

# Vorbereitung der Daten von supraleitenden Gravimetern für Untersuchungen im Frequenzbereich um 100 $\mu\text{Hz}$

Herbert Weidner, Am Stutz 3, 63864 Glattbach, Email: herbertweidner@gmx.de

**Zusammenfassung:** Signale unbekannter Herkunft kann man in den Gravitationsdaten der SG nur entdecken, nachdem die störenden Gezeitenoszillationen beseitigt sind. Das Verfahren der inversen FFT-Filterung kann im Gegensatz zu den üblichen Hochpassfiltern die riesigen Unterschiede der Amplituden ohne Zusatzrauschen verarbeiten. Das Verfahren wird ausführlich beschrieben.

**Einführung:** Supraleitende Gravimeter sind bemerkenswert empfindliche Messgeräte für die Vertikalkomponente der Schwerkraft und eignen sich hervorragend für Langzeitmessungen im Frequenzbereich zwischen 2  $\mu\text{Hz}$  und etwa 10 mHz, der nicht nur Geophysiker interessiert. Aus astronomischer Perspektive ist die Erde die größtmögliche Testmasse für die Suche nach Schwingungen, die von weit entfernten Objekten oder im Erdinneren verursacht werden könnten. Der starke Einfluss von nahen Himmelskörpern wie beispielsweise Sonne oder Mond ist bekannt und stört die Suche nach schwachen Signalen. Obwohl die Frequenzen dieser periodischen Änderungen tabelliert sind<sup>[1]</sup>, ist es nicht einfach, diese aus dem gemessenen Signalgemisch zu entfernen, ohne die möglicherweise vorhandenen schwachen Signale zu stören. Ein bewährtes Verfahren zur direkten Kompensation unerwünschter Frequenzbereiche wird nachfolgend detailliert beschrieben.

Der Rauschpegel der bisher betriebenen Gravimeter ist deutlich höher als man anhand des technischen Aufbau der Instrumente erwartet, da die Gravimeter – aus akustischer Sicht – ungünstig montiert sind: Sie sind fest mit dem Erdboden verbunden und empfangen deshalb den Körperschall auch weit entfernter Erdbeben. Diese unmittelbare Übertragung der Schwingungen auf das Gehäuse des Gravimeters ließe sich durch eine elastische Aufhängung deutlich verringern, wurde aber bisher leider noch nicht erprobt.

**Ursprung der Basisdaten:** Weltweit verteilte Stationen registrieren die Daten der Gravimeter, die im IGETS Central Bureau auf ein einheitliches Format gebracht und an zentraler Stelle in Textform (ASCII-Codierung) gespeichert werden<sup>[2]</sup>. Um die Konstruktion langer, lückenloser Datensequenzen zu vereinfachen, sind im aktuell verwendeten Datenformat alle Datenlücken durch synthetische Gezeitendaten ersetzt. Im Gegensatz dazu enthalten die älteren Datenformate aus den Anfangsjahren der supraleitenden Gravimeter viele Datenlücken, deren Beseitigung zusätzlichen Aufwand erfordert.

Da Gravimeter die vertikale Komponente der Gravitationskraft messen, reagieren sie auch auf die variable Luftmasse oberhalb des Messortes. Diese ändert sich mit dem vom Wetter (Luftdruck und Feuchte). Während sich Höhe und Luftdruck am Standort des Gravimeters einfach messen lassen, ist die Bestimmung der mittleren Luftfeuchte so aufwändig, dass man darauf meist verzichtet. Die Folge ist ein erhöhter Rauschuntergrund.

Um alle leicht zugänglichen Einflüsse zu berücksichtigen, berechnet man die gesuchten Gravitationsdaten als gewichtete Summe der Datenreihen von Gravimeter (Spalte 9 der IGETS-Dateien) und Barometer (Spalte 7). Das optimale Mischungsverhältnis hängt ab von der Höhe des Gravimeter über dem Meeresspiegel und muss empirisch bestimmt werden. Eine mögliche Zielvorgabe ist, das Rauschen in einem gewissen, nicht zu engen Frequenzbereich zu minimieren, der keine starken, erkennbaren Resonanzen enthält. Für das Gravimeter SU (Sutherland/Afrika in 2800 m Höhe) gilt  $y_{97} = y_9 - 1,3 \times y_7$ . Für die tiefer liegenden Gravimeter in Europa und Australien gilt  $y_{97} = y_9 - 1,6 \times y_7$ .

---

1 Hartmann, T. and H.-G. Wenzel (1994): Catalogue of the earth tide-generating potential due to the planets. Geophysical Research Letters, vol.21, pp. 1991-1993, 1994.

2 GFZ Potsdam, IGETS Datenbank

**Beseitigung der Gezeitensignale:** Das Spektrum (Abbildung 1) zeigt, dass extrem starke niederfrequente Schwingungen unter  $35 \mu\text{Hz}$  die Gravitationsdaten dominieren. Sie übertönen alle schwachen Signale im Untersuchungsbereich um mindestens den Faktor  $10^5$  und müssen beseitigt werden, wenn die Suche nach schwachen Schwingungen im Frequenzbereich zwischen  $40 \mu\text{Hz}$  und  $400 \mu\text{Hz}$  erfolgversprechend sein soll. Umfangreiche Versuche haben ergeben, dass die üblichen digitalen Hochpassfilter wenig geeignet sind für diesen Zweck, weil sie den ohnehin enormen Rauschpegel weiter steigern. Die Ursache lässt sich einfach erklären: Die Funktion digitaler Filter beruht darauf, dass man mehrere Kopien der aufgezzeichneten Daten zeitverschoben und abgeschwächt zu den ursprünglichen Daten addiert. Einsame Störspitzen, die sich eigentlich nur als hochfrequente Störung auswirken würden, erscheinen also an mehreren Zeitpositionen. Diese Verbreiterung über einen größeren Zeitbereich ist gleichbedeutend mit einer vorher nicht vorhandenen niederfrequenten Komponente, die den Rauschpegel erhöht.

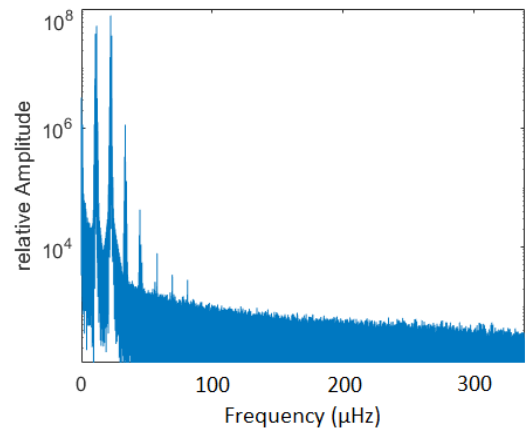


Abb. 1: Spektrum der ungefilterten Gravitationsdaten (Ort = SU)

Dieser störende Nebeneffekt lässt sich vermeiden, indem man das Hochpassfilter durch ein Kompensationsverfahren ersetzt: Man rekonstruiert nur den niederfrequenten und uninteressanten Teil der Gravitationsdaten durch rauschfreie sinusförmige Funktionen und subtrahiert diesen vom ursprünglichen Signalmisch. An die Rekonstruktion der unerwünschten und sehr intensiven Spektrallinien unter  $35 \mu\text{Hz}$  mittels einer einfachen Fourier-Analyse / Synthese werden keine hohen Anforderungen gestellt. Ausschlaggebend ist allein, dass die schwachen Signale und alle Frequenzkomponenten im Untersuchungsbereich um  $100 \mu\text{Hz}$  unverändert bleiben, um kein zusätzliches Rauschen zu erzeugen. In den Datensätzen finden sich häufig einsame Störspitzen, die man anschließend manuell entfernt.

Die Fourier-Transformation erlaubt es, beliebige Zeitreihen durch einen Satz von rauschfreien sinusförmigen Funktionen anzunähern – im vorliegenden Fall beschränkt man sich bei der Rekonstruktion der ursprünglichen Zeitreihe auf Frequenzen kleiner als  $35 \mu\text{Hz}$ . Es ist irrelevant, ob die Frequenzen und Amplituden der unerwünschten Spektrallinien in diesem Bereich konstant sind oder nicht. Es ist auch nicht erforderlich, die störenden Frequenzen mit dem FFT-Verfahren exakt zu ermitteln. Eine mangelhafte Rekonstruktion des unerwünschten Frequenzbereiches unter  $35 \mu\text{Hz}$  bewirkt eine unvollständige Kompensation der störenden Spektrallinien. Das entspricht einem Hochpassfilter mit geringer Sperrwirkung für tiefe Frequenzen und ist unproblematisch, solange die Amplitude der störenden Gezeitenschwingungen hinreichend stark gedämpft sind.

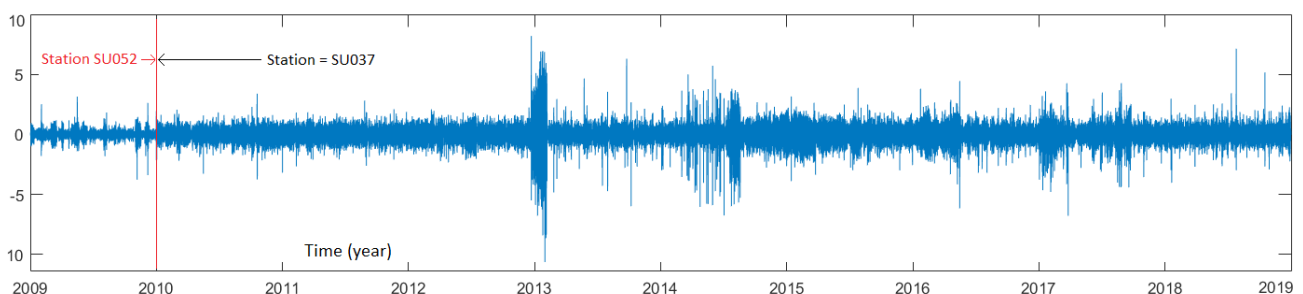


Abbildung 2: Gravitationsdaten von SU nach Kompensation aller Frequenzen unter  $35 \mu\text{Hz}$ .

Das in Abb. 2 gezeigte Beispiel einer zehnjährigen Datenreihe, die in Südafrika (SU) aufgezeichnet wurde, zeigt gravierende Qualitätsunterschiede: Im Jahr 2010 wurde das Gravimeter durch ein minderwertiges Exemplar mit erhöhtem Grundrauschen ersetzt. Anfang 2013 wurde etwa einen Monat lang Experimente in unmittelbarer Nähe des Messgerätes durchgeführt. Weitere Experimente folgten während des Jahres 2014.

**Programmbeispiel:** Die folgenden Programmzeilen skizzieren das Verfahren der inversen FFT-Filterung. Dank der von IGETS geleisteten Vorarbeit kann man die Messdaten ohne aufwändige Korrekturen und Ergänzungen einlesen und sofort verknüpfen.

```
load 'Rohdaten_SU371' %Daten von IGETS der Jahre 2009..2018
y9=y(:,9); y7=y(:,7); %isoliere die benötigten Spalten
y97=y9-1.3*y7; plot(y97) %empirischer Faktor 1,3 für h≈2800 m
%Für h≈300 m liegt der empirische Faktor bei 1,6
```

Die Variable y97 enthält die korrigierten Messwerte; Eine Verlängerung der Sampling-Zeit auf 1200 Sekunden reduziert den Datenumfang der Gravitationsdaten.

```
y=decimate(y97,5,'fir'); y=decimate(y,4,'fir');
Ts=60*5*4; L=length(y); %Reduktion der Datenlänge

%inverser FFT-Filter = Hochpass
NFFT = 2^(nextpow2(L)); %Mindestlänge der FFT
f=1/Ts/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); y7F=fft(y,NFFT);
j=1; while f(j)<34.8e-6; j=j+1; end %wähle cutoff Frequenz
y7F(j+1:NFFT-j)=0; %keine hohe Frequenzen rekonstruieren
y7F=ifft(y7F,NFFT,'symmetric'); %inverse Transformation
y=(y-y7F(1:L)); plot(y) %Tiefe Frequenzen löschen
```

**Ergebnis:** Die so gewonnenen Gravitationsdaten im Frequenzbereich 35  $\mu\text{Hz}$  bis etwa 400  $\mu\text{Hz}$  (siehe Abb. 2) sollte man manuell überprüfen, ob sie einsame Störspitzen und/oder Sprungstellen enthalten, die wahrscheinlich nicht durch Gravitationseffekte verursacht wurden. Deren Beseitigung reduziert den Rauschpegel der Datenreihen.

Das Frequenzraster mit der Rasterweite 11,57  $\mu\text{Hz}$  im Spektrum (Abb. 3) entsteht durch atmosphärische Schwingungen. Je nach Qualität der Datenvorbereitung kann man diese bis zur Maximalfrequenz 190  $\mu\text{Hz}$  identifizieren. Die Gruppe von Spektrallinien bei 300  $\mu\text{Hz}$  entspricht der tiefsten Eigenresonanz OS2 der Erde, die durch Erdbeben angeregt wird. Dazwischen gibt es breite Frequenzbereiche, die nach versteckten Signalen durchsucht werden können.

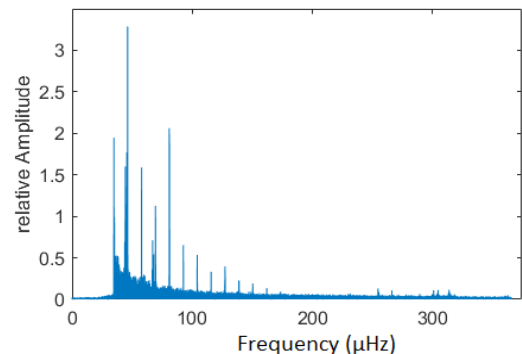


Abbildung 3: Typisches Spektrum eines supraleitenden Gravimeters in Europa.

## Danksagung

Danke an die Betreiber der supraleitenden Gravimeter und das IGETS für die Überarbeitung und Bereitstellung der Gravitationsdaten.

Herbert Weidner (1. Februar 2021)