

Schwereregistrierungen mit dem Micro-g LaCoste gPhone-98 und dem ZLS Burris Gravity Meter B-64

Recording of Gravity with the Micro-g LaCoste gPhone-98 and ZLS Burris Gravity Meter B-64

Manuel Schilling, Olga Gitlein

Für Aufzeichnungen über längere Zeiträume sind Federgravimeter – z. B. im Vergleich zu Supraleitgravimetern – die flexibelste, technisch einfachere und vergleichsweise wirtschaftlichste Lösung, unterliegen aber dem Nachteil der Drift. Wir untersuchen die Genauigkeiten des Micro-g LaCoste gPhone-98 (g-98) und ZLS Burris Gravity Meter B-64 (B-64) des Instituts für Erdmessung (IfE). Mit beiden Instrumenten wurden Registrierungen über mehrere Monate auf verschiedenen Stationen mit hohen und niedrigen seismischen Störungen durchgeführt. Das g-98 und das B-64 haben dabei gleichzeitig an einer Station aufgezeichnet. Untersucht wird zudem eine parallele Registrierung des B-64 mit dem Supraleitgravimeter GWR Instruments OSG-054 in Onsala (Schweden). Die Gezeitenanalyse der Datenreihen dieser beiden Instrumente zeigt, dass die Gezeitenparameter der ganztägigen und halbtägigen Gezeiten mit 0,3 ‰ (O1, K1, M2) bis 1,7 ‰ (S2) übereinstimmen. Sowohl für das g-98 als auch das B-64 wurde eine Stabilität des linearen Eichfaktors von $3 \cdot 10^{-4}$ ermittelt. Im Allgemeinen verhält sich die Drift eines gPhones nach einer gewissen Einlaufphase linear. Der Betrag und die Variation der Drift des g-98 nahmen im Nutzungszeitraum nach jedem Standortwechsel ab und liegen derzeit bei etwa 90 nm/s^2 pro Tag. Im Gegensatz dazu zeigt das B-64 derzeit ein nicht-lineares Verhalten.

Schlüsselwörter: Schwereregistrierung, Gezeitenanalyse, gPhone, ZLS Burris, Genauigkeitsuntersuchung

Modern spring gravimeters offer – e.g. compared to superconducting gravimeters – a flexible, simpler and economical solution for the long term acquisition of gravity data, but are limited by instrumental drift. We investigate the accuracy of the Micro-g LaCoste gPhone-98 (g-98) and the ZLS Burris Gravity Meter B-64 (B-64) of the Institut für Erdmessung (IfE). Both instruments conducted recordings for several months on stations with low to high seismic noise. At one station g-98 and B-64 recorded in parallel. Additionally, the B-64 recorded simultaneously with the GWR Instruments OSG-054 superconducting gravimeter in Onsala (Sweden). The tidal analysis of timeseries from these two instruments shows an agreement of 0.3 ‰ (O1, K1, M2) to 1.7 ‰ (S2) for diurnal- and semidiurnal amplitude factors. The linear calibration factor of g-98 and B-64 was found to be stable at the level of $3 \cdot 10^{-4}$. The instrumental drift of a gPhone is generally linear after an initial run-in phase. The magnitude as well as the variation of g-98's drift has decreased over time with each new setup of the instrument at a new location. Currently, the drift is approximately 90 nm/s^2 per day. The drift of B-64, on the other hand, does currently not show a linear behaviour.

Keywords: Gravity recording, tidal analysis, gPhone, ZLS Burris, instrumental accuracy

1 EINLEITUNG

Moderne Federgravimeter sind vielseitig einsetzbare Instrumente in der Gravimetrie. Zu den Einsatzzwecken zählen die Registrierung von Erdzeiten, die Erfassung geophysikalischer Vorgänge und ergänzende Messungen im Zusammenhang mit absolutgravimetrischen Messungen, wie etwa die Bestimmung von Gradienten oder das Anlegen von Sicherungspunkten. Erdzeiten erreichen eine maximale Schwereänderung von über 2000 nm/s^2 . Weitere Schwereänderungen sind durchaus um Größenordnungen geringer. Die Änderung des Grundwasserspiegels, zum Beispiel, erzeugt Änderungen von einigen wenigen bis zu einigen 10 nm/s^2 im Verlauf einiger Tage bis Wochen. Die instrumentelle Drift, also die zeitliche Variation der Federspannung, kann die Identifizierung dieser kleinen Signale verhindern. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, wenn die Drift über die Dauer der Messung stabil und einfach, möglichst linear, zu modellieren ist. Dabei sind Gravimeter sowohl mit Quarz- als auch mit Metallfedern gleichermaßen betroffen, unabhängig vom Instrumentendesign. Für das Scintrex CG3-4492 mit einer vertikalen Quarzfeder berichten /Timmen & Gitlein 2004/ eine Drift von $2,7 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ pro Tag. /Crossley et al. 2013/ geben die linearen Driftraten verschiedener Scintrex CG3 und CG5 im Bereich von $3 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ bis $7 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ pro Tag an. Neben diesen linearen Komponenten sind bei praktisch allen Geräten auch nicht-lineare Anteile in der Drift enthalten.

Diese Arbeit befasst sich mit zwei Relativgravimetern des Instituts für Erdmessung (IfE). Das Micro-g LaCoste gPhone-98 wird seit etwa drei Jahren eingesetzt und das ZLS Burris Gravity Meter B-64 ist etwa zwei Jahre im Einsatz. Das g-98 wurde beinahe durchgehend an verschiedenen Stationen eingesetzt. Wir präsentieren die Ergebnisse der Registrierungen an zwei Stationen. Das B-64 hat an drei Stationen Erdzeiten registriert.

Die besuchten Stationen unterscheiden sich anhand verschiedener Charakteristika, z. B. der Nähe zu Wasserkörpern und anthropogener Mikroseismik. Die Messungen wurden in Onsala (Schweden), Hamburg, Hannover, Ruthe und Clausthal durchgeführt. Für die Stationen Hannover (Leibniz-Universität Hannover) und Clausthal (Technische Universität Clausthal) liegen unter anderem Zeitreihen von Absolutschweremessungen bis zurück in das Jahr 1986 vor /Timmen 2010/. Das Gravimetrielabor in Hannover befindet sich im Keller eines Universitätsgebäudes. Es grenzt an einen Parkplatz und ein 20-stöckiges Gebäude, in dem die vertikale Eichlinie Hannover /Timmen 2010/, /Kangieser et al. 1983/ angelegt wurde. Des Weiteren verkehren zwei Straßenbahnlinien unweit des Labors. Die Station in Ruthe liegt 20 km südlich von Hannover in einer ländlichen Region. Dort befinden sich vier Messpfeiler in einem klimatisierten Container auf dem Gelände des Gravitationswellendetektors GEO-600. Die Messungen in Hamburg wurden in einem leer stehenden Gebäude in einem Wohngebiet im Stadtteil Flottbek nahe der Elbe durchgeführt. Der Untergrund dieser drei Stationen besteht hauptsächlich aus Sedimenten. Clausthal liegt im Gegensatz dazu im Harz. Der Pfeiler, im Keller des Instituts für Geophysik, ist direkt auf Fels gegründet. Onsala liegt 40 km südlich von Göteborg an der Küste des Kattegats. Die Messungen wurden im Gravimetrielabor des Onsala Space Observatory (OSO, /Scherneck 2008/) der Chalmers-Universität Göteborg durchgeführt. Die Station ist ausgestattet mit

dem supraleitenden Gravimeter OSG-054 der Firma GWR Instruments und bietet mehrere Pfeiler mit direkter Anbindung an den Felsen.

2 BESCHREIBUNG DER GRAVIMETER

Das Micro-g LaCoste gPhone und das ZLS Burris Gravity Meter arbeiten nach dem LaCoste-&-Romberg-Prinzip für Federgravimeter. Äußerlich ähneln sich die Gravimeter LaCoste & Romberg Model D und G sowie das ZLS-Burris-Gravimeter /LaCoste & Romberg 2004/, /ZLS Corporation 2011/. Das gPhone basiert auf dem Model-G-Gravimeter /Micro-g LaCoste 2008/. Die Instrumente sind in Abb. 1 gezeigt.

Für die Dauer der Messungen wurden die Gravimeter in Styropor-Boxen platziert. Dies reduziert den Einfluss der Schwankungen der Raumtemperatur, die unter anderem die Neigungen des Geräts beeinflussen. Das gPhone zeichnet zusätzlich die Messungen der eingebauten Neigungsmesser auf. Die täglichen Temperaturvariationen im Inneren der Box betragen weniger als $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Die mittlere Temperatur kann sich allerdings im Verlauf einiger Wochen um ein paar Grad ändern, wenn die Station nicht mit einer Klimaanlage ausgestattet ist.



Abb. 1 | L&R Model D-14, ZLS Burris B-64 und Scintrex CG3-4492 (oben) und Micro-g LaCoste gPhone-98 (unten)

Das gPhone ist für die Aufzeichnung von gravimetrischen Zeitreihen ausgelegt. Der Sensor ist in zwei beheizten und druckdichten Kammern untergebracht, um Temperaturschwankungen zu minimieren /Micro-g LaCoste 2008/. Der Einsatzbereich des elektronischen Feedbacksystems des g-98 beträgt $\pm 500 \mu\text{m/s}^2$ bei einer Auflösung von 1 nm/s^2 . Durch ein Verschieben (reranging) des Feedbackbereichs beträgt der Einsatzbereich des gPhone 7 cm/s^2 . Das Reranging und Arretieren des Sensors für den Transport (clamping) wird über die Software gMonitor (Version 1.09.10.12) gesteuert. Des Weiteren werden die Gravimeterdaten mit dieser Software auf einem Laptop gespeichert. Das gPhone besteht neben dem eigentlichen Sensor aus einer Elektronik-Box, die neben einer unterbrechungsfreien Stromversorgung auch eine Rubidium-Uhr beherbergt. Eine GPS-Antenne kann zusätzlich angeschlossen werden. Mit der Software gMonitor werden die Daten des Gravimeters aufgezeichnet. Neben der eigentlichen Schwereänderung werden verschiedene Geräte- und Umweltparameter aufgezeichnet. Dazu gehören unter anderem die Neigung, der Umgebungs- und der Sensor-Luftdruck sowie die Temperatur. Die Daten werden mit einer Datenrate von 1 Hz aufgezeichnet. Zusätzlich wird eine gefilterte Zeitreihe mit einer Datenrate von (1/300) Hz gespeichert, die in dieser Arbeit nicht weiter verwendet wird.

Das Burris-Gravimeter kann im Gegensatz zum gPhone sowohl für Punktmessungen als auch für Schwereregistrierungen verwendet werden. Das elektronische Feedbacksystem hat einen Einsatzbereich von $\pm 250 \mu\text{m/s}^2$. Das analoge Schweresignal wird tiefpassgefiltert mit einer Phasenverzögerung von 0,6 s ausgegeben /ZLS Corporation 2011/. Der Einsatzbereich des Instruments ist 7 cm/s^2 . Das Verstellen des elektronischen Feedbacks in den lokalen Schwerebereich erfolgt am B-64 durch eine nicht kalibrierte Messschraube. Schweredifferenzen, die den Bereich des elektronischen Feedbacks übersteigen, müssen mit dem B-64 in einem Step-Verfahren gemessen werden. Eine kalibrierte Messschraube ist im Intervall von $500 \mu\text{m/s}^2$ kalibriert, sodass größere Schweredifferenzen ohne Zwischenschritte gemessen werden können. Die Genauigkeit der kalibrierten Stellen wird vom Hersteller mit $\pm 100 \text{ nm/s}^2$ angegeben (/ZLS Corporation 2011/, /Jentsch 2008/: 150 nm/s^2).

Das B-64 wird durch einen Handheld-PC (PDA) mit dem Programm UltraGrav fernbedient. Der PDA ist entweder drahtlos über Bluetooth oder per Kabel mit dem Gravimeter verbunden. UltraGrav ist sowohl für Schwereregistrierungen mit einer nutzerdefinierten Datenrate und Filterung als auch für Punktmessungen geeignet. Zusätzlich zur Schwere werden Neigungskorrekturen sowie Gezeitenreduktionen gespeichert. Die Messungen für diese Arbeit wurden mit der Zusatzausstattung „Erdgezeiten-Station“ der Firma Gravity Consult durchgeführt. Dieses System ergänzt das Burris-Gravimeter um eine Software zur Gezeitenregistrierung (FSUGrav), die auf einem Laptop installiert ist, ein digitales Barometer sowie einen GPS-Zeitempfänger. Alternativ zu der Zeitsynchronisation über GPS kann auch eine Verbindung über Internet zu einem NTP-Server genutzt werden. Die Verbindung zwischen Laptop und Gravimeter erfolgt mittels Bluetooth. FSUGrav speichert die gemessene Schwere und den Luftdruck in einem festen 10-Sekunden-Zeitintervall. Die Messungen werden mit einem 600-s-Nullphasenfilter gefiltert.

Das Feedbacksystem beider Gravimeter wurde jeweils vor und nach den Messungen auf der vertikalen Eichlinie Hannover

/Timmen 2010/ kalibriert. Dort beträgt die Schweredifferenz zwischen dem ersten und 17. Stockwerk eines Hochhauses $160 \mu\text{m/s}^2$. Die Ergebnisse der Kalibrierungen sind in Tab. 1 aufgeführt. Der lineare Term beider Gravimeter ist stabil bis auf $3 \cdot 10^{-4}$. Bei der Amplitude eines Signals von 3000 nm/s^2 bewirkt dies bei Vernachlässigung dieser Variation einen Effekt von etwa 1 nm/s^2 . Für das B-64 wurde bei einigen Kalibrierungen ein quadratischer Eichfaktor bestimmt. Dieser war jeweils kleiner als $\pm 0,5 \cdot 10^{-9}$. Dies liegt im Bereich der in /Jentsch 2008/ beschriebenen Kalibrierung des B-25 in Hannover. Die elektronischen Libellen beider Instrumente wurden im Rahmen der Kalibrierung ebenfalls überprüft.

gPhone-98			Burris B-64		
Datum	Lin. Faktor	δ	Datum	Lin. Faktor	δ
12/2011	1,002 40	0,000 015	04/2012	0,999 74	-0,000 368
04/2012	1,002 06	0,000 366	04/2012	0,999 53	-0,000 158
08/2012	1,002 47	-0,000 122	05/2012	0,999 44	-0,000 068
02/2013	1,002 68	-0,000 259	09/2012	0,998 95	0,000 423
			11/2012	0,999 37	0,000 002
			01/2013	0,999 61	-0,000 238
			02/2013	0,999 63	-0,000 258
			05/2013	0,999 46	-0,000 088
			07/2013	0,998 70	0,000 672
			12/2013	0,999 29	0,000 082
Mittelwert	1,002 42	$\pm 0,000 27$		0,999 37	$\pm 0,000 32$

Tab. 1 | Lineare Eichfaktoren für gPhone-98 und Burris B-64. δ ist die Differenz zum mittleren Eichfaktor.

Die instrumentelle Drift der gemessenen Zeitreihen wurde durch eine stückweise lineare Approximation für Intervalle von sieben Tagen Dauer berechnet. Die mittleren linearen Driffaktoren sind in Tab. 2 aufgeführt. Nach dem Start einer Registrierung an einer neuen Station zeigen die Messungen des g-98 eine nicht-lineare Drift. Daher werden die ersten zwei Wochen bei der Berechnung der Drift ausgeschlossen. Der blaue Plot in Abb. 2 stellt beispielhaft eine um zeitvariable Schwereanteile reduzierte Messung dar. Nach etwa zwei Wochen zeigt sich ein lineares Verhalten. Die im oberen Teil der Tab. 2 aufgeführte Drift des g-98 zeigt, dass über die etwa zwei

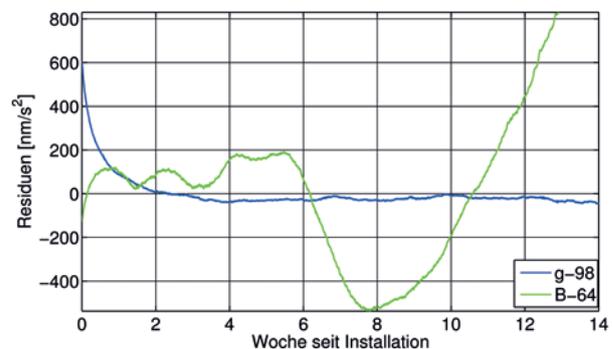


Abb. 2 | Beispiel der Schwereresiduen des gPhone-98 (117 nm/s^2 linearer Trend entfernt) und Burris B-64 (210 nm/s^2 linearer Trend entfernt) für den Zeitraum einiger Wochen nach Aufbau des Gravimeters an einer Station.

Jahre, in denen Messungen durchgeführt wurden, sowohl die Drift selbst als auch ihre Variation abnimmt. Derzeit beträgt die lineare Drift des g-98 etwa 90 nm/s^2 pro Tag. /Riccardi et al. 2011/ erhalten für das g-54 eine lineare Driftkomponente von etwa 50 nm/s^2 , die sich nach elf Wochen im Verlauf einer 43 Wochen andauernden Zeitreihe einstellte. Der grüne Plot in Abb. 2 zeigt das Beispiel der Residuen einer Zeitreihe von B-64 Messungen. Die erste Einlaufphase des B-64 beträgt nur wenige Stunden. Danach wird jedoch kein vorher-sagbares Verhalten eingenommen. Der untere Teil von Tab. 2 zeigt die Driftkomponente der B-64-Messungen. Zum jetzigen Zeitpunkt zeigt das Instrument noch keine abklingende Drift. Die stückweise Approximation zeigt weiterhin starke Variationen. Die Analyse ganztägiger und halbtägiger Gezeiten wird hierdurch nicht beeinflusst.

Eine unzureichende Abdichtung des Sensors gegenüber Luft-

	Station	Start MM/JJJJ	Dauer Tage	Drift nm/s^2 pro Tag	σ nm/s^2
g-98	Hannover	10/2011	55	$191,2 \pm 12,5$	730,9
	Hamburg	01/2012	84	$126,2 \pm 4,6$	528,2
	Clausthal	05/2012	98	$117,1 \pm 2,6$	150,6
	Ruthe	02/2013	152	$93,9 \pm 1,8$	446,9
B-64	Onsala	06/2012	48	$-209,4 \pm 61,2$	3,1
		07/2012	49	$-155,4 \pm 39,2$	4,0
	Hannover	09/2012	45	$-177,4 \pm 15,0$	3,7
	Ruthe	03/2013	45	$43,0 \pm 75,9$	3,6
		05/2013	21	$-10,4 \pm 44,5$	3,7

Tab. 2 | Übersicht der gemessenen Zeitreihen. Die instrumentelle Drift wird durch eine stückweise lineare Approximation von sieben Tagen Dauer geschätzt. σ ist die Standardabweichung der numerisch differenzierten Residuen der Registrierungen in der ursprünglichen Datenrate des Instruments.

druckänderungen erzeugt einen instrumentellen Luftdruckeffekt. Luftdruckänderungen verändern den Auftrieb der Testmasse im Sensor und beeinflussen die Schweremessungen. Zu der tatsächlichen gravitativen Schwereänderung durch die Attraktion der Luftmassen und Deformation der Erde durch die Luftmassen wird eine zusätzliche nicht-gravitativ Schwereänderung aufgezeichnet. Der Einfluss nicht-gravitativer Komponenten auf das B-64 wurde in einer Luftdruckkammer getestet. In einer Reihe von Experimenten wurde Schwere aufgezeichnet, während der Luftdruck um 70 hPa variiert wurde. Dabei ergaben sich Schwereänderungen von 8 nm/s^2 bis 12 nm/s^2 . Diese Luftdruckänderung kann z. B. erreicht werden, wenn Schweredifferenzen über eine Höhe von 600 m gemessen werden. Dieser instrumentelle Luftdruckeffekt muss bei Messungen berücksichtigt werden. Abb. 3 zeigt das Beispiel eines dieser Experimente. Nach der Variation des Luftdrucks wurde die Luftdruckkammer erneut horizontalisiert, um mögliche Deformationen der Kammer auszugleichen, die die Neigung des Geräts beeinflussen. Die Steuerung der Luftdruckkammer erfolgt durch einen Arduino-Mikrokontroller.

Das gPhone wurde aufgrund der Größe nicht in der Druckkammer getestet. Der Sensor des gPhone ist in zwei druckdichten Kammern eingesetzt und es gibt keine mechanischen Elemente, die von außen in den Sensor hinein reichen, wie z. B. die Messschraube am Burris-

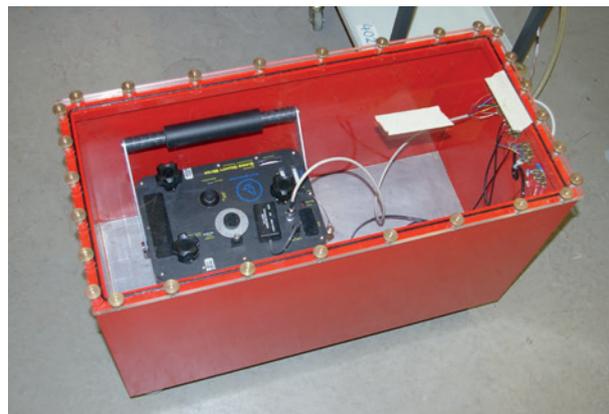
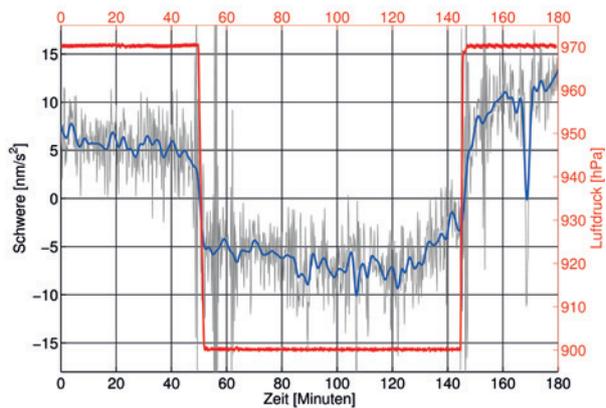


Abb. 3 | Schwereregistrierung mit Burris B-64 in der Luftdruckkammer. Oben: In Rot ist die Änderung des Luftdrucks innerhalb der Luftdruckkammer gezeigt. Die Residuen der Gravimeterzeitreihe in der originalen 10-s-Datenrate sind in Grau dargestellt, eine gefilterte Datenreihe in Blau. Unten: B-64 in der Luftdruckkammer.

Gravimeter. Zusätzlich wird der Druck im Sensor aufgezeichnet. Der Druck im Sensor des g-98 ändert sich linear und nimmt mit etwa $0,055 \text{ hPa/Tag}$ ab. Eine Korrelation mit dem Umgebungsluftdruck wurde nicht gefunden.

Die instrumentelle Phasenverschiebung des B-64 wurde mit der Step-Response-Methode /Richter & Wenzel 1991/ bestimmt. In den Experimenten wurde im Mittel eine Zeitverzögerung von 3 s festgestellt. Dies entspricht einer Phasenverschiebung von $0,012^\circ$ für ganztägige und $0,024^\circ$ für halbtägige Gezeiten. Diese Phasenverschiebung wurde in der Gezeitenanalyse der Daten berücksichtigt.

Das B-64 kann ebenfalls für die Messung in lokalen Schwerenetzen eingesetzt werden. Das Gerät wurde zusammen mit dem Scintrex CG3-4492 /Timmen & Gitlein 2004/ in einem kleinräumigen Schwerenetz, bestehend aus 13 Punkten, eingesetzt. Über eine Periode von 3,5 Tagen konnten mit dem B-64 160 und 125 Schwereverbindungen mit dem CG3-4492 gemessen werden. Es wurde das Step-Verfahren und Handtransport mit einer maximalen Zeit von 10 Minuten zwischen den Messungen eingesetzt. Das CG3 erreichte eine Standardabweichung von 43 nm/s^2 für eine einfach gemessene Schweredifferenz und 17 nm/s^2 als mittlere Standardabweichung der ausgeglichenen Schwerewerte. Das B-64 erreichte jeweils Standardabweichungen von 23 nm/s^2 und 10 nm/s^2 . In den relativgravi-

metrischen Messungen im Rahmen des internationalen Absolutgravimetervergleichs 2009 am BIPM, Paris, erreichten das B-20 und das B-25 vergleichbare Werte /Jiang et al. 2012/.

3 VERGLEICH DER INSTRUMENTE UND STATIONEN

Die Daten beider Instrumente wurden gleich behandelt. Schwereänderungen aufgrund der Erdzeiten und Polbewegung wurden reduziert. Dazu wurde, wenn nicht anders angegeben, ein theoretisches Gezeitenmodell (einschließlich Ozeanauflasten) verwendet /Timmen & Wenzel 1995/, sogenannte synthetisierte Gezeitenparameter. Zusätzlich wurden zeitlich variable Schwereänderungen aufgrund atmosphärischer Massenänderungen korrigiert. Dazu wurde ein stationsabhängiger linearer Faktor verwendet. Bei den Messungen des B-64 wurde der in Abschnitt 2 bestimmte instrumentelle Luftdruckeffekt berücksichtigt. Die Neigungskorrektur wurde bei dem g-98 angebracht. Die Zeitreihen wurden mit dem Programm Tsoft /van Camp & Vauterin 2005/ bearbeitet, um Erdbeben, Sprünge und Ausreißer zu entfernen.

Die Qualität der Daten hängt von dem jeweiligen Gravimeter und der Station ab. Wir vergleichen die Stationen anhand der numerisch differenzierten Schwereresiduen in der Datenerfassungsrate, wie sie das Gerät originär aufzeichnet. In Tab. 2 sind die Standardabweichungen der aufgenommenen Zeitreihen enthalten. Abb. 4 zeigt als Beispiel die Aufzeichnung über drei Tage mit dem g-98 und dem B-64 in Hannover. Aufgrund der Lage der Station Hannover ist die Aufzeichnung des gPhone in Abb. 4 (links) durch die von natürlicher und anthropogener Mikroseismik verursachten kinematischen Beschleunigungen bestimmt. Zusätzlich zu den Rohdaten in Blau ist eine gefilterte Version des Signals in Grün in der Abbildung enthalten. Die Standardabweichung der numerisch differenzierten Residuen der gesamten Zeitreihe beträgt $730,9 \text{ nm/s}^2$. Das B-64 scheint weniger durch die Eigenschaften der Station beeinflusst zu sein. Die Zeitreihe in Abb. 4 (Mitte) wurde auf dem Handheld mit einer Datenrate von 1 Hz ohne zusätzliche Filterung aufgezeichnet. Die Standardabweichung liegt mit $13,9 \text{ nm/s}^2$ deutlich unter der des g-98. Hier zeigt sich der Effekt des analogen Tiefpassfilters des Burris-Gravimeters. Das gPhone andererseits führt keine Filterung durch und erlaubt so auch die Untersuchung hochfrequenter Signale. Von diesem Beispiel abgesehen wurde die Software FSUGrav mit einer

fixen Datenerfassungsrate von 0,1 Hz und einem 600 s langen digitalen Filter genutzt. Abb. 4 (rechts) zeigt eine solche Zeitreihe. Die Standardabweichung dieser Zeitreihe beträgt $3,7 \text{ nm/s}^2$. Tatsächlich erreichte das B-64 auf allen besuchten Stationen eine Standardabweichung der Schwereresiduen von $\approx 4 \text{ nm/s}^2$. Dies ist wahrscheinlich auf die Filterung in der Datenaufzeichnung zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist die Messung des g-98 abhängig von der Umgebung und saisonalen Effekten, wie die Standardabweichungen der vier aufgeführten Zeitreihen zeigen. Dadurch sind weitere Untersuchungen eben dieser Phänomene möglich. Ein Vergleich der Stationen dieser Arbeit zeigt, dass Hannover den größten Einfluss durch Mikroseismik aufweist. Die Station im Harz in Clausthal hat die geringsten Störungen.

Für alle weiteren Betrachtungen werden auf 300 s reduziert Daten verwendet. Diese Datenreduktion wurde mit dem Programm DECIMATE aus dem ETERNA-3.4-Paket durchgeführt /Wenzel 1996/. Das Abfallen der Spektren bei Frequenzen größer als 50 Zyklen pro Tag (cycles per day: cpd) in Abb. 5 wird durch die Filterung verursacht. Das B-64 hat in Onsala für drei Monate gleichzeitig mit einem Supraleitgravimeter (Präzision einige Zehntel nm/s^2 , wenige Zehner nm/s^2 Drift pro Jahr) registriert. Vorprozessierte 10-s-Daten des Supraleitgravimeters GWR OSG-054 wurden von Hans-Georg Scherneck (OSO) bereitgestellt. Abb. 5 (links) zeigt die Fourier-Spektren der Residuen (blau) der mit synthetisierten Gezeitenparametern korrigierten B-64-Beobachtungen und die Differenz (grün) aus B-64- und OSG-054-Beobachtungen. Bei der Verwendung der synthetisierten Gezeitenparameter verbleiben periodische Effekte in der Größenordnung von $0,8 \text{ nm/s}^2$ bis $0,9 \text{ nm/s}^2$ in den ganztägigen und halbtägigen Gezeitenbändern. Da die Station in Onsala direkt an der Küste liegt, sind diese verbleibenden Effekte zu erwarten, da unreduzierte Ozeaneffekte enthalten sind. Die Differenz der Beobachtungen beider Instrumente enthält keine gemessenen Schwereinflüsse. Instrumentelle Effekte, z. B. Ungenauigkeiten in der Eichung, sind jedoch weiterhin enthalten. Das Spektrum dieser Differenz (grün) zeigt bei halb- und dritteltägigen Frequenzen nur noch Amplituden von unterhalb $0,2 \text{ nm/s}^2$. Daraus lässt sich schließen, dass das B-64 in der Lage ist, die ganztägigen und halbtägigen und gegebenenfalls auch dritteltägigen Gezeitenparameter zu bestimmen, eine Zeitreihe ausreichender Länge vorausgesetzt.

Ein direkter Vergleich von g-98 und B-64 ist an den Stationen Hannover und Ruthe möglich. Die Abb. 5 (Mitte) zeigt die Fourier-

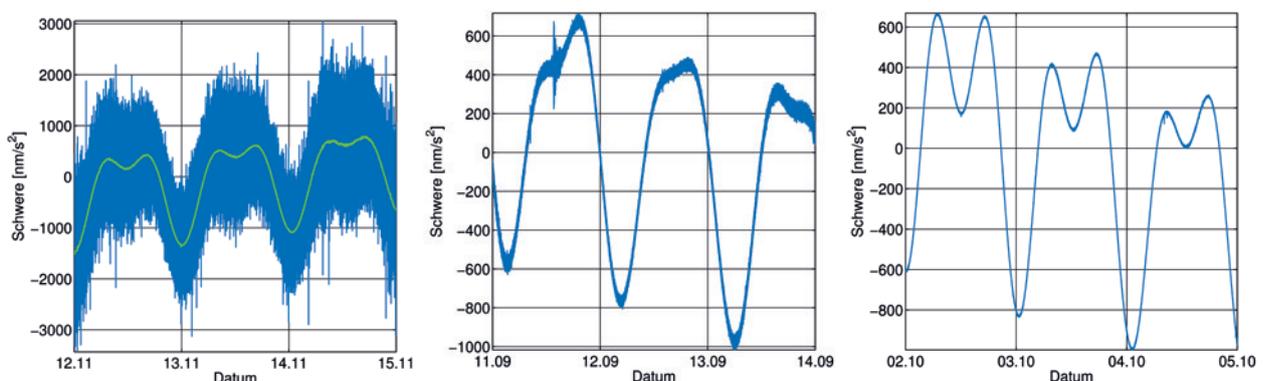


Abb. 4 | Beispiele unkorrigierter Rohdaten des g-98 (links: 1 s (blau) und 600 s gefiltert (grün)) und B-64 (Mitte: 1-s-Aufzeichnung mit PDA; rechts: 10-s-Aufzeichnung mit FSUGrav) für die Dauer von drei Tagen in Hannover.

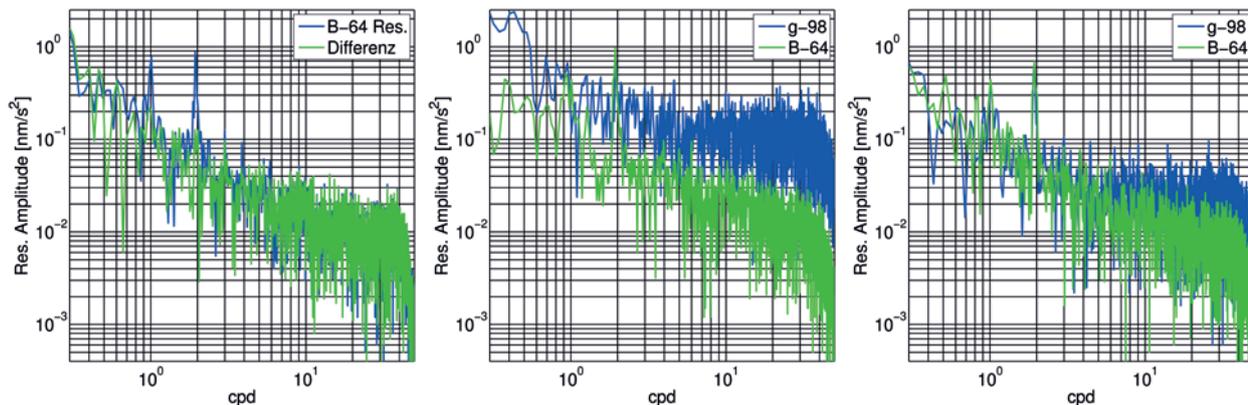


Abb. 5 | Fourier-Spektren von g-98- und B-64-Residuen (aus synthetisierten Gezeitenparametern) an verschiedenen Stationen: Onsala (links: B-64-Residuen und Differenz zu OSG-Beobachtungen), Hannover (Mitte: g-98 und B-64) und Ruthe (rechts: Residuen gleichzeitiger Beobachtungen g-98 und B-64).

Spektren der Residuen beider Gravimeter in Hannover. Bei hohen Frequenzen liegt das Niveau des Rauschens des g-98 bei $0,15 \text{ nm/s}^2$. Das B-64 liegt hier eine Größenordnung niedriger. Bei den halbtägigen Frequenzen zeigen beide Instrumente eine Spitze mit einer Amplitude von $0,9 \text{ nm/s}^2$ für das B-64 und $0,2 \text{ nm/s}^2$ weniger für das g-98. Bei den ganztägigen bis halbtägigen Frequenzen zeigt das g-98 ein Rauschniveau von $0,7 \text{ nm/s}^2$ bis $0,3 \text{ nm/s}^2$. Dabei gibt es zahlreiche Spitzen zwischen $0,7 \text{ cpd}$ und $1,5 \text{ cpd}$, ohne dass bei 1 cpd eine alleinstehende Spitze identifiziert wurde. Das B-64 zeigt im Gegensatz dazu eine deutliche Spitze von $0,5 \text{ nm/s}^2$ bei den ganztägigen Frequenzen. Aufgrund der Lage des Gravimetrielabors ist dies nicht notwendigerweise eine Folge der Verwendung eines theoretischen Gezeitenmodells, sondern durch die Umgebung beeinflusst. Abb. 5 (rechts) zeigt die Residuen der gleichzeitigen Messungen in Ruthe. Diese im ländlichen Raum gelegene Station ist deutlich weniger durch menschliche Aktivitäten beeinflusst, wie auch die Standardabweichungen des g-98 in Tab. 2 zeigen. Der erste Unterschied im Vergleich zu Abb. 5 (Mitte) ist das deutlich geringere Rauschniveau von $3 \cdot 10^{-2} \text{ nm/s}^2$ des g-98. In den Gezeitenbändern verbleiben periodische Effekte von $0,4 \text{ nm/s}^2$ und $0,7 \text{ nm/s}^2$ für ganztägige und halbtägige Gezeiten. Die Residuen des g-98 sind dabei nur geringfügig kleiner. Das Spektrum des B-64 zeigt in höheren Frequenzen keine Änderung. Auch dies wird bereits durch Tab. 2 angedeutet. Dort ist die Standardabweichung σ für alle Stationen nahezu unverändert. Für das g-98 variiert sie jedoch um den Faktor 5 für die 1-Hz-Daten. Lediglich in Clausthal sinkt das Rauschniveau auf die Größenordnung des B-64 von etwa $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ nm/s}^2$.

4 GEZEITENANALYSE

Für die Stationen Ruthe und Onsala wurden Gezeitenparameter berechnet. Die Gezeitenanalyse wurde mit ETERNA 3.4 und den 300-s-Daten durchgeführt /Wenzel 1996/. Die Aufzeichnungen des g-98 sind mindestens drei Monate lang. Die Messungen des B-64 sind im Gegensatz dazu kürzer und in mehreren Sessions aufgenommen. Um eine Reduzierung der Gezeiten auf eine Unsicherheit von 1 nm/s^2 zu gewährleisten, müssen die Gezeitenparameter mit einer Unsi-

cherheit von 1 % des Amplitudenfaktors und $0,05^\circ$ der Phasenverzögerung bestimmt werden.

Für die Station Ruthe wurde eine Gezeitenanalyse für die Beobachtung beider Gravimeter durchgeführt. Die Ergebnisse für ausgewählte Wellengruppen sind in Tab. 3 dargestellt. Für das g-98 wurde die Gezeitenanalyse sowohl für den gesamten verfügbaren Zeitraum von 152 Tagen als auch für den Zeitraum von 66 Tagen durchgeführt, in denen das B-64 in Ruthe gemessen hat. Die Amplituden der g-98-Parameter der beiden Zeiträume unterscheiden sich um weniger als 0,4 % und $0,05^\circ$ in der Phase der ganztägigen und halbtägigen Gezeitenwellen. M3 hat einen größeren Unterschied von 1,3 % und $0,65^\circ$. Die B-64 unterscheiden sich bis zu 4,2 % in Amplitude und $0,05^\circ$ in der Phase für die Wellen bis S2. Die Standardabweichungen σ der Amplituden und Phasen aus g-98-Beobachtungen der Wellen bis M2 sind auf dem gleichen Niveau wie in /Riccardi et al. 2011/ berichtet. M3 ist im Gegensatz zu den anderen Gruppen nicht so gut bestimmt. Die kurze Beobachtungszeit des B-64 schlägt sich in den Standardabweichungen nieder (vgl. auch /Jentzsch 2008/ für eine 77-Tage-Zeitreihe). Die mittlere Standardabweichung der Gruppen O1 – S2 ist doppelt so hoch wie die der vergleichbaren 66-Tage-Zeitreihe des g-98.

Der rechte Teil von Tab. 3 enthält die Ergebnisse der Gezeitenanalyse der Messungen in Onsala. Die Daten des OSG-054 wurden gleichzeitig erfasst und nach der gleichen Methode verarbeitet wie die Daten des B-64. Ein Vergleich der Gezeitenanalyse des B-64 in Onsala und Ruthe zeigt deutlich geringere Standardabweichungen der ganztägigen Gezeitenwellen für die längere Zeitreihe in Onsala. Die halbtägigen Gruppen zeigen geringfügig größere Standardabweichungen. Die Gezeitenparameter O1 – M2 des B-64 und OSG-054 unterscheiden sich in der Amplitude um bis zu 0,3 % und $0,05^\circ$ in Phase. Für S2 ist die Abweichung mit 1,7 % und $0,06^\circ$ etwas größer. Die halbtägigen Gezeitenparameter können durch eine Kombination aus sowohl gezeitenbedingten als auch wetterabhängigen Meeresspiegeländerungen des Kattegats beeinflusst sein. Diese Änderungen betragen etwa 10 cm bis 20 cm in 12 Stunden. Allerdings kann sich der Meeresspiegel wetterbedingt über den Zeitraum einiger Tage verschieben, wenn bei bestimmten Windrichtungen mehr oder weniger Wasser in die Ostsee gedrückt wird. /Olsson et al. 2009/ beschreiben diesen Effekt der Neigung des Meeresspiegels der Ostsee und geben den Effekt auf die Schwere in Onsala mit

Welle	Ruthe						Onsala			
	g-98 (152 Tage)		g-98 (66 Tage)		B-64 (66 Tage)		OSG-54 (97 Tage)		B-64 (97 Tage)	
	δ	$\Delta\Phi$	δ	$\Delta\Phi$	δ	$\Delta\Phi$	δ	$\Delta\Phi$	δ	$\Delta\Phi$
O1	1,147 91 0,000 27	0,123 9° 0,013 5°	1,148 04 0,000 41	0,094 9° 0,020 7°	1,149 70 0,001 33	0,182 3° 0,066 3°	1,147 47 0,000 46	0,122 0° 0,023 2°	1,147 22 0,000 61	0,158 0° 0,030 7°
K1	1,135 24 0,000 20	0,251 1° 0,010 2°	1,134 86 0,000 40	0,265 4° 0,020 3°	1,139 55 0,001 33	0,273 5° 0,066 0°	1,139 10 0,000 46	0,124 9° 0,023 2°	1,138 74 0,000 59	0,123 4° 0,029 5°
M2	1,184 11 0,000 26	1,693 2° 0,012 5°	1,184 33 0,000 36	1,645 9° 0,017 5°	1,186 26 0,000 43	1,689 1° 0,020 6°	1,187 22 0,000 32	1,214 8° 0,015 2°	1,187 03 0,000 56	1,265 3° 0,027 1°
S2	1,183 74 0,000 61	0,391 8° 0,029 6°	1,183 63 0,001 12	0,375 1° 0,055 0°	1,188 77 0,001 36	0,387 5° 0,066 8°	1,178 45 0,000 96	0,281 2° 0,046 1°	1,180 49 0,001 65	0,344 4° 0,078 9°
M3	1,054 15 0,008 48	0,465 1° 0,461 0°	1,052 75 0,012 36	1,112 0° 0,672 4°	1,092 65 0,024 90	-0,984 9° 1,304 3°	1,059 60 0,007 11	1,467 4° 0,384 2°	1,055 51 0,021 26	0,448 7° 1,154 5°
$\bar{\sigma}$	0,000 34	0,016 5	0,000 57	0,028 4	0,001 11	0,054 9	0,000 55	0,026 9	0,000 85	0,041 6

Tab. 3 | Gezeitenparameter (Amplitudenfaktor δ und Phasenverzögerung $\Delta\Phi$) für ausgewählte Wellengruppen aus gleichzeitigen g-98- und B-64-Beobachtungen in Ruthe und OSG-054- und B-64-Beobachtungen in Onsala. Die Standardabweichungen der berechneten Parameter sind rot gekennzeichnet. $\bar{\sigma}$ ist die mittlere Standardabweichung der Gezeitenwellen O1 bis S2.

6 nm/s² bis 9 nm/s² für zwei Zustände der Ostsee an. /Mammadov et al. 2011/ führten eine Gezeitenregistrierung mit dem B-64 für den Zeitraum eines Jahres in Schaki (Şəki), Aserbaidshan, durch. Dort wurden geringfügig höhere Standardabweichungen als bei der Messung des B-64 in Onsala erreicht.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Micro-g LaCoste gPhone-98 und dem ZLS Burris Gravity Meter B-64 wurden Schwereregistrierungen in Hamburg, Hannover, Clausthal, Ruthe und Onsala durchgeführt. Anhand einiger dieser Messungen wurden Gezeitenparameter bestimmt und die Genauigkeit der Instrumente beurteilt. Die wiederholte Bestimmung der linearen Eichfaktoren beider Geräte ergab eine Stabilität von $3 \cdot 10^{-4}$. Die Drift des g-98 hat über die Zeit abgenommen und beträgt derzeit etwa 90 nm/s². Sie wird linear modelliert nach einer Einlaufphase von zwei bis drei Wochen. Die Drift des B-64 zeigt ein deutlich nicht-lineares Verhalten mit starken Variationen innerhalb einiger Wochen. Mit der Step-Response-Methode konnte eine Phasenverzögerung von 3 s für das B-64 abgeschätzt werden. Ein Test in der Luftdruckkammer ergab einen instrumentellen Luftdruckeffekt des B-64 von 0,14 nm/s² pro hPa. In der Messung eines kleinräumigen Schwerenetzes konnte mit dem B-64 eine mittlere Standardabweichung von 10 nm/s² für die ausgeglichenen Schwerewerte erreicht werden.

Die Gezeitenanalyse der parallelen B-64- und g-98-Messungen in Ruthe ergab gemischte Ergebnisse. Die g-98-Amplitudenfaktoren der ganztägigen und halbtägigen Gezeitenwellen ergaben eine mittlere Standardabweichung von $0,3 \cdot 10^{-3}$ für eine Zeitreihe von 152 Tagen und $0,6 \cdot 10^{-3}$ für eine Zeitreihe von 66 Tagen bei einer Übereinstimmung der Amplitudenfaktoren von 0,4 %. Die mittlere Standardabweichung der Amplitudenfaktoren der 66-tägigen B-64-Messung ist um den Faktor 2 größer bei einer Übereinstimmung von 1,5 % bis 4,2 %. In Onsala ergab die Gezeitenanalyse der gemeinsamen B-64- und GWR-OSG-054-Messungen eine Übereinstimmung von 0,3 % für O1, K1 und M2 sowie 1,7 % für S2. Die Beobachtungszeit war jedoch mit 97 Tagen deutlich länger als in Ruthe.

Insgesamt zeigen g-98 und B-64 zufriedenstellende Ergebnisse mit einer Bestimmung der Amplitudenfaktoren besser als 1 % und der Phase besser als 0,05° für ganztägige und halbtägige Gezeiten. Das g-98 erreichte jedoch in einer vergleichsweise kurzen Beobachtungszeit geringere Standardabweichungen der bestimmten Gezeitenparameter bei gleichzeitig besserer Übereinstimmung zu Gezeitenparametern aus einer wesentlich längeren Zeitreihe als das B-64 bei paralleler Registrierung. Insgesamt liegen beide Geräte mit den erreichten statistischen Kenngrößen im Rahmen der publizierten Größenordnungen anderer gPhone- und Burris-Gravimeter.

6 DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde in Teilen durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projekt MU 1141/16-1) finanziert. Das gPhone-98 wurde finanziert durch Mittel des Centre for Quantum Engineering and Space Time Research (QUEST). Die Autoren danken Hans-Georg Scherneck und dem Onsala Space Observatory für ihre Unterstützung und dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) für die Zusammenarbeit in Hamburg.

LITERATUR

- Crossley, D.; Hinderer, J.; Ricciardi, U. (2013): The measurement of surface gravity. In: Reports on progress in physics, 76(2013)4, 46101.
- Jentsch, G. (2008): The automated Burris gravity meter – a new instrument using an old principle. In: Proc. Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, St. Petersburg, Russia, 20. – 23. 8. 2007, 20–23.
- Jiang, Z.; Pálinkás, V.; Francis, O.; Jousset, P.; Mäkinen, J.; Merlet, S. et al. (2012): Relative gravity measurement campaign during the 8th International Comparison of Absolute Gravimeters (2009). In: Metrologia, 49(2012), 95–107.
- Kangieser, E.; Kummer, K.; Torge, W.; Wenzel, H.-G. (1983): Das Gravimeter-Eichsystem Hannover. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, 120.
- LaCoste & Romberg (2004): Instruction manual Model G and D gravity meters. LaCoste & Romberg, Austin, TX/USA.

Mammadov, S.; Jahr, T.; Jentzsch, G.; Kadirov, F. (2011): Primary results of new gravity station Shaki/Azerbaijan. In: Bull. d'Inf. Marées Terrest., 147(2011), 11 881–11 890.

Micro-g LaCoste (2008): gPhone/P.E.T Hardware Manual V1. Micro-g LaCoste, Lafayette, CO/USA.

Olsson, P.-A.; Scherneck, H.-G.; Agren, J. (2009): Effects on gravity from non-tidal sea level variations in the Baltic Sea. In: J. of Geodynamics, 48(2009)3-5, 151–156.

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(2011)1, 28–39.

Richter, B.; Wenzel, H.-G. (1991): Precise instrumental phase lag determination by the step response method. In: Bull. d'Inf. Marées Terrest., 111(1991), 8 032–8 052.

Scherneck, H.-G. (2008): Status report to the Global Geodynamics Project: superconducting gravimeter station at the Onsala Space Observatory. The national facility for radio astronomy in Sweden. Onsala Space Observatory.

Timmen, L. (2010): Absolute and Relative Gravimetry. In: Guochang, X. (Ed.): Sciences of Geodesy. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–48.

Timmen, L.; Gitlein, O. (2004): The capacity of the Scintrex Autograv CG-3M no. 4492 gravimeter for "absolute-scale" surveys. In: Revista Brasileira de Cartografia, 56(2004)2, 89–95.

Timmen, L.; Wenzel, H.-G. (1995): Worldwide Synthetic Gravity Tide Parameters. In: Sünkel, H.; Marson, I. (Ed.): Gravity and Geoid, 113. Springer, Berlin/Heidelberg, 92–101.

van Camp, M.; Vauterin, P. (2005): Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. In: Computers & Geosciences, 31(2005), 631–640.

Wenzel, H.-G. (1996): The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. In: Bull. d'Inf. Marées Terrest., 124(1996), 9 425–9 439.

ZLS Corporation (2011): User Guide: Burris Gravity Meter and UltraGrav control system. ZLS Corporation, Austin, TX, USA.

M. Sc. Manuel Schilling

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG

Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
schilling@ife.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Olga Gitlein

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG

Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
gitlein@ife.uni-hannover.de



Geospatial Minds for Society

> www.agit.at



agit_2015

SYMPOSIUM und EXPO
Angewandte Geoinformatik
Salzburg, 8. –10. Juli 2015