge nur so klein sind.

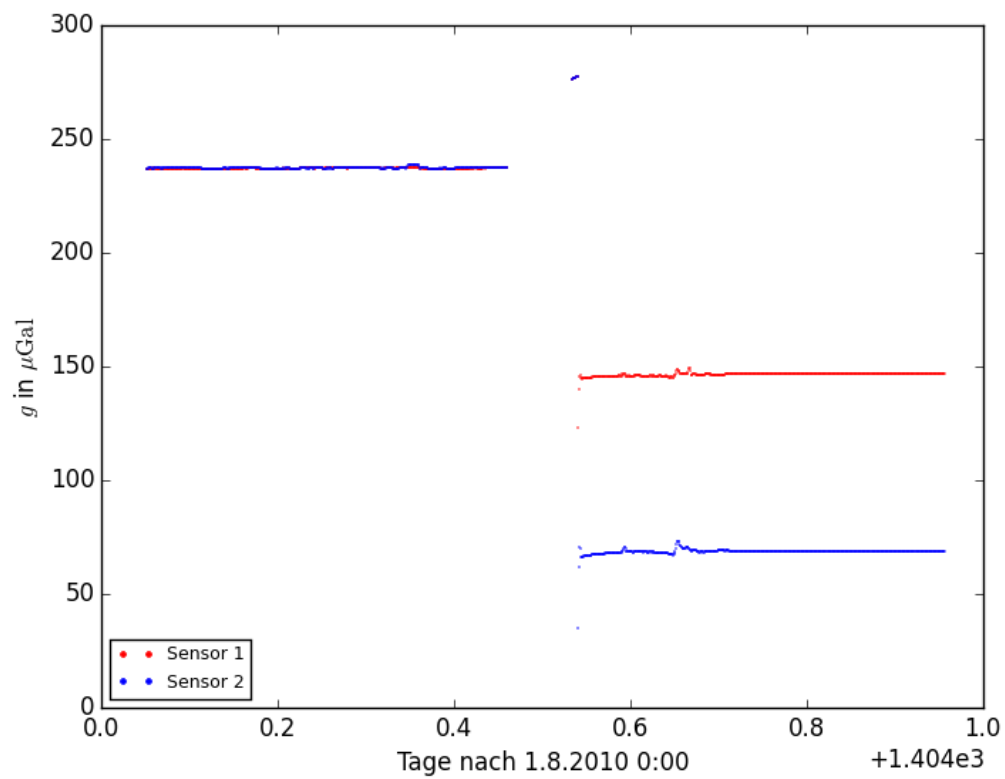


Abbildung 7.1: Erster großer Sprung in den korrigierten Daten. Die Abbildung zeigt einen Großteil der gezeiten- und luftdruckkorrigierten Signale von Sensor 1 und Sensor 2 am 5.6.2014. Hier sind keine Ausreißer entfernt worden.

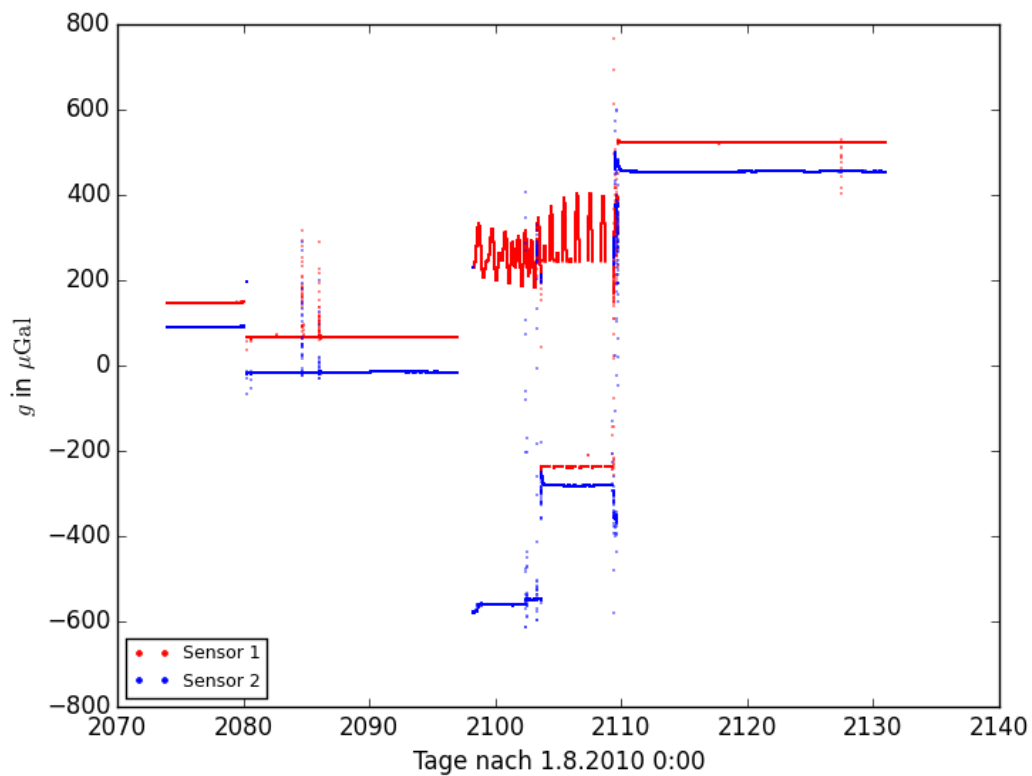


Abbildung 7.2: Zweiter und dritter großer Sprung in den korrigierten Daten. Die Abbildung zeigt die gezeiten- und luftdruckkorrigierten Signale von Sensor 1 und Sensor 2 im Zeitraum des dritten und vierten Sprungs. Hier sind keine Ausreißer entfernt worden. 2080 Tage nach dem 1.8.2010 war der 11.4.2016.

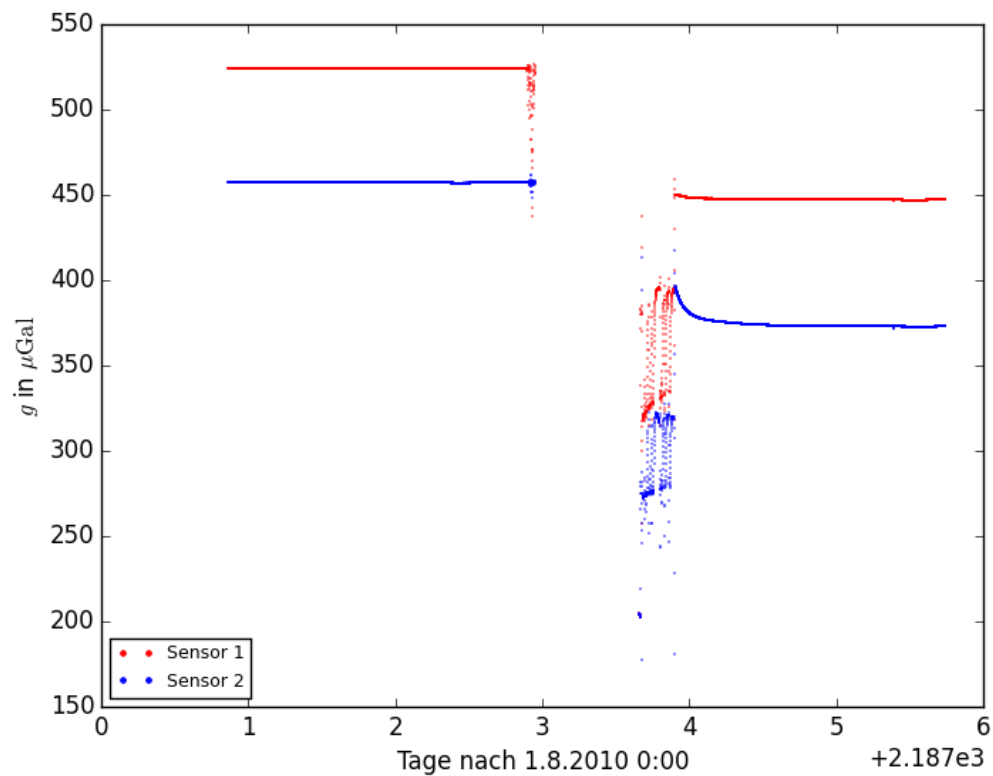


Abbildung 7.3: Vierter großer Sprung in den korrigierten Daten. Die Abbildung zeigt die gezeiten- und luftdruckkorrigierten Signale von Sensor 1 und Sensor 2 im Zeitraum des vierten Sprungs. Hier sind keine Ausreißer entfernt worden. 2189 Tage nach dem 1.8.2010 war der 29.7.2016.

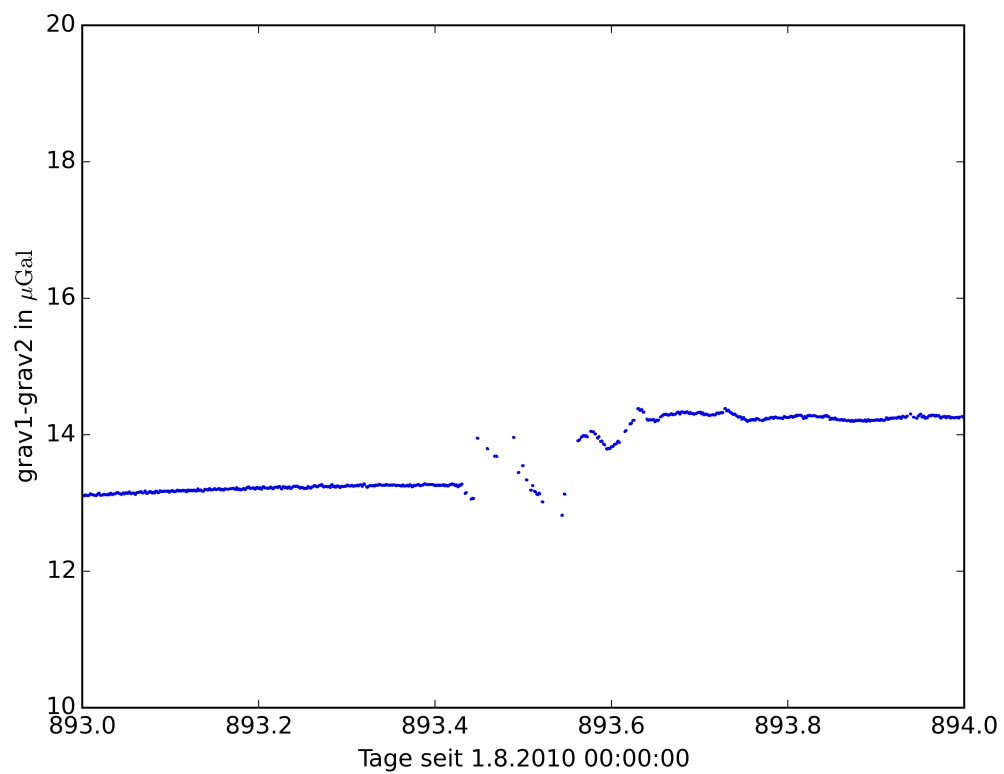


Abbildung 7.4: Erster Kühkopfwechsel. Die Abbildung zeigt die Sensordifferenz am 10.1.2013, dem Tag des ersten Kühkopfwechsels.

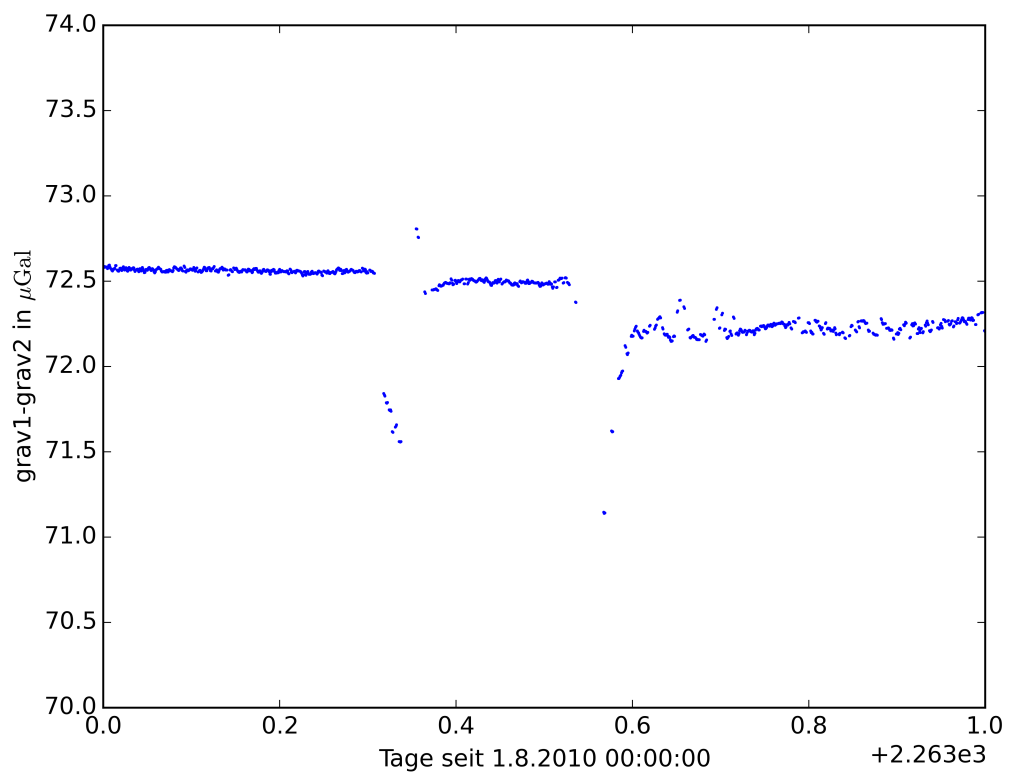


Abbildung 7.5: Zweiter Kühkopfwechsel. Die Abbildung zeigt die Sensordifferenz am 11.10.2016 dem Tag des zweiten Kühkopfwechsels

8. Untersuchung der Daten der seismischen Datenerfassung

Um zu untersuchen, ob zwischen der Drift der Daten der seismischen Datenerfassung und der Drift der Daten der Voltmeterdatenerfassung Unterschiede bestehen, vergleiche ich die Sensordifferenzen der beiden Datenerfassungen. Die Sensordifferenz der seismischen Datenerfassung, wird genauso berechnet wie die Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung in Abschnitt 4. Auch Ausreißer eliminiere ich in gleicher Weise. Die Sensordifferenzen sind gemeinsam in Abbildung 8.1 dargestellt. Sie scheinen fast identisch zu sein, bis auf einen kleinen Offset, der ab dem ersten großen Sprung auftritt und ab dem dritten großen Sprung etwas größer ist. Um die Unterschiede in den beiden Sensordifferenzen genauer zu untersuchen ist in Abbildung 8.2 die Differenz der beiden Sensordifferenzen dargestellt. In dem Signal sind Sprünge, eine Drift und ein gezeitenartiges Signal zu erkennen. Um die Sprünge besser einordnen zu können sind in der Abbildung außerdem alle Sprünge, die in der relativen Drift der Voltmeterdatenerfassung gefunden worden sind markiert. Auffällig ist, dass der zweite Sprung in der Differenz der Sensordifferenzen zu einem Zeitpunkt auftritt, an dem ich in der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung keinen Sprung gefunden habe. Alle anderen Sprünge in der Differenz der Sensordifferenzen fallen mit einem Sprung in der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung zusammen.

Am Anfang und am Ende des Untersuchungszeitraums lege ich an die Differenz der Sensordifferenzen eine Ausgleichsgerade an. Die Zeitabschnitte, die Steigungen und die Standardabweichungen der Steigungen dieser Ausgleichsgeraden stehen in Tabelle 8.1. Diese Drift muss aus einer der Datenerfassungen kommen, denn falls sie aus dem Messgerät selbst käme, wäre sie für beide Datenerfassungen gleich und würde sich nicht in der Differenz der Sensordifferenzen der beiden Datenerfassungen zeigen. Da, wie in Abschnitt 2.2 erläutert, von der Voltmeterdatenerfassung keine nennenswerte Drift zu erwarten ist, schließe ich daraus, dass die seismische Datenerfassung eine Drift in der Größenordnung von $0,00027 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}} \approx 0,01 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ aufweist.

Bei dem gezeitenartigen Signal fällt auf, dass seine Amplitude nach dem zweiten Sprung zunimmt. Da in der Differenz der Sensordifferenzen ein gezeitenartiges Signal sichtbar ist, muss dieses bereits in mindestens einer der beiden Sensordifferenzen aufgetreten sein. Daher sind in Abbildung 8.3 und 8.4 15-tägige Ausschnitte der Sensordifferenzen beider Datenerfassungen dargestellt, einer vor dem zweiten Sprung und einer nach dem zweiten Sprung. Der Ausschnitt vor dem zweiten Sprung beginnt 1000 Tage nach dem 1.8.2010, am 27.4.2013, der Ausschnitt nach dem zweiten Sprung 1700 Tage nach dem 1.8.2010, am 28.3.2015. In dem Ausschnitt, der am 27.4.2013 beginnt, haben beide Sensordifferenzen ein gezeitenartiges Signal mit einer Amplitude von maximal $0,1 \mu\text{Gal}$. Die Signale scheinen entgegengesetztes Verhalten zu zeigen. Im Ausschnitt ab dem 28.3.2015 beträgt die maximale Amplitude der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung $0,15 \mu\text{Gal}$, die maximale Amplitude der seismischen Datenerfassung $0,3 \mu\text{Gal}$. Die gezeitenartigen Signale deuten auf Ungenauigkeiten in der Kalibrierung der Sensoren hin: Wird die Ausgangsspannung eines Sensors falsch in eine Schwereänderung umgerechnet, so bleibt ein Teil des Schwe-

Tabelle 8.1: Lineare Fits an die Differenz der Sensordifferenzen. In der Tabelle stehen die Zeiträume der in Abbildung 8.2 eingezeichneten linearen Fits. Start- und Endzeitpunkte sind in Tagen seit dem 1.8.2010 angegeben. Außerdem sind die Steigungen der Fits sowie deren Standardabweichungen angegeben.

| Start | Ende | Steigung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ | Standardabweichung in $\mu\text{Gal}/\text{d}$ |
|-------|------|--------------------------------------|--|
| 500 | 1300 | 0,000273861 | $9,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 2150 | 2550 | 0,000271788 | $8,7 \cdot 10^{-7}$ |

resignals bei der Differenzbildung mit dem Signal des anderen Sensors erhalten. Da der größte Anteil des Schweresignals Gezeiten sind, ist in der Differenz ein gezeitenartiges Signal zu sehen. Die Kalibrierung der Voltmeterdatenerfassung ist durch den Vergleich mit Absolutschweremessungen durchgeführt worden. Da das supraleitende Gravimeter und das Absolutgravimeter unterschiedliches instrumentelles Rauschen haben, hat diese Kalibrierung zwangsläufig eine Ungenauigkeit. Die Genauigkeit der Kalibrierungsfaktoren der Voltmeterdatenerfassung gibt *Geib* (2010) mit 0,3% an. Die Amplitude der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung ist nicht größer als $0,15 \mu\text{Gal}$ das sind 0,075% der maximalen Amplitude der Gezeiten, die $200 \mu\text{Gal}$ beträgt. Damit ist diese Amplitude mit der Genauigkeit der Kalibrierungsfaktoren der Voltmeterdatenerfassung erklärbar. Anders ist das bei dem gezeitenartigen Signal in der Sensordifferenz der seismischen Datenerfassung. Diese wurde durch einen Vergleich mit der Voltmeterdatenerfassung kalibriert. Da hier beide Datensätze vom gleichen Messinstrument kommen, sollten sie auch das gleiche instrumentelle Rauschen haben. Daher sollte sich bei der Kalibrierung der seismischen Datenerfassung keine weiteren Ungenauigkeiten zu denen der Kalibrierung der Voltmeterdatenerfassung ergeben. Das gezeitenartige Signal der Sensordifferenz der seismischen Datenerfassung sollte daher den gleichen Verlauf zeigen wie das gezeitenartige Signal der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung. Da dies nicht der Fall ist, sollen die Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung im Folgenden überprüft werden.

Dazu sind in Abbildung 8.5 und 8.6 für die gleichen Zeitabschnitte, die in Abbildung 8.3 und 8.4 gezeigt sind, die Schwerewerte der Voltmeterdatenerfassung über denen der seismischen Datenerfassung dargestellt, jeweils einmal für Sensor 1 und einmal für Sensor 2. Alle vier Graphen zeigen ein klar lineares Verhalten. Die Steigungen betragen für den Zeitabschnitt ab dem 27.4.2013 1,0090 für Sensor 1 und 1,0086 für Sensor 2, für den Zeitabschnitt ab dem 28.3.2015 1,0092 für Sensor 1 und 1,0078 für Sensor 2. Wären die Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung korrekt, sollte diese Steigung immer 1 sein. Scheinbar ändern sich die Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung zwischen dem 27.4.2013 und dem 28.3.2015. Vermutlich tritt diese Änderung zum Zeitpunkt des zweiten Sprungs in der Differenz der beiden Sensordifferenzen auf. So ließe sich die Veränderung in der Amplitude der Differenz der beiden Sensordifferenzen zu diesem Zeitpunkt erklären. Die Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung sollten eventuell weiter untersucht werden.

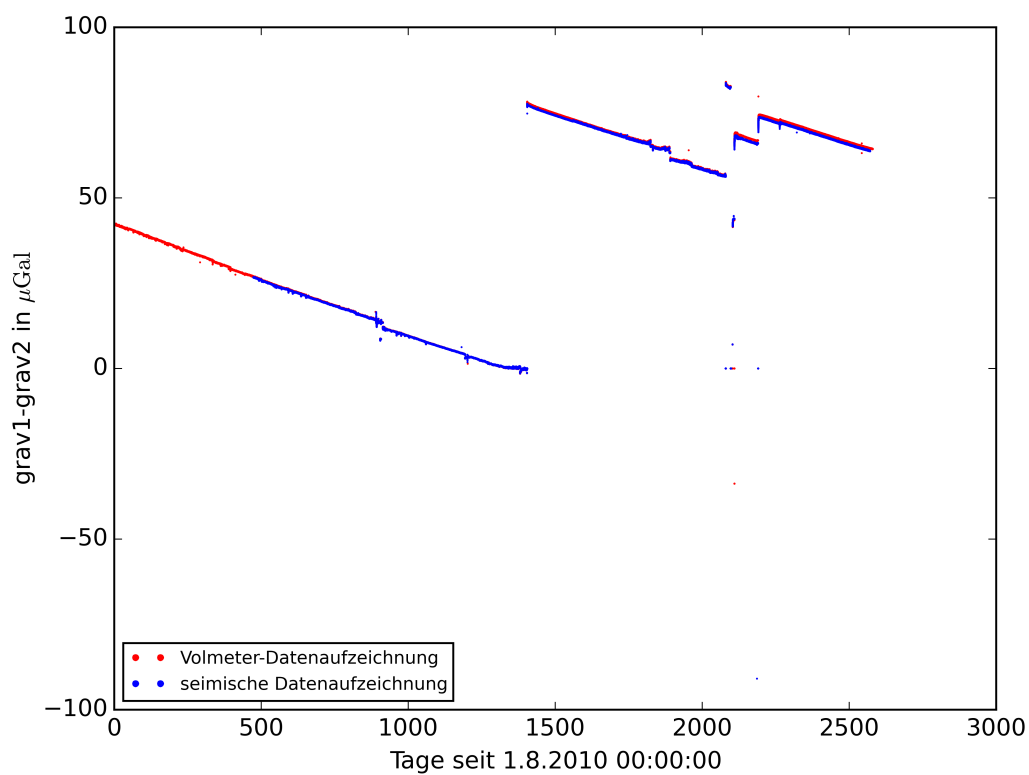


Abbildung 8.1: Vergleich der Sensordifferenzen der Voltmeterdatenerfassung und der seismischen Datenerfassung. Die Abbildung zeigt die Sensordifferenz der seismischen Datenerfassung gemeinsam mit der Sensordifferenz der Voltmeterdatenerfassung.

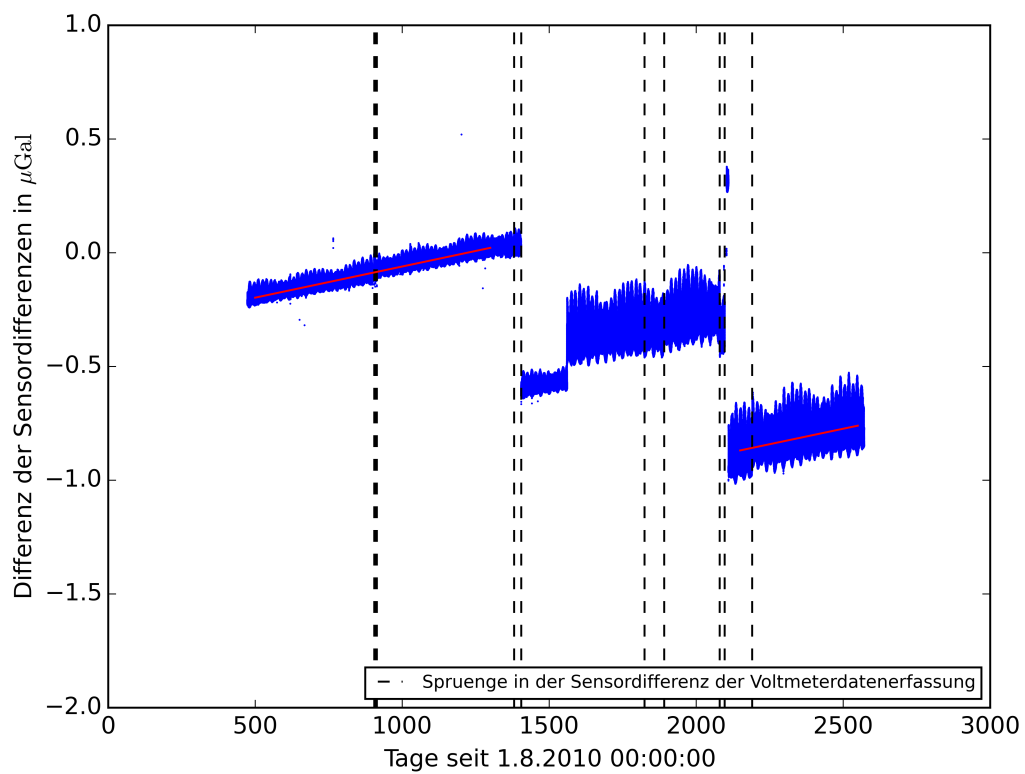


Abbildung 8.2: Differenz der Sensordifferenzen. Die Abbildung zeigt die Differenz der Sensordifferenzen der seismischen Datenerfassung und der Voltmeterdatenerfassung.

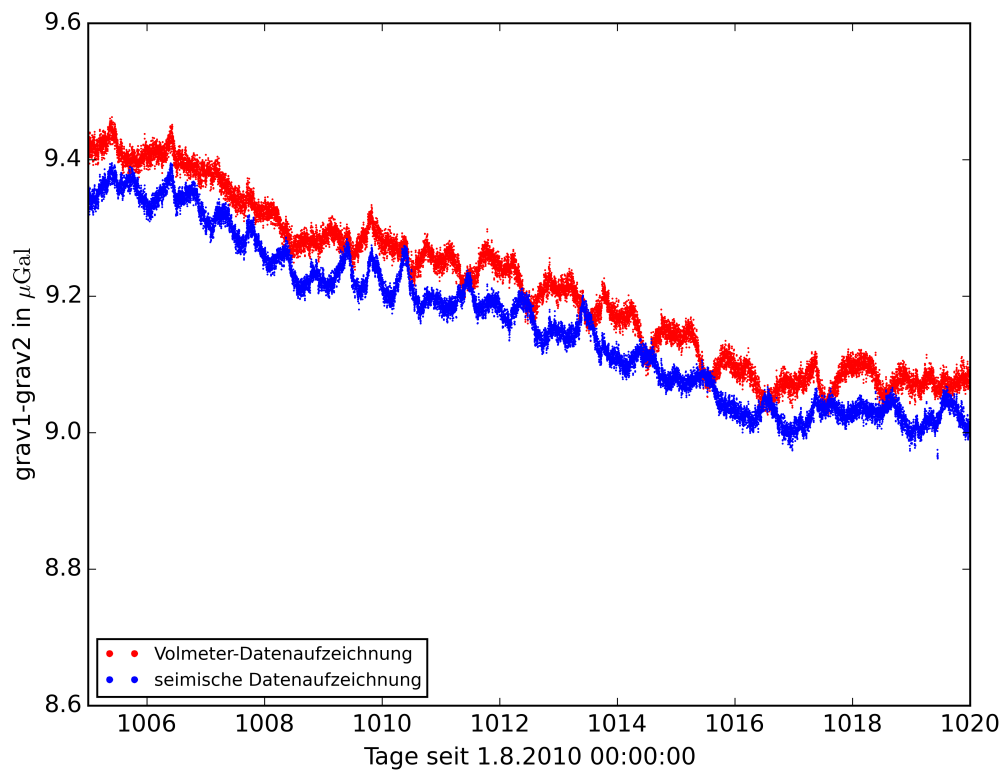


Abbildung 8.3: Sensordifferenzen ab dem 27.4.2013. Die Abbildung zeigt einen 15-tägigen Ausschnitt der Sensordifferenzen der seismischen Datenerfassung und der Voltmeterdatenerfassung ab dem 27.4.2013

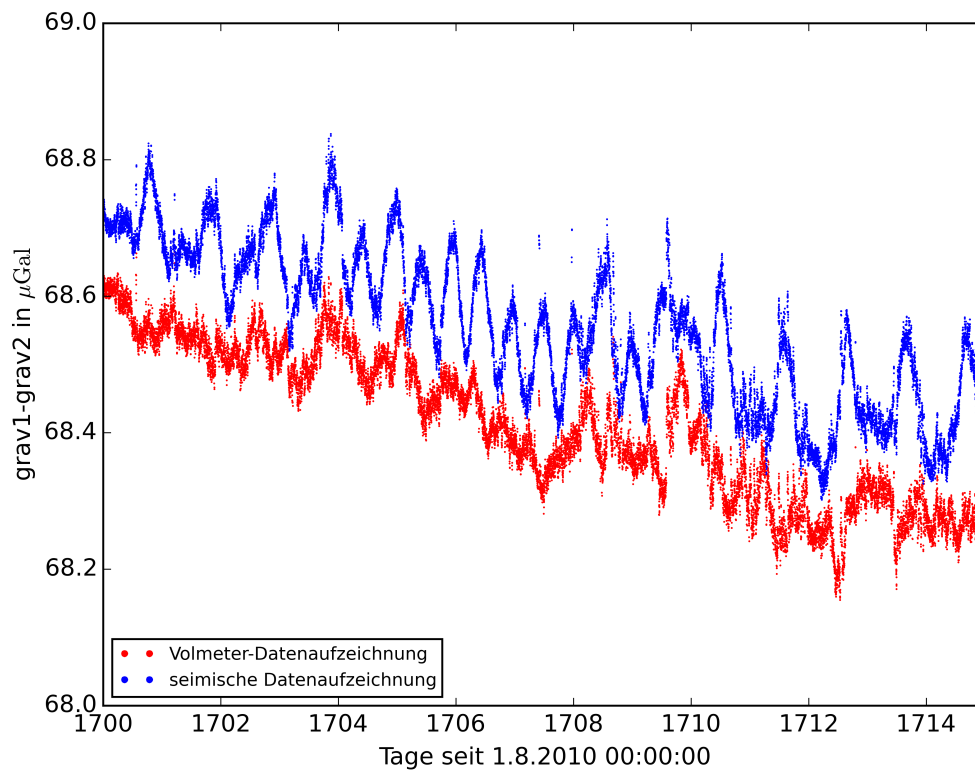


Abbildung 8.4: Sensordifferenzen ab dem 28.3.2015. Die Abbildung zeigt einen 15-tägigen Ausschnitt der Sensordifferenzen der seismischen Datenerfassung und der Voltmeterdatenerfassung ab dem 28.3.2015

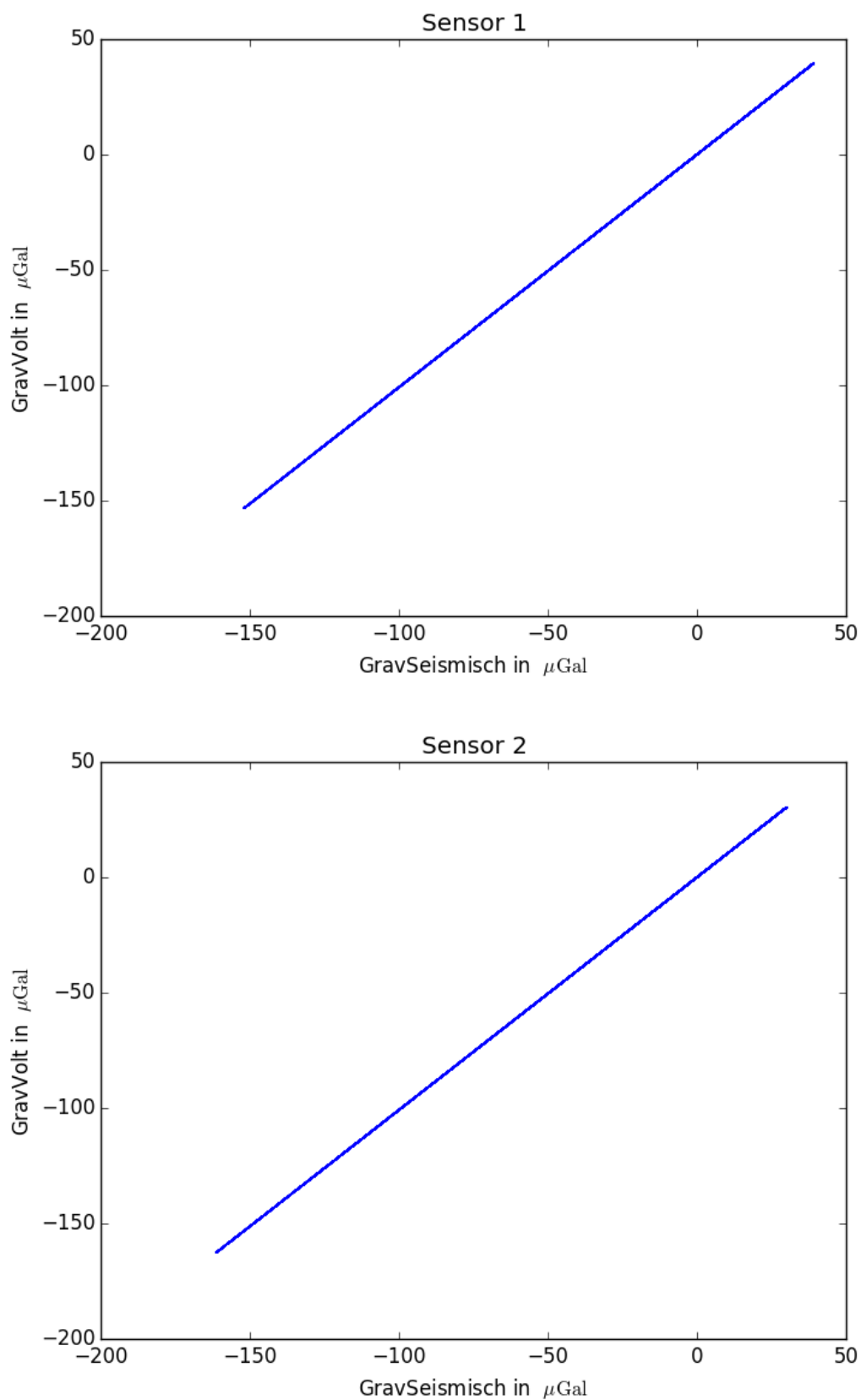


Abbildung 8.5: Kontrolle der Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung 27.4.2013. In der Abbildung ist für einen Zeitraum von 15 Tagen ab dem 27.4.2013 jeder Messwert der Voltmeterdatenerfassung über dem zugehörigen Messwert der Voltmeterdatenerfassung aufgetragen. Dies ist einmal für Sensor 1 und einmal für Sensor 2 dargestellt.

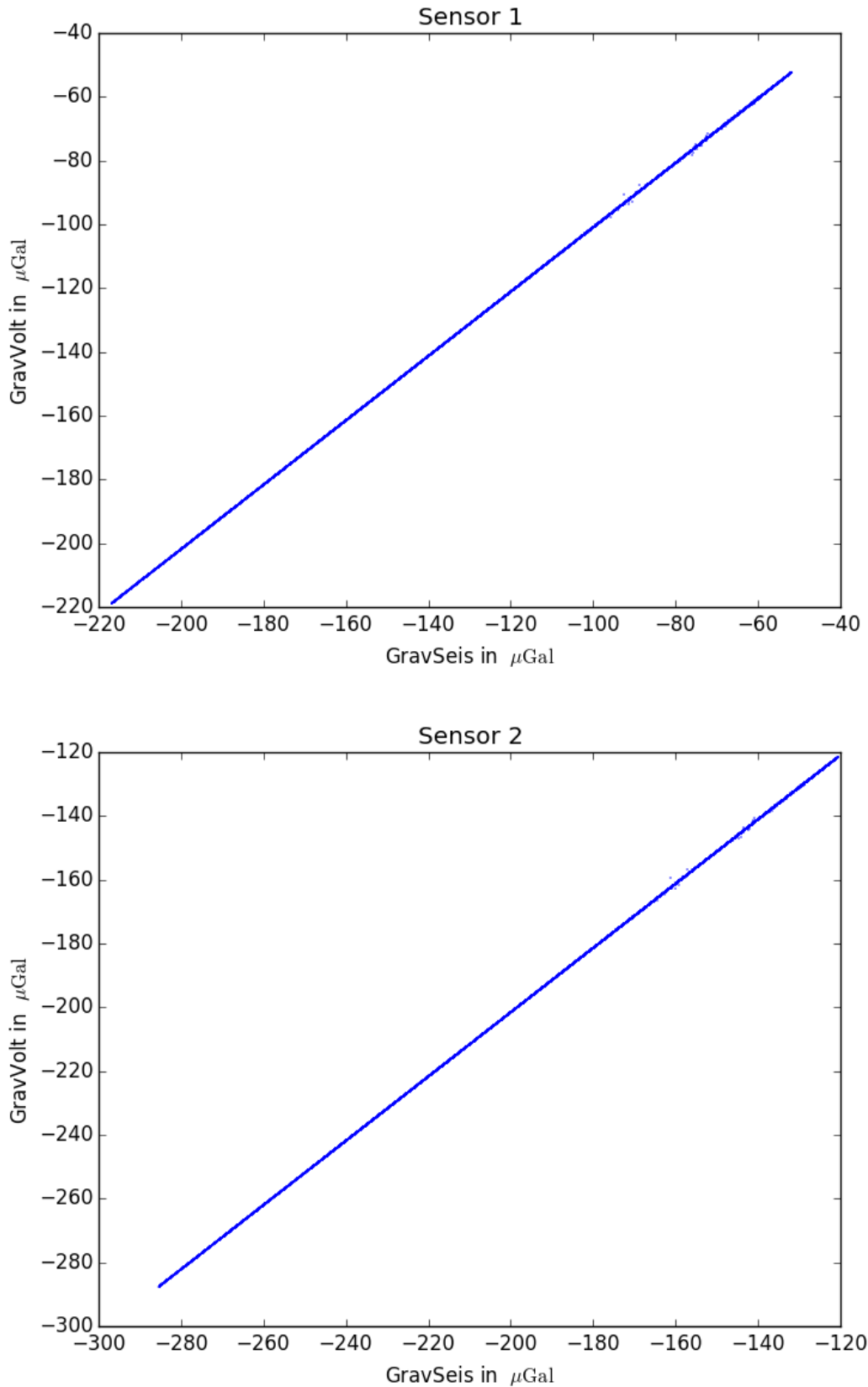


Abbildung 8.6: Kontrolle der Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung 28.3.2015. In der Abbildung ist für einen Zeitraum von 15 Tagen ab dem 28.3.2015 jeder Messwert der Voltmeterdatenerfassung über dem zugehörigen Messwert der Voltmeterdatenerfassung aufgetragen. Dies ist einmal für Sensor 1 und einmal für Sensor 2 dargestellt.

9. Zusammenfassung

Es sollen jetzt die Antworten auf die Fragen aus Kapitel 1, die in dieser Arbeit gefunden worden sind, zusammengefasst werden.

1. Ist in den Messdaten eine Drift zu erkennen?

In den Daten von Sensor 2 ist eindeutig eine Drift zu erkennen. Sensor 1 dagegen zeigt im Rahmen der Genauigkeit der Untersuchungen von $\pm 0,7 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ keine Drift.

2. Mit welchem Modell lässt sich die Drift beschreiben? Ist sie linear, exponentiell oder zeigt sie ein anderes Verhalten? Wie lässt sie sich quantitativ beschreiben?

Die Drift von Sensor 2 zeigt ein lineares Verhalten, sie beträgt $(11,0 \pm 0,7) \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Dieser Wert ist ungefähr 14,45% kleiner als der von *Widmer-Schnidrig et al.* (2012) gefundene Wert von $12,8 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Da damals aber nur 3 Jahre Daten als Grundlage zur Verfügung standen, war eine Abweichung in dieser Größenordnung durchaus zu erwarten. Die Drift von Sensor 2 ist damit ungefähr doppelt so groß wie die Drift des Gravimeters in Membach und 100-mal so groß wie die Drift des Gravimeters in Brüssel. Dies sind, bis auf die Ausnahme von Wettzel, die Gravimeter mit der größten und der kleinsten Drift aus den in Kapitel 1 angesprochenen Untersuchungen von *Crossley et al.* (2004).

3. Ändert die Drift nach Sprüngen, die durch Eingriffe in das Messgerät entstehen, ihr Verhalten?

In den korrigierten Daten der einzelnen Sensoren kann ich keine Veränderung der Drift nach Sprüngen in den Messdaten feststellen. Daher sind solche Veränderungen, falls sie auftreten, kleiner als die Genauigkeit der Driftbestimmung, also kleiner als $\pm 0,7 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Die in Kapitel 4 für vier verschiedene Zeitabschnitte bestimmten relativen Driften nehmen allerdings mit der Zeit ab. Der Unterschied zwischen dem ersten und dem letzten Wert beträgt $0,004 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}} = 1,46 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Auch in der Differenz der gezeiten-, luftdruck-, sprung- und driftkorrigierten Signale kann ich eine verbleibende Drift beobachten, die sich nach jedem Sprung ändert. Die Differenz zwischen der verbleibenden Drift am Anfang und am Ende des Untersuchungszeitraums beträgt auch hier $0,004 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{d}} = 1,46 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$. Beides deutet daraufhin, dass sich die Drift sehr wohl nach einem Sprung ändert, diese Änderung aber zu klein ist, um in den korrigierten Daten der einzelnen Sensoren beobachtet zu werden. Daher kann nicht geklärt werden, ob diese Änderung nur von einem Sensor verursacht wird und wenn ja von welchem.

4. Gibt es Unterschiede bezüglich der Drift zwischen den Daten der seismischen Datenaufzeichnung und den Daten der Voltmeterdatenaufzeichnung?

In den Daten der seismischen Datenaufzeichnung tritt zusätzlich eine Drift der Datenerfassung auf. Diese liegt in der Größenordnung von $0,01 \frac{\mu\text{Gal}}{\text{Jahr}}$ auf.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist, dass Sprünge in den Daten bereits ohne größere Eingriffe entstehen können. Kühlkopfwechsel hingegen verursachen nur erstaunlich kleine Sprünge. Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass die Kalibrierungsfaktoren der seismischen Datenerfassung des Messinstruments verbessert werden könnten.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich herzlich bei Dr. Thomas Forbriger für sehr gute Betreuung der Arbeit vom Anfang bis zum Ende bedanken.

Bei Eva Schroth und Adam Ciesielski bedanke ich mich für ihre Unterstützung unter anderem durch die Berechnung von Gezeitenmodellen.

Außerdem danke ich Michel van Camp und Ludger Timmen für die zur Verfügung gestellten Absolutschwerewerte und die Beurteilung ihrer Genauigkeit.

Anhang

Tabelle .1: Gezeitenmodell von Eva Schroth Für das Gezeitenmodell von Eva Schroth sind in der Tabelle, die verwendeten Wellengruppen mit ihrer Start- und Stoppfrequenz, ihrem Gravimeterfaktor, ihrer Phase und ihrem Namen angegeben.

| Start in cpd | Stop in cpd | Gravimeterfaktor | Phase in ° | Name |
|--------------|-------------|------------------|------------|------|
| 0.000000 | 0.004107 | 1.16000 | 0.0000 | SA |
| 0.004108 | 0.020884 | 1.16000 | 0.0000 | SSA |
| 0.020885 | 0.054747 | 1.15187 | -0.9362 | MM |
| 0.054748 | 0.091348 | 1.15425 | 0.7119 | MF |
| 0.091349 | 0.501369 | 1.14173 | -1.1768 | MTM |
| 0.501370 | 0.911390 | 1.14728 | -0.3008 | Q1 |
| 0.911391 | 0.947991 | 1.14895 | 0.0902 | O1 |
| 0.947992 | 0.981854 | 1.15280 | 0.2742 | M1 |
| 0.981855 | 0.998631 | 1.14995 | 0.2118 | P1 |
| 0.998632 | 1.001369 | 1.21416 | 8.6183 | S1 |
| 1.001370 | 1.004107 | 1.13686 | 0.2600 | K1 |
| 1.004108 | 1.006845 | 1.27459 | -0.2301 | PSI1 |
| 1.006846 | 1.023622 | 1.18124 | 0.2169 | PHI1 |
| 1.023623 | 1.057485 | 1.15573 | 0.1955 | J1 |
| 1.057486 | 1.470243 | 1.15791 | 0.1197 | OO1 |
| 1.470244 | 1.880264 | 1.15639 | 2.9281 | 2N2 |
| 1.880265 | 1.914128 | 1.17445 | 2.7229 | N2 |
| 1.914129 | 1.950419 | 1.18654 | 2.0379 | M2 |
| 1.950420 | 1.984282 | 1.18040 | 0.9492 | L2 |
| 1.984283 | 2.002736 | 1.18910 | 0.6398 | S2 |
| 2.002737 | 2.451943 | 1.18992 | 0.8179 | K2 |
| 2.451944 | 7.000000 | 1.06682 | 0.4293 | M3M6 |

Tabelle .2: Gezeitenmodell von Michel van Camp Für das Gezeitenmodell von Michel van Camp sind in der Tabelle, die verwendeten Wellengruppen mit ihrer Start- und Stoppfrequenz, ihrem Gravimeterfaktor, ihrer Phase und ihrem Namen angegeben.

| Start in cpd | Stop in cpd | Gravimeterfaktor | Phase in ° | Name |
|--------------|-------------|------------------|------------|------|
| 0.000000 | 0.002427 | 1.00000 | 0.0000 | DC |
| 0.002428 | 0.249951 | 1.16000 | 0.0000 | LONG |
| 0.721500 | 0.906315 | 1.1429 | -0.3299 | Q1 |
| 0.921941 | 0.940487 | 1.1464 | 0.0791 | O1 |
| 0.958085 | 0.974188 | 1.1537 | 0.0583 | M1 |
| 0.989049 | 1.011099 | 1.1349 | 0.3174 | K1 |
| 1.013689 | 1.044800 | 1.1537 | -0.0078 | J1 |
| 1.064841 | 1.216397 | 1.1538 | -0.0531 | OO1 |
| 1.719381 | 1.872142 | 1.1560 | 2.5999 | 2N2 |
| 1.888387 | 1.906462 | 1.1761 | 2.5446 | N2 |
| 1.923766 | 1.942754 | 1.1840 | 2.0816 | M2 |
| 1.958233 | 1.976926 | 1.1906 | 0.1735 | L2 |
| 1.991787 | 2.182843 | 1.1865 | 0.6230 | S2 |
| 2.753244 | 3.081254 | 1.0584 | -0.0814 | M3 |
| 3.791964 | 3.937897 | 0.5777 | 92.2440 | M4 |

Literaturverzeichnis

- Agilent Technologies (2003): *Agilent 34420A Nano Volt / Micro Ohm Meter*. Loveland, 2 Aufl.
- Crossley, D., Hinderer, J. & Boy, J. (2004): *Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters*. In: *Journal of Geodynamics*, **38**, 3: 325–342.
- Crossley, D., Hinderer, J. & U. Riccardi (2013): *The measurement of surface gravity*. In: *Reports on progress in physics*, **76**, 046101.
- Geib, T. (2010): *Genauigkeit der in-situ Kalibrierung des supraleitenden Gravimeters SG-056 am BFO*. Dipl.arb., Geophysikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie.
- Hinderer, J., Crossley, D. & Warburton, R. J. (2007): *Gravimetric Methods - Superconducting Gravity Meters*. In: Schubert, G. [Hrsg.]: *Treatise on Geophysics*, Bd. 3, Kap. 3.04, 65–122. Elsevier B.V, Amsterdam Boston.
- Pálinkáš, V., Francis, O., Valko, M. & all the participants (2015): *Regional comparison of absolute gravimeters, EURAMET.M.G-K2 Key Comparison*. Technischer Bericht.
- Riccardi, U., Rosat, S. & Hinderer, J. (2011): *Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series*. In: *Metrologia*, **48**, 28: 28–39.
- Schroth, E. (2013): *Analyse von Gezeitenregistrierungen des Supraleitenden Gravimeters SG-056*. Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie.
- Wang, R. (1997): *Tidal Response of the Solid Earth*. In: Wilhelm, H., Zürn, W. & Wenzel, H.-G. [Hrsg.]: *Tidal Phenomena*, 27–57. Springer, Berlin Heidelberg.
- Wenzel, H.-G. (1997a): *Analysis of Earth Tide Observations*. In: Wilhelm, H., Zürn, W. & Wenzel, H.-G. [Hrsg.]: *Tidal Phenomena*, 59–75. Springer, Berlin Heidelberg.
- Wenzel, H.-G. (1997b): *Tide-Generating Potential for the earth*. In: Wilhelm, H., Zürn, W. & Wenzel, H.-G. [Hrsg.]: *Tidal Phenomena*, 29–26. Springer, Berlin Heidelberg.
- Widmer-Schmidrig, R., Zürn, W., Duffner, P. & Forbriger, T. (2012): *The dual-sphere superconducting gravimeter at BFO - long period signals and instrument drift*. Poster GRAV-P.136 auf der DGG- Konferenz, Hamburg 5.-8. März.