Das Relativgravimeter-Kalibriersystem Hannover für 10⁻⁴-Maßstabsbestimmungen

The Relative Gravimeter Calibration System Hannover for 10⁻⁴ Scale Determination

Ludger Timmen, Reinhard Falk, Gerald Gabriel, Alexander Lothhammer, Manuel Schilling, Detlef Vogel

Eine bestmögliche Genauigkeit der Kalibrierung von Relativgravimetern ist oftmals notwendig, um den Aufgaben der Landesvermessung und besonders den Zielen in geowissenschaftlichen Projekten gerecht zu werden. Um z. B. kleine vertikale Bewegungen der Erdoberfläche zu erfassen und um Fehlinterpretationen aufgrund scheinbarer Veränderungen aufgrund ungenauer Kalibrierung vorzubeugen, wird hier eine Maßstabsgenauigkeit der Relativgravimeter von 1 · 10⁻⁴ angestrebt. Für die zwei wichtigsten Teilsysteme des Gravimeter-Kalibriersystems Hannover, die Harz-Kalibrierlinie (drei Absolutgravimetrie-Punkte) und die Vertikale Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover (VGKH, 20-stöckiges Hochhaus, 20 Relativgravimetrie-Punkte), wurde kürzlich eine Verbesserung erzielt. Für dieses Upgrade 2017 konnten Schweremessungen von modernen Gravimetern der Firmen Scintrex (Kanada) und ZLS Corporation (USA) verwendet werden. Die auf den Messungen mit LaCoste-Romberg-Gravimetern beruhende Lösung 2004 wird in den beiden Kalibrierlinien durch das Upgrade 2017 ersetzt. Die wichtigen absolutgravimetrischen Messungen im Harz wurden 2013 durch Beobachtungen mit einem Absolutgravimeter A10 ergänzt. Für die Basisverbindung 210-370 (1. bis 17. Stock, Fahrstuhlverbindung) in der VGKH ergab die Ausgleichung eine Standardabweichung von 11 nm/s². Die Ungenauigkeit direkt benachbarter Punkte variiert zwischen 5 nm/s² und 10 nm/s² für die Punkte unterhalb des 18. Stocks. Die Maßstabsungenauigkeit der Harz-Kalibrierlinie und der VGKH wird mit 2 · 10⁻⁴ angenommen ("expanded uncertainty", Konfidenzintervall 95 %). Die regelmä-Bige Überprüfung der Relativgravimeter auf einen instrumentellen Luftdruckeffekt und einer instrumentell bedingten Maßstabsinstabilität wird dringendst empfohlen.

Schlüsselwörter: Relativgravimeter-Kalibrierung, Vertikale Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover, instrumenteller Luftdruckeffekt, instrumentelle Maßstabsstabilität

A best possible accuracy for the calibration of relative gravimeters is often required to achieve the objectives of state-geodetic and geo-scientific surveys. A scale inaccuracy for relative gravimeters of $1 \cdot 10^{-4}$ is striven for which allows, e.g., to detect small vertical movements of the Earth's surface or to avoid misinterpretation of observations showing apparent variations due to uncertain calibration of the relative gravimeters. Recently, the Gravity Meter Calibration System Hannover has been improved with respect to its most important parts: the Harz calibration line (3 absolute gravimetric points) and the Vertical Gravimeter Calibration Line Hannover (VGCH, 20-storey building, 20 relative gravimetric points). For this Upgrade 2017, only "state-of-the-art" measurements with gravimeters from Scintrex (Canada) and ZLS Corporation (USA) have been used. For the two calibration lines, the Upgrade 2017 replaces the solution of 2004 which was based on measurements with LaCoste-Romberg instruments only. They were the measuring standard in the 70s and 80s. The older absolute gravity determinations in the Harz line have been completed with modern A10 observations in 2013. In the VGCH, the base connection 210-370 (1st to 17th storey, elevator

for transportation) has been obtained with a standard deviation of 11 nm/s². The inaccuracy between adjacent points varies between 5 and 10 nm/s² for the points below the 18th storey. The scale inaccuracy of the Harz calibration line as well as of the VGCH is estimated to be $2 \cdot 10^{-4}$ (expanded uncertainty, confidence interval 95 %). A regular checking of the relative gravimeters with regard to instrumental air pressure effects and instrumentally caused scale instabilities is strongly recommended.

Keywords: Relative gravimeter calibration, Vertical Gravimeter Calibration Line Hannover, instrumental air pressure effect, instrumental scale stability

1 MOTIVATION: BESTMÖGLICHE GRAVIMETERSKALIERUNG

Zur Messung von Schweredifferenzen und zeitlichen Schwerevariationen werden heute absolut- und relativgravimetrische Techniken eingesetzt. Eine optimale Auswahl der verfügbaren unterschiedlichen Instrumententypen bzw. einzelnen Instrumente für den kombinierten Einsatz erlaubt dann die bestmögliche Durchführung eines Messvorhabens bzgl. Genauigkeiten und ökonomischer Effektivität. Einen Überblick über die Messtechniken in der terrestrischen Absolut- und Relativgravimetrie in deutscher Sprache findet sich u. a. in /Torge 2003/. Über Aufgaben und Anwendungen wird auch in Übersichtsartikeln von /Timmen 1996/ und /Timmen 2010/ berichtet.

Relativgravimeter werden u.a. für folgende geodätische und geophysikalische Aufgaben eingesetzt:

- Unterstützung der Absolutgravimetrie: Zentrierung zu Sicherungspunkten, Anbindung an Landesnetze, Kontrollverbindung zwischen Absolutpunkten;
- Verdichtung der nationalen Grundlagennetze;
- Bestimmung von Schweredatensätzen mit hoher Punktdichte zur regionalen Geoidverbesserung;
- Monitoring von zeitlichen Schwerevariationen in Untersuchungsgebieten mit kurzen Transportzeiten zwischen den Punkten (sonst Absolutgravimetrie);
- Bestimmung von gravimetrischen Anomalien (Bouguer-Anomalie, Freiluft-Anomalie) zur geologischen Strukturerkundung.

In den 1970er- und 1980er-Jahren dominierten die Gravimeter der Firma LaCoste-Romberg (LCR, USA, astasiertes Metallfeder-Hebel-System mit Verstellspindel). In den 1990er-Jahren kamen die ersten automatisierten Federgravimeter von Scintrex (Kanada), Autograv CG3, in Deutschland zum Einsatz (lineares Quarzfeder-System, /Falk 1995/), die keine Spindel mehr benötigen. Über die jüngste Modellreihe Scintrex CG6 wurde bereits von /Cieslack 2017/ berichtet, der das weltweit erste CG6 untersuchen konnte. Mit den Gravimetern der CG3-Serie lässt sich im Feldbetrieb bei kurzen Punktverbindungen, die wiederholt gemessenen wurden (z. B. zehnmal), eine Präzision von 10 nm/s² für die Punktschweredifferenz erzielen (vgl. /Timmen & Gitlein 2004/). Unter Präzision soll hier die aus Messwidersprüchen abgeleitete Genauigkeit verstanden werden, mit der ein Gravimeter eine Schweredifferenz mit wiederholten Messungen beobachtet hat (Standardabweichung des Mittels). Seit etwa 15 Jahren wird in Deutschland ein neues System der Firma ZLS Corporation (USA) genutzt, welches eine Weiterentwicklung der älteren LCR-Gravimeter ist und auf dem dazugehörigen Patent von 1942 basiert. Das automatisierte ZLS-Burris-Gravimeter B-25 hat 2003 in einem ersten Experiment im Kalibriersystem Hannover

ebenfalls eine Präzisionsgenauigkeit von 10 nm/s² gezeigt (siehe auch /Jentzsch et al. 2015/).

Diese neuen Gravimetersysteme unterscheiden sich von den älteren LCR-Gravimetern im Wesentlichen um:

- Thermostatisierung, um ein günstigeres Driftverhalten (zeitliche Änderung der Federspannung) zu erzielen;
- höhere Abgriffgenauigkeit des Wegaufnehmers im Subnanometerbereich;
- größeren elektronischen Mess- und Regelbereich mit linearem Verhalten, um auch unabhängig von der analogen Messmechanik (Messspindel, Getriebebausteine, Hebel) einfach zu kalibrierende Messdaten zu erfassen;
- hohe Messrate (1 Hz und höher), um durch die Messanhäufung über ein vorgebbares Zeitintervall, z. B. 60 s, durch Filterung ein verbessertes Ergebnis zu erhalten;
- automatisierte Datenerfassung mit Auswertung in Echtzeit, um in situ das Ergebnis bewerten zu können und um nutzerbedingte Eingabe- und Übertragungsfehler zu vermeiden.

Mit den Entwicklungen von ZLS und Scintrex stehen den Nutzern somit zwei "state-of-the-art"-Gravimetertypen für den Feldbetrieb zur Verfügung. *Abb. 1* zeigt die drei vorhandenen Scintrex-Gravimeterversionen und ein ZLS-Burris-Gravimeter.

Die Genauigkeit eines modernen Absolutgravimeters, bezogen auf die instrumentelle Langzeitstabilität bzw. Wiederholbarkeit, ist besser als 20 nm/s² bei entsprechend sorgfältiger Nutzung (vgl. /Timmen et al. 2015/ oder /Schilling & Timmen 2016/). Ziel der Relativgravimetrie muss es deshalb sein, bei den notwendigen Zentrierungen vom Sensorreferenzpunkt des Absolutgravimeters zu einem Schwerefestpunkt der Landesvermessung die Genauigkeit der Absolutgravimetrie zu erhalten und somit für die Relativgravimetrie eine Genauigkeit zu gewährleisten, die möglichst besser als 20 nm/s² ist. Auch um zeitliche Variationen z.B. aufgrund einer flächenhaften Absenkung des Erdbodens von weniger als 1 cm relativgravimetrisch zu erfassen, wird eine Genauigkeit von 10 nm/s² angestrebt (siehe z. B. /Gabriel et al. 2015/ oder /Kersten et al. 2017/). Eine lokale Höhenänderung von 1 cm entspricht etwa 30 nm/s² Schwereänderung. Diese geforderte Präzisionsgenauigkeit von besser 20 nm/s² benötigt auch eine entsprechende Qualität des genutzten Referenzkalibriersystems bzgl. absoluter Maßstabsgenauigkeit mit Langzeitstabilität. Tab. 1 verdeutlicht, welche systematische Verfälschung für verschieden große Punktschweredifferenzen erhalten werden, wenn der Maßstab eines Gravimeters während einer der Messepochen um 1 · 10⁻⁴ falsch



Abb. 1 | Scintrex-Gravimeter CG3 (oben rechts /L. Timmen/), CG5 (oben links /L. Timmen/), CG6 (unten rechts /M. Cieslack/), ZLS-Burris-Gravimeter (unten links /L. Timmen/)

ist. Solch eine Maßstabsungenauigkeit kann dazu führen, dass erhaltene Schwereänderungen von mehreren 10 nm/s² nur scheinbar vorliegen. Bei den beiden in Tab. 1 genannten Kalibrierlinien muss bedacht werden, dass die Referenzpunkte auch mit einer Unsicherheit behaftet sind, die sich u.a. durch die sich ändernde Untergrundhydrologie ergibt. Die Schweredifferenz zwischen den beiden Endpunkten der Harz-Kalibrierlinie kann innerhalb eines Jahres durchaus um 50 nm/s², oder vielleicht auch mehr, variieren. Für die Linie in Hannover (Hochhaus) ist eine natürlich bedingte Variation in der maximalen Schweredifferenz von 10 nm/s² bis 20 nm/s² nicht auszuschließen. Modellrechnungen zu den variierenden Schneemassen an der Zugspitze ergeben Variationen von mehreren 100 nm/s² am Gipfelpunkt, die mit einem Gravimeter mit 1.10⁻⁴ Maßstabsgenauigkeit nicht beobachtet werden können. Zusammen mit den obigen Informationen lässt sich aus der Tab. 1 schlussfolgern, dass eine angestrebte Gravimeterkalibriergenauigkeit von 1 · 10⁻⁴ realistisch ist, wenn moderne Relativgravimeter eingesetzt und auf gut kontrollierten langzeitstabilen Referenzlinien kalibriert werden.

Um tatsächlich eine Maßstabsstabilität der Relativgravimeter von $1 \cdot 10^{-4}$ zu erreichen, müssen mögliche Ungenauigkeitsbeiträge auf besser als $1 \cdot 10^{-4}$ begrenzt werden. Dazu sind folgende mögliche Fehlerquellen zu kontrollieren und zu beherrschen:

- Messpräzision der Relativgravimeter;
- absolute Genauigkeit des durch das Kalibriersystem festgelegten Maßstabs (Absolutmessungen);

Gebiet	Δg -Bereich	δ <i>g</i> -Fehler
Vertikale Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover	192 µm/s ²	19 nm/s ²
Harz-Kalibrierlinie	931 µm/s ²	93 nm/s ²
Deformationsgebiet Bad Frankenhausen	52 µm/s ²	5 nm/s ²
Klima-Untersuchungsgebiet Zugspitze	5221 µm/s ²	522 nm/s ²

Tab. 1 Auswirkung einer Kalibrierungenauigkeit ΔE von $1 \cdot 10^{-4}$ auf unterschiedliche Messgebiete, die aktuell in laufenden Projektarbeiten vermessen werden, mit ihren maximalen Schwereunterschieden (Δg -Bereich); es wird eine systematische Verfälschung δg über den gesamten Schwerebereich erhalten

- Ungenauigkeiten in den vertikalen Schweregradienten oberhalb der vermarkten Kalibriersystempunkte;
- instrumenteller Luftdruckeffekt der Relativgravimeter bei unzureichender Abdichtung des Sensorgehäuses;

2 HANNOVER-KALIBRIERSYSTEM MIT LÖSUNG 2004 UND UPGRADE 2017

In dem Zeitraum 1976 bis 1982 wurde in Niedersachsen das Gravimeter-Kalibriersystem Hannover (*Abb. 2*) eingerichtet. In Zusammenarbeit des Instituts für Erdmessung (IfE) und der Landesvermessung Niedersachsen wurde speziell zur Bestimmung der Kalibrierfunktion von LCR-Gravimetern (Polynom und Perioden) ein Referenzsystem aufgebaut, welches den gesamten Schwerebereich in Niedersachsen von ca. $3\,000 \,\mu$ m/s² abdeckt. Das Kalibriersystem wurde erstmalig in /Kanngieser et al. 1983/ ausführlich dokumentiert und wird auch in /Timmen 2010/ behandelt.

Der Aufbau des Kalibriersystems erklärt sich anhand der Beobachtungsgleichung, die den Zusammenhang zwischen roher Ablesung z an einem Gravimeter vom Typ LCR und dem resultierenden Schwerewert *g* beschreibt:

$$g = N_0 + \sum_{j=1}^{p} d_j (t - t_0)^j + \sum_{k=1}^{m} Y_k Z^k + \sum_{l=1}^{n} A_l \cos(\omega_l Z - \varphi_l).$$
(1)

Dabei bedeuten: N_0 = unbekanntes Datumsniveau des Instruments; d_j = Drift-(Gang-)Parameter des Entwicklungsgrads j; t_0 = Anfangszeit (z. B. erste Ablesung am Tag); t = Zeitpunkt der Messung; Y_k = Kalibrierkoeffizient von Grad k, z = Ablesung in Zählwerkseinheiten; A_I = Amplitude; ω_I = Frequenz (vom Hersteller vorgegeben, 2π /Periodenlänge); φ_I = Phase des periodischen Terms von Grad I. Die sogenannte Δg -Ausgleichung bildet vor der Ausgleichung Beobachtungdifferenzen zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen, sodass die Niveauunbekannte N_0 eliminiert wird.

Die langwelligen Kalibrierterme können mit den Feldpunkten von Cuxhaven bis zum Oberharz erfasst werden (gleichmäßiger Punktabstand mit ca. 90 µm/s²; zur Lage der Punkte siehe *Abb. 2* und *Tab. 5*). Die kurzwelligen Terme werden in der vertikalen Kalibrierlinie im 20-stöckigen Hochhaus der Leibniz Universität Hannover bestimmt (Intervalle in den Teilsystemen: 10, 2 und 0,2 µm/s²). Die letzte Ausgleichungslösung für das amtliche System wurde 2004 am IfE berechnet. Insgesamt wurden 47000 Schweredifferenzmessungen berücksichtigt, die mit 32 LCR-Gravimetern bis 1992 durchgeführt wurden. Zur Sicherstellung der Datumsdefinition im Deutschen Schweregrundnetz 1994 (DSGN94) wurden zwölf Absolutschweremessungen, die sich auf Stationen entlang des sich von Norden nach Süden erstreckenden Profils verteilen, als Beobachtungen in die Ausgleichung mit aufgenommen, sodass eine "weiche" Lagerung des Gesamtnetzes möglich war. An der Datumsfestlegung waren die Gravimeter JILAg-3 (IfE), JILAg-5 (Finnisches Geodätisches Institut) und das FG5-101 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) beteiligt. Für direkt benachbarte Feldpunkte in der Linie von Cuxhaven bis Oberharz ergab sich eine durchschnittliche Standardabweichung der Differenz von ca. 20 nm/s². Für benachbarte Punkte der Vertikalkalibrierlinie im Hochhaus wurde 10 nm/s² erhalten. Bei den modernen Gravimetern mit integriertem elektronischen Mess- und Regelsystem entfallen die periodischen Terme gänzlich, wenn man nur diesen Messmodus benutzt und die manuelle Einstellmöglichkeit mit der Messspindel konstant lässt. Im Gravimeter-Kalibriersystem Hannover (Lösung 2004) wurden maximale Amplituden für die periodischen Terme von über 200 nm/s² für die LCR-Gravimeter bestimmt, wobei durchschnittlich die Amplituden kleiner als 80 nm/s² erhalten wurden. siehe /Timmen 2010/.

Mit dem Erhalt des ersten Scintrex CG3 Gravimeters am IfE in 2001 und dessen Nutzung in der Vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover (VGKH) zeigten sich allerdings schon systematische Effekte, die auf die höhere Messgenauigkeit dieses Instrumententyps, auf Ungenauigkeiten in den angenommen vertikalen Schweregradienten zur Zentrierung auf die jeweilige Bodenmarke und auf hydrologisch bedingte Unsicherheiten in den bisher als stabil angenommenen Referenzwerten zurückgeführt werden. Um bei der Neubestimmung der VGKH (Upgrade 2017) nicht kontrollierbare Unsicherheiten zu vermeiden, werden

- die neuen Punktschwerewerte alle auf eine Höhe von 25,0 cm über Bodenmarke bezogen (ungefähre Sensorhöhe der Scintrex-Gravimeter CG3 und CG5);
- alle Punkte unterhalb des 1. Stockwerks nicht mehr berücksichtigt, um signifikante Grundwassereinflüsse auf den durch die VGKH abgedeckten Schwereunterschied zu vermeiden;
- nur noch Kalibrierpunkte genutzt, die entlang einer vertikalen Linie (Lotlinie) im Hochhaus liegen, um damit aus den ermittelten Punktschwerewerten iterativ den nichtlinearen Schwereverlauf (Vertikalgradient) entlang der 64 m langen Vertikallinie zu bestimmen;
- nur noch Messungen mit modernen "state-of-the-art"-Relativgravimeter berücksichtigt, um deren höheren Messgenauigkeiten gerecht zu werden.

Einfache Modellrechnungen zu den Grundwasservariationen wurden vorgenommen, indem in ca. 5 m Tiefe unter Erdoberfläche im Bereich außerhalb des Hochhausgrundrisses Schwankungen des Grundwasserspiegels bis zu einem Meter

simuliert wurden (Approximation mit Bouguerplatte, Porenvolumen im Sand 33 %). Es ergab sich, dass die Variation als Schwereeinfluss auf alle Punkte ab dem 1. Stockwerk innerhalb von $1 \cdot 10^{-4}$ gleich ist (≡19 nm/s², bezogen auf die Gesamtschweredifferenz von 192 µm/s²). Die Linien im Hochhauskeller mit Intervallen von 2 und 0,2 µm/s² werden im Upgrade 2017 nicht mehr berücksichtigt. Die Sensorhöhen bei den Scintrex CG3 und CG5 liegen in der Nähe von 25 cm über Bodenmarke. Um den Einfluss von fehlerhaften Annahmen zu den Vertikalgradienten klein zu halten bzw. praktisch zu eliminieren, wurde die neue Referenzhöhe 25,0 cm für alle Punktschwerewerte des VGKH gewählt. Die ZLS-Burris-Gravimeter haben eine Sensorhöhe von etwa 20 cm bei Nutzung der zugehörigen Messplatte bzw. ca. 10 cm ohne Messplatte. In den Fällen werden in der Auswertung negative Sensorhöhen mit ca. -5 cm bzw. -15 cm berücksichtigt, um die Ergebnisse auf 25,0 cm über Boden zu beziehen. Alle Nutzer der VGKH werden gebeten, die Messplatte zu nutzen, um möglichst nahe an die Referenzhöhe zu kommen. Eine Genauigkeitsabschätzung für eine Höhenreduktion von bis zu 15 cm mithilfe von Simulationen (Schwerewirkung der Betonmassen) hat eine maximale Reduktionsungenauigkeit von 5 nm/s² ergeben. Dazu müssen die in Abschnitt 4 beschriebenen und neu bestimmten Gradienten genutzt werden.

Da es bisher nicht möglich ist, den Maßstab des VGKH mit Absolutmessungen direkt zu bestimmen, fokussiert sich die Absolutgravimetrie auf die Punkte der Harz-Kalibrierline, um dann den Maßstab mit zeitnahen Relativmessungen vom Harz nach Hannover zu übertragen. Die schnelle Straßenverbindung von dem Punkt in Bad Harzburg (Harzrand) zu den beiden Punkten im Oberharz (in



Abb. 2 | Das Gravimeter-Kalibriersystem Hannover mit den beiden Teilsystemen (Kalibrierlinien, als dicke rote Linien gezeichnet) in Hannover (links) und Harz (rechts). Die Ausgleichungslösung von 2004 hat eine Verbesserung bzgl. der Harz-Kalibrierlinie und der Vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover (VGKH) aufgrund neuer Messungen mit modernen Gravimetern erhalten (Upgrade 2017).

Torfhaus und am Parkplatz des Ehrenfriedhofs (Kriegsräber)) erlaubt es, alle 25 bis 30 Minuten eine Verbindungsmessung zwischen den Enden der Harz-Kalibrierlinie vorzunehmen. Relativgravimetrisch wurden die Schweregradienten entlang der jeweiligen Lotlinie über den Messpfeilern bestimmt, um auf die Bodenmarke zu zentrieren. Alle Schwerewerte der Feldpunkte des Gravimeter-Kalibriersystems Hannover in Norddeutschland beziehen sich auf die Bodenmarken. Da die aktuellen *g*-Werte der Feldpunkte kontinuierlichen Änderungen von mehreren 0,01 µm/s² aufgrund der hydrologischen Bedingungen im Untergrund unterworfen sind, wird hier nicht die hohe Genauigkeit wie für die VGKH gefordert. Der fast fünfmal so große Schwerebereich erlaubt eine etwas größere Ungenauigkeit in den einzelnen *g*-Werten (VGKH: $1 \cdot 10^{-4}$ von 192 µm/s² entspricht 19 nm/s², Harz: $1 \cdot 10^{-4}$ von 931 µm/s² entspricht 93 nm/s²).

Neben der Harz-Kalibrierlinie und dem VGKH (Upgrade 2017) steht weiterhin das gesamte Gravimeter-Kalibriersystem Hannover den Nutzern zur Verfügung. Aufgrund der sich geänderten Gravimetertechnologie (elektronische Mess- und Regelsysteme mit großem Schwerebereich) werden allerdings die vielen Punkte kaum noch benötigt, um periodische Kalibrierterme des mechanischen Messsystems zu bestimmen. Mit dem Upgrade 2017 wurde in erster Linie eine signifikante Verbesserung der Hochhaus-Kalibrierlinie VGKH erreicht.

3 ABSOLUTGRAVIMETRIE IN DER HARZ-KALIBRIERLINIE

Mit der Beschaffung des Absolutgravimeters JILAg-3 durch das IfE im Jahr 1986 war erstmalig ein transportables Absolutinstrument in Deutschland vorhanden, welches es erlaubte, genaue Referenzpunkte zur Festlegung des gravimetrischen Datums (Maßstab und Niveau) zu installieren, die für Kalibrierlinien und Landesgrundlagennetze benötigt werden. Ein großer Vorteil der Absolutgravimetrie besteht darin, dass die Genauigkeit einer erfassten Schweredifferenz zwischen zwei Absolutpunkten unabhängig von der geographischen Distanz zwischen den Punkten ist. Das Messprinzip nach der Freifall-Methode (laserinterferometrische Verfolgung eines fallenden Prismas im Hochvakuum unter Nutzung eines Rubidium-Zeitzählers) wird u.a. in /Gabriel et al. 2015/ und ausführlicher in /Torge 2003/ erklärt.

In Bad Harzburg wurde 1986 im Gebäude neben dem Feldpunkt 481 erstmalig die Schwere absolut gemessen (ehemaliges evangelisches Gemeindehaus, frühere Fundamentalstation der gravimetrischen Reichsaufnahme). Mit mehreren LCR, ausgestattet mit integrierten elektronischen Mess- und Regelsystemen, wurden dann von der Sensorhöhe des JILAg-3 (ca. 80 cm über Boden, Stativnutzung) die Verbindung zum Außenpunkt bestimmt. 1987 wurde die Absolutbestimmung wiederholt und eine Differenz von 0,16 μ m/s² zu 1986 erhalten. Für das Kalibriersystem mit Lösung 2004 wurde das Mittel genutzt. In Torfhaus (Oberharz) konnte 1987 ebenfalls in unmittelbarer Nähe zum Feldpunkt 563 der Kalibrierlinie absolut gemessen werden. Der Punkt 571 (Parkplatz der Kriegsgräberstätte Oderbrück, höchstgelegener Kalibrierlinienpunkt im Harz) wurde relativgravimetrisch mit dem Absolutpunkt in Torfhaus verbunden. Eine empirisch vorgenommene Genauigkeitsabschätzung einer Absolutbestimmung mit JILAg-3 mithilfe zahlreicher Vergleiche ergab je nach Punktqualität (fester Untergrund wie Felsen oder Betonboden, Temperaturstabilität) Genauigkeiten von 0,05 bis 0,10 μ m/s², im Mittel 0,07 μ m/s².

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) konnte 2013 diese drei Außenpunkte mit dem feldtauglichen Absolutgravimeter A10-033 (Sensorhöhe ca. 70 cm) direkt besetzen. Vom BKG werden die Genauigkeiten der A10-Bestimmungen mit 0,10 µm/s² und besser angegeben. Die Vertikalgradienten wurden 2013 vom IfE mit einem Scintrex-CG3-Gravimeter neu bestimmt (*Abb. 3*). *Tab. 2* zeigt eine Zusammenstellung der Absolutmessungen. Die Übereinstimmung der älteren JILAg-3-Ergebnisse mit den neuen Beobachtungen ist exzellent und liegt deutlich unterhalb der geforderten Maßstabsgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ für die Harz-Kalibrierlinie (vgl. auch *Tab. 1*). Mit dieser Verifizierung mit A10-Messungen hat sich die Zuverlässigkeit bzgl. des absolut bestimmten Maßstabs für die neue Lösung des Upgrade 2017 erhöht. Die arithmetischen Mittel aus JILAg-3- und A10-033-Stationsbestimmungen werden im Upgrade 2017 verwendet.

4 VERTIKALE SCHWEREGRADIENTEN IN DER KALIBRIERLINIE HANNOVER

Abb. 4 zeigt in roter Farbe die Werte für die Schweregradienten der Lösung 2004 und in blauer Farbe die Werte der Neuauswertung (Upgrade 2017) für die Punkte im Hochhaus der Leibniz Universität Hannover (Mehrzweckgebäude, Appelstr. 9 a). Benachbarte Punkte sind jeweils ein Stockwerk voneinander getrennt und liegen entlang einer Lotlinie, die durch die Nordwestecke des Treppenhauses beschrieben wird (jeweils 20 cm Abstand zu den beiden Wänden, vgl. *Abb. 2*). Die Höhen wurden 1977 mithilfe eines geometrischen Nivellements und Lotungsmessungen im Treppenhaus (Stahlbandmaß) durch die niedersächsische Landesvermesssung bestimmt. Aus den Doppelmessungen ergab sich ein mittlerer Fehler von 1,8 mm für die einzelnen Stockwerkspunkte. Das Fahrstuhlsystem verbindet alle Ebenen bis einschließlich 17. Stock (Punkt 370). Um den Punkt 395 (20. Stock) zu erreichen, muss das Treppenhaus



Abb. 3 I Neubestimmung der Referenzpunkte der Harz-Kalibrierlinie in 2013 mit Absolutmessungen durch das BKG und unterstützenden Messungen zum Vertikalgradienten durch das IfE

Messpunkt	δ g /δ h	g(IfE, JILAg-3)		<i>g</i> (BKG, A10-033)		Δg	Mittelwert
Bad Harzburg 481	2,951 (µm/s²)/m	04/86 05/87	9811652,857 μm/s ²	13.06.2013 09.09.2013	9811652,875 μm/s ²	-0.018 µm/s ²	9811652.866 μm/s ²
Torfhaus 563	3,144 (µm/s²)/m	05/87	9810800,472 μm/s ²	13.06.2013 17.06.2013	9810800,425 μm/s ²	+0.047 µm/s ²	9810800.448 μm/s ²
Kriegsgräber 571	3,178 (μm/s²)/m		9810721,051 μm/s ²	12.06.2013 17.06.2013	9810721,070 μm/s ²	-0.019 µm/s ²	9810721.060 μm/s ²

Tab. 2 | Absolutmessungen im Harz 1986 und 1987 vom IfE mit dem JILAg-3-Gravimeter (exzentrisch in nahe gelegenen Gebäuden zu 481 und 563, mittels Relativgravimetrie an die drei Kalibrierpunkte angeschlossen); Messungen 2013 vom BKG direkt auf den drei Kalibrierlinienpunkten mit dem A10-033. Die vertikalen Schweregradienten wurden 2013 durch das IfE neu bestimmt (Standardabweichung 0,02 (μm/s²)/m).



Abb. 4 I Vertikale Schweregradienten der Vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover (VGKH), verwendet für die Lösung 2004 und für das Upgrade 2017

benutzt werden. Um einen möglichst schnellen Messfortschritt bei einem möglichst großen Schwereunterschied zu erzielen, bietet sich als komfortable Verbindung 210–370 (im 1. und 17. Stock) an, die auch als Basis genutzt wird, um den Maßstab von der Harz-Kalibrierlinie hierher zu übertragen.

Die ursprünglich verwendeten Gradienten entsprachen den Genauigkeitsvorstellungen der damaligen Zeit und wurden nicht relativgravimetrisch, sondern durch theoretische Überlegungen bestimmt. Mit der heute vorhandenen modernen Messtechnik zeigen sich große Diskre-

panzen in den beiden Kellergeschossen und besonders für die Teilsysteme mit Unterteilungen von 2 µm/s² und 0,2 µm/s² (nicht in *Abb. 4* dargestellt). Für die Neuauswertung Upgrade 2017 wurden jeweils drei Schwerewerte von drei aufeinanderfolgenden Stockwerkspunkten herangezogen, um daraus den Gradienten für den mittleren Punkt zu ermitteln:

$$\left(\delta g/\delta h\right)_{i} = \left[\left(g_{k} - g_{j}\right)/\Delta h_{kj} + \left(g_{j} - g_{i}\right)/\Delta h_{ji}\right]/2,$$

(mit *i*, *j*, *k*: Punktnummern). Diese Gradienten wurden dann für den nächsten Ausgleichungsprozess a priori eingesetzt. Da alle Punkte unterhalb des 1. Stocks nicht mehr als Kalibrierlinienpunkte berücksichtigt werden, war bzgl. des Gradientenproblems keine weitere Iteration notwendig. In *Abb. 4* ist der sehr gleichmäßige Gradientenverlauf mit der Höhe zu sehen. Ab dem 17. Stockwerk ist eine größere Änderung festzustellen. Oberhalb des 17. Stocks beginnt der schmalere Gebäudeteil, wie in *Abb. 2* eingezeichnet, was den obigen Gradientenverlauf qualitativ erklärt. Gradienten sind besonders durch die Massen der lokalen Umgebung beeinflusst. Die Ungenauigkeit der neu bestimmten Gradienten wird hier mit maximal 0,02 (μ m/s²)/m abgeschätzt.

Um auch messmethodisch möglichst keine Auswirkungen der Gradientenfehler auf die Referenzschwerewerte der Kalibrierlinie zuzulassen, wird die VGKH für alle Punkte in der Höhe 25,0 cm über Bodenmarke definiert. Bei den Scintrex-Instrumenten CG3 und CG5 befindet sich die Sensorhöhe in etwa bei 25 cm und für die ZLS-Burris-Gravimeter ist die Höhe etwa bei 20 cm (mit Messplatte).

5 INSTRUMENTELLER LUFTDRUCKEFFEKT

Ein instrumentell bedingter Messfehler kann bei einem Relativgravimeter vorliegen, wenn das Sensorgehäuse nicht gegen die Umgebungsatmosphäre abgedichtet ist. Das kann z. B. bei aufgrund des Alters spröde gewordenen Dichtungen der Fall sein. Die sich ändernde Luftdichte innerhalb des Sensorgehäuses verändert die Auftriebsbedingungen für das Masse-Hebelsystem. Bei zunehmendem Luftdruck wird die Masse durch die zugenommene Auftriebskraft nach oben getrieben, was dann als zusätzliche Kraft der Schwerkraft entgegen wirkt. Dieser Effekt wirkt systematisch mit der Höhe der Messpunkte, da die Atmosphäre mit der Höhe in ihre Dichte systematisch abnimmt. Soll ein Gravimeter auf der Harz-Kalibrierlinie möglichst genau kalibriert werden, so muss der Sensor luftdicht abgeschlossen sein. Neben dem Effekt der sich ändernden Auftriebskraft ist ein zweiter Effekt denkbar. Das Sensorgehäuse kann zwar sehr gut gegen Luftaustausch versiegelt sein, aber eine Luftdruckänderung bewirkt eine Deformation der Sensorbox oder eine differenzielle Lageveränderung des Sensors relativ zu den Libellen. Denkbar ist, dass bei einem Experiment zur Bestimmung des instrumentellen Luftdruckeffekts in einer Druckkammer das Sensorgehäuse deformiert wird und nach Druckausgleich nicht wieder in den alten Zustand gelangt. Deshalb ist bei dieser Art von instrumentellen Untersuchungen Vorsicht geboten. Grundsätzlich sollte immer nur mit Druckunterschieden experimentiert werden, die den realen Einsatzbedingungen der Gravimeter entsprechen. Der Luftdruckunterschied zwischen Hannover und Oberharz ist etwa 100 hPa, was am IfE als Richtgröße für Untersuchungen in der Druckkammer gilt.

Abb. 5 zeigt die aus Aluminiumplatten gefertigte Kammer des IfE mit einem Scintrex-CG3-Gravimeter und einem Barometer. Die 1 cm starke, aus Plexiglas gefertigte Deckplatte wird mit 28 Schrauben auf die Gummidichtung der Kammer gedrückt. Mit einer einfachen Pumpe wird der Kammer Luft entzogen, wobei die Arbeitsleistung der Pumpe über Verstellen der Spannung am Netzteil manuell geregelt wird. So kann die Geschwindigkeit des Abpumpens und des Luftrückflusses kontrolliert werden. Die Druckkammer besitzt drei höhenverstellbare Fußschrauben, um bei einer Deformation der Kammer die Horizontierung des Gravimeters wieder herstellen zu können. /Schilling & Gitlein 2015/ berichten von einer linearen Korrelation zwischen Luftdruckänderung der Umgebung und der abgelesenen Schwereänderung am ZLS Burris B-64. Bei einer Variation von 70 hPa änderte sich die Ablesung um ca. 10 nm/s², was einen Koeffizienten von 0,14 (nm/s²)/hPa für das ein Jahr alte Gerät ergab. Folgeuntersuchungen zwei Jahre später bestätigten diesen Koeffizienten. Wegen der kleinen Größe werden Messungen mit dem ZLS Burris B-64 nicht korrigiert, was aber grundsätzlich möglich ist.

In Abb. 6 sind die Barometer- und Gravimeterablesungen von zwei Scintrex-Instrumenten dargestellt. Während das Gravimeter CG5 des LIAG (Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik) keine erkennbaren Änderungen erkennen lässt, zeigt das ältere CG3-Instrument (Baujahr 1993) doch deutliche Variationen. Beim langsamen Abpumpen erhöht sich die Schwereablesung und eine negative Drift setzt ein. Durch das Lufteinlassen wird ein niedrigerer Schwerewert abgelesen und es ist keine einsetzende Drift festzustellen. Zur vereinfachten Modellierung unter Vernachlässigung des Driftverhaltens lässt sich ein linearer Korrelationskoeffizient von ca. 2 (nm/s²)/hPa abgreifen. Ein instrumenteller Effekt dieser Größenordnung ist bei vielen Anwendungsprojekten der Gravimetrie noch akzeptierbar, sollte aber kritisch betrachtet werden. Tab. 3 verdeutlicht die Auswirkung solch eines instrumentellen Luftdruckeffekts, welcher bzgl. einer Kalibrierung auf den Linien des Hannover-Systems das Genauigkeitsziel von 1.10-4 verhindern kann. Sollen zeitliche Variationen der Schwere bestimmt werden, kann eine nicht mehr vorhandene Luftdruckversiegelung fälschlicherweise eine signifikante Schwereänderung anzeigen. Eine regelmäßige Überprüfung der Gravimeter auf einen instrumentellen Luftdruckeffekt ist somit dringendst empfohlen.

Neben diesem instrumentellen Fehlereinfluss, der möglichst nicht vorhanden sein sollte, tritt immer ein atmosphärischer Luftdruckeffekt auf, da die sich kontinuierlich umwälzenden Luftmassen eine signifikante Schwerewirkung haben. In der Feldgravimetrie wird der atmosphärische Luftdruckeffekt mithilfe von Barometerablesungen an den Messpunkten erfasst und vor einer Netzausgleichung reduziert.



Abb. 5 | Überprüfung eines Gravimeters hinsichtlich eines instrumentellen Luftdruckeffekts in einer Luftdruckkammer, in der ein Unterdruck erzeugt wird. Das Gravimeter und das Barometer registrieren kontinuierlich.



Abb. 6 | Barometer- und Gravimeterregistrierungen in der Luftdruckkammer zur Untersuchung eines instrumentellen Luftdruckeffekts bei zwei Scintrex-Gravimetern (CG3 oben und CG5 unten): rot die Änderungen des Luftdrucks in der Kammer, blau die Schwereablesungen (ungeglättete Minutenwerte)

Messgebiet	ΔH -Bereich NN	Δg -Bereich	Δp -Bereich	δ <i>g</i> -Fehler	δ <i>E</i> -Fehler
VGKH	60 – 114 m	192 µm/s ²	6,5 hPa	0,013 µm/s ²	$0,7 \cdot 10^{-4}$
Harz-Kalibrierlinie	277 – 825 m	931 µm/s²	63 hPa	0,126 µm/s ²	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Bad Frankenhausen	130 – 160 m	52 µm/s ²	3,5 hPa	0,007 µm/s ²	1,3.10-4
Zugspitze	735 – 2941 m	5221 µm/s ²	222 hPa	0,444 µm/s ²	$0,9 \cdot 10^{-4}$

Tab. 3 | Auswirkung eines instrumentellen Luftdruckeffekts von 2 nm/s²/hPa auf eine Schwereverbindungsmessung (Δg -Bereich). Die Punktverbindung wird um den δg -Fehler verfälscht erhalten, was sich bei Kalibriermessungen auf den zu bestimmenden Maßstabsfaktor *E* des Gravimeters als Kalibrierfehler δE auswirkt. Abhängig vom Luftdruckunterschied in dem jeweiligen Messgebiet (Δp -Bereich, hier Normalatmosphäre angenommen) wird ein um ca. $1 \cdot 10^{-4}$ verfälschter Kalibrierfaktor bestimmt.

6 INSTRUMENTELL BEDINGTE INSTABILITÄTEN DES GRAVIMETERMASSSTABS

Die integrierten elektronischen Mess- und Regelsysteme, auch Feedback-Systeme genannt, werden nicht eine perfekte Stabilität aufweisen, was z.B. durch wiederholtes Messen in der VGKH sichtbar wird. Für die beiden "state-of-the-art"-Gravimeter des IfE zeigt Abb. 7 alle Kalibrierergebnisse, die mithilfe der beiden Referenzpunkte 370 (17. Stock) und 210 (1. Stock) aus konsistenten Auswertungen erhalten wurden. Die einzelnen Kalibrierfaktoren für das Scintrex CG3-04492 wurden mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von 0,7 · 10⁻⁴ und für das ZLS-Burris-Gravimeter B-64 mit 0,3 · 10⁻⁴ erhalten. Die Einzelergebnisse beider Gravimeter streuen allerdings mit sich ähnelnden Standardabweichungen um den jeweiligen Mittelwert ($s_{CG3-04492} = 2.5 \cdot 10^{-4}$, $S_{\text{ZLS B-64}} = 2,8 \cdot 10^{-4}$). Die maximalen und minimalen Werte eines jeden Instruments unterscheiden sich um 1.10-3, was für den Schwereunterschied der Kalibrierbasis 210-370 eine Schwereänderung von 160 nm/s² entspricht. Solch ein großer Wert kann nicht durch eine zeitliche Veränderung der Referenzkalibrierwerte in dem Hochhaus erklärt werden. Ein jahreszeitliches Verhalten aufgrund von Temperaturänderungen der tragenden Stahlbetonpfeiler des Gebäudes (innenliegend) lässt sich in Abb. 7 nicht erkennen. Bisher wurde eine saisonbedingte Höhenausdehnung des Hochhauses allerdings nicht messtechnisch untersucht.

Eine zeitnahe Kalibrierung eines Gravimeters, im Idealfall kurz vor und nach einem Messprojekt, bleibt empfehlenswert, wenn höchstmögliche Genauigkeiten gefordert sind. Der gleichzeitige Einsatz von zwei Gravimetern mit ähnlichem Genauigkeitspotenzial wird dann zusätzlich die Zuverlässigkeit des Gesamtergebnisses erhöhen, da damit eine sonst nicht offenkundige Änderung der Skalierung eines Gravimeters aufgedeckt werden kann. Eine grundsätzliche Vorgehensweise ist, dass die beiden Kalibrierungen eines Instruments, die kurz vor und kurz nach einer Messkampagne



Abb. 7 | Kalibrierfaktoren für die Gravimeter Scintrex CG3-04492 und ZLS Burris B-64. Die Kalibrierungen wurden alle in der Vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover mit identischen Referenzschwerewerten der Kalibrierpunkte durchgeführt.

vorgenommen wurden, gemittelt werden, um dann den mittleren Kalibrierfaktor in der Auswertung der Kampagne zu nutzen.

7 AUSGLEICHUNG UND ERGEBNISSE DES UPGRADE 2017

Der Ausgleichungsvorgang lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ∆g-Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen (Gauß-Markov-Modell) in einem gemeinsamen Ausgleichungsprozess;
- IfE-eigenes Auswerteprogramm GNLSA (Gravimetry Net Least Squares Adjustment; siehe /Wenzel 1985/);
- drei Absolutbeobachtungen mit jeweils Standardabweichung 50 nm/s² auf der Harz-Kalibrierlinie ("weiche Lagerung", dient der Maßstabsdefinition);
- eine Absolutbeobachtung (virtuell) in der Hochhaus-Kalibrierlinie (unterster Punkt) mit Standardabweichung 1 nm/s², da nur der Maßstab für Kalibrierung von Relativgravimetern entscheidend ist;
- sieben Relativgravimeter mit zeitnahen Messungen im Harz und im VGKH zur Ma
 ßstabs
 übertragung;
- acht Gravimeter nur im VGKH zur Punktverdichtung (mit Varianzkomponentenschätzung);
- gesteuerte Gewichtung der sieben Gravimeter mit zeitnahen Harz/ VGKH-Messungen (keine Varianzkomponentenschätzung), um Dominanz eines Gravimeters zu vermeiden.

Bei den sieben Gravimetern zur Maßstabsübertragung vom Harz nach Hannover handelt es sich tatsächlich in vier Fällen um das Scintrex CG3-04492, welches 2002, 2005, 2008 und 2017 verstärkt im Kalibriersystem eingesetzt und für jede Epoche als eigenes Gravimeter behandelt wurde. Für die Kalibrierung des ZLS Burris B-64 in der Harz-Kalibrierlinie ($\Delta g_{max} = 931 \ \mu m/s^2$) wurden zwei temporäre Zwischenpunkte eingefügt, da mit dem elektronischen Feedbacksystem immer nur maximale Schwereunterschiede von ca. 500 $\mu m/s^2$ gemessen werden können.

Aufgrund seiner hohen Messpräzision und der vielen Messungen mit dem ZLS Burris B-64 ergab eine erste Varianzkomponentenschätzung eine große Dominanz dieses Instruments auf die Ausgleichungsergebnisse. Da instrumentell bedingte zeitliche Instabilitäten des Gravimetermaßstabs (Kap. 6) nicht auszuschließen sind, sollte diese Dominanz vermieden werden. Deshalb wurden drei Gravimetergruppen aus den sieben Teilhabenden gebildet: das ZLS Burris B-64 als eine Gruppe, die vier Scintrex CG-04992 (mit zusätzlichem Kürzel d, f, g, h versehen) als zweite Gruppe und die zwei Scintrex CG5-10008 und CG5-50211 als dritte Gruppe. Damit jede Gruppe etwa 33 % Einfluss auf die Maßstabsübertragung erhält, wurde nach einer anfänglichen Varianzkomponentenschätzung die A-priori-Standardabweichungen der einzelnen Gravimeter in der jeweiligen Gruppe gleichmäßig angepasst. Der Einfluss eines Instruments ergibt sich aufgrund der Gewichtung (Quadrat der vorgegebenen Standardabweichung) und der Anzahl seiner Messungen.

Tab. 4 zeigt die wichtigsten Parameter, die sich auf die Gravimeter beziehen, und *Tab.* 5 die punktbezogenen Informationen. Sowohl in der Harz-Kalibrierlinie als auch in der VGKH wird die Standardabweichung eines Kalibrierfaktors in

Gravimeter	Epoche	Kalibrierlinie	$s(\Delta g, a.post.)$	n	Kalibrierfak- tor <i>E</i>	s(E)
ZLS B-64	06.2014 06.2014	Harz VGKH	39 nm/s ² 19 nm/s ²	40 174	0,998798	0,68·10 ⁻⁴
ZLS B-64a	11.2012	VGKH	19 nm/s ²	28	0,999157	0,72·10 ⁻⁴
ZLS B-25	03.2007	VGKH	54 nm/s ²	43	0,999815	$0,98 \cdot 10^{-4}$
ZLS B-114	06.2017	VGKH	25 nm/s ²	17	1,001623	0,81 · 10 ⁻⁴
ZLS B-91	05.2016	VGKH	49 nm/s ²	40	0,999445	0,89·10 ⁻⁴
CG3-04492d	11.2002 0608.2002	Harz VGKH	65 nm/s ² 49 nm/s ²	33 162	1,001044	0,70.10-4
CG3-04492e	04.2004	Harz	71 nm/s ²	14	1,000861	0,68 · 10 ⁻⁴
CG3-04492f	04.2005 03.2005	Harz VGKH	68 nm/s ² 31 nm/s ²	11 12	1,000817	0,68 · 10 ⁻⁴
CG3-04492g	07.2008 07.2008	Harz VGKH	135 nm/s ² 48 nm/s ²	11 30	1,000773	0,72 · 10 ⁻⁴
CG3-04492h	05.2017 07.2017	Harz VGKH	92 nm/s ² 66 nm/s ²	6 19	1,000654	0,74 · 10 ⁻⁴
CG3-03210	07.2017	VGKH	44 nm/s ²	89	1,000249	0,88·10 ⁻⁴
CG3-04364	0304.2008	VGKH	51 nm/s ²	73	1,001644	1,06.10-4
CG5-10008	04.2005 04.2005	Harz VGKH	35 nm/s ² 54 nm/s ²	11 50	0,999805	0,66 · 10 ⁻⁴
CG5-10008a	03.2005	VGKH	26 nm/s ²	80	1,000007	0,80 · 10 ⁻⁴
CG5-50211	10.2009 12.2009	Harz VGKH	79 nm/s ² 31 nm/s ²	10 31	1,000220	0,68 · 10 ⁻⁴

Tab. 4 | Ergebnisse der Ausgleichung für die Gravimeter. Die Instrumente in Fettdruck (linke Spalte) tragen zur Maßstabsübertragung von der Harz-Kalibrierlinie zur vertikalen Kalibrierlinie in Hannover bei; $s(\Delta g, a.post.)$: Standardabweichung einer Einzelverbindungsmessung aus der Ausgleichung; n: Anzahl der Verbindungsmessungen; s(E): Standardabweichung des ausgeglichenen Kalibrierfaktors.



Abb. 8 I Vergleich der Schwerewerte des Upgrade 2017 mit der Lösung von 2004 für die VGKH. Höhenbezug des Upgrade 2017 ist 25,0 cm über Boden anstatt Bodenmarke wie in 2004. Blau sind die endgültigen Ergebnisse dargestellt (mit gesteuerter Gewichtung zur Maßstabsübertragung), rot die ersten Ergebnisse nach einer Varianzkomponentenschätzung.

der Regel mit besser als $1 \cdot 10^{-4}$ erhalten. Die Messpräzision für eine Einzelmessung ist im Hochhaus gewöhnlich deutlich besser als im Feldeinsatz im Harz. Unter vollständiger Berücksichtigung der Kofaktormatrix der Unbekannten ergeben sich die Standardabweichungen der Schwereverbindungen direkt benachbarter Punkte im VGKH mit 5 nm/s² bis 14 nm/s², wobei die Punktdifferenzen oberhalb 380 die größten Werte aufweisen. Die wichtige häufig benutzte Basisverbindung 210–370 wurde mit einer Standardabweichung von 11 nm/s² erhalten (210–290: 6 nm/s², 290–370: 6 nm/s², 210–395: 16 nm/s²).

In Abb. 8 werden die Ergebnisse des Upgrade 2017 mit der Lösung von 2004 für das VGKH verglichen. In beiden Lösungen wurde für Punkt 210 ein identischer Schwerewert festgehalten, was das Problem des Datumsniveaus in den Ausgleichungen löst und eine punktweise Vergleichbarkeit bzgl. der sich geänderten Maßstabsfestlegung in der Kalibrierlinie ermöglicht. Eine erste Lösung zum Upgrade 2017 mit Gewichtung der Beobachtungen aufgrund der Messpräzision der einzelnen Instrumente (Varianzkomponentenschätzung) ist ebenfalls in Abb. 8 dargestellt. Die beiden Lösungen aus 2017 unterscheiden sich nur gering, was zeigt, dass die verwendeten Messdaten der verschiedenen Gravimeter alle ähnliche Ergebnisse liefern. Erstaunlich ist, dass die wichtigste Basisverbindung der vertikalen Kalibrierlinie 210-370 gegenüber 2004 fast unverändert bleibt. Der Upgrade 2017 liefert eine 5 nm/s² größere Schweredifferenz als die Lösung von 2004. Der Punkt 290, Mitte der Basis 210-370, weicht 53 nm/s² von der Lösung 2004 ab. Die in den 1980er-Jahren am IfE entwickelten Feedbacksysteme für die LCR-Gravimeter sind bzgl. ihrer zeitlichen Stabilität veraltet und

Punkt	Breite	Länge	Höhe NN	Gradient	Schwere g	Sg	n
481	51,8817°	10,5683°	276,643 m	-2951 (nm/s ²)/m	9811652863 nm/s ²	47 nm/s ²	81
563	51,8006°	10,5439°	792,573 m	-3144 (nm/s²)/m	9810800457 nm/s ²	33 nm/s ²	23
571	51,7861°	10,5514°	824,844 m	-3178 (nm/s²)/m	9810721054 nm/s ²	35 nm/s ²	97
210	52,3867°	9,7144°	60,055 m	-2784 (nm/s²)/m	9812612356 nm/s ²	1 nm/s ²	318
220	52,3867°	9,7144°	63,435 m	-2857 (nm/s ²)/m	9812602764 nm/s ²	6 nm/s ²	83
230	52,3867°	9,7144°	66,840 m	-2900 (nm/s²)/m	9812592941 nm/s ²	7 nm/s ²	40
240	52,3867°	9,7144°	70,245 m	-2935 (nm/s²)/m	9812582989 nm/s ²	7 nm/s ²	58
250	52,3867°	9,7144°	73,645 m	-2 959 (nm/s²)/m	9812572954 nm/s ²	8 nm/s ²	43
260	52,3867°	9,7144°	77,030 m	-2972 (nm/s²)/m	9812562915 nm/s ²	9 nm/s ²	40
270	52,3867°	9,7144°	80,445 m	-2985 (nm/s²)/m	9812552747 nm/s ²	7 nm/s ²	65
280	52,3867°	9,7144°	83,820 m	-3003 (nm/s²)/m	9812542625 nm/s ²	9 nm/s ²	50
290	52,3867°	9,7144°	87,230 m	-3020 (nm/s ²)/m	9812532357 nm/s ²	6 nm/s ²	133
300	52,3867°	9,7144°	90,620 m	-3021 (nm/s ²)/m	9812522126 nm/s ²	8 nm/s ²	75
310	52,3867°	9,7144°	94,020 m	-3006 (nm/s²)/m	9812511841 nm/s ²	10 nm/s ²	46
320	52,3867°	9,7144°	97,430 m	-3008 (nm/s ²)/m	9812501628 nm/s ²	11 nm/s ²	44
330	52,3867°	9,7144°	100,815 m	-3024 (nm/s ²)/m	9812491397 nm/s ²	10 nm/s ²	59
340	52,3867°	9,7144°	104,220 m	-3013 (nm/s ²)/m	9812481150 nm/s ²	12 nm/s ²	47
350	52,3867°	9,7144°	107,620 m	-3007 (nm/s²)/m	9812470909 nm/s ²	11 nm/s ²	51
360	52,3867°	9,7144°	111,025 m	-2996 (nm/s²)/m	9812460636 nm/s ²	12 nm/s ²	55
370	52,3867°	9,7144°	114,405 m	-2952 (nm/s ²)/m	9812450631 nm/s ²	11 nm/s ²	324
380	52,3867°	9,7144°	117,865 m	-2981 (nm/s ²)/m	9812440466 nm/s ²	15 nm/s ²	24
390	52,3867°	9,7144°	120,755 m	-3032 (nm/s ²)/m	9812431760 nm/s ²	16 nm/s ²	14
395	52,3867°	9,7144°	124,515 m	-3030 (nm/s ²)/m	9812420300 nm/s ²	16 nm/s ²	55

Tab. 5 | Ergebnisse der Ausgleichung für die Schwerereferenzpunkte der Kalibrierlinien (Upgrade 2017). Harz-Kalibrierlinie mit Absolutmessungen: Bad Harzburg (481), Torfhaus (563), Kriegsgräber (571); VGKH: 1. Etage (210) . . . 20. Etage (395); sg. Standardabweichung des ausgeglichenen Schwerewerts, n: Anzahl der Verbindungsmessungen zu diesem Punkt; Bezugshöhe der Schwerewerte der VGKH ist 25.0 cm über Bodenmarke (sonst Bodenmarke).

zeigten immer einen starken nichtlinearen Anteil in ihrer Kalibrierung. Eine Abweichung zur neuen Lösung um 50 nm/s² oder auch mehr ist nicht unerwartet.

8 RESÜMEE

Die folgende Auflistung fasst die Inhalte dieses Beitrags kurz zusammen und enthält zwei ausblickende Aussagen:

- Die Maßstabsübertragung von der Harz-Kalibrierlinie mit absolut bestimmten Schwerepunkten zur Vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie Hannover (VGKH) ist gelungen. Dies wird durch die sehr gute Übereinstimmung der zum Transfer beigetragenen Gravimeter und deren Standardabweichungen belegt.
- Für den gesamten Schwerebereich des VGKH (192 μm/s², 20 Punkte mit Abstand 10 μm/s²) ergab die Ausgleichung eine Standardabweichung von 16 nm/s², für die wichtige Basisverbindung 210 – 370 (1.–17. Stock, Fahrstuhlverbindung) 11 nm/s². Die Ungenauigkeit direkt benachbarter Punkte variiert zwischen 5 und 10 nm/s² für die Punkte unterhalb des 18. Stocks.

- Die Maßstabsungenauigkeit der Harz-Kalibrierlinie und der VGKH beträgt 1 · 10⁻⁴ (Abschätzung durch Erstautor). Entsprechend den Vorgaben in /JCGM 2008/ wird diese Abschätzung mit 2 multipliziert, sodass eine absolute Genauigkeit von 2 · 10⁻⁴ angenommen wird ("expanded uncertainty", Konfidenzintervall 95 %).
- Zwei Kalibrierlinien (drinnen/draußen) mit identischen Maßstäben stehen zur Verfügung, um Gravimeter unter nahezu Laborbedingungen mit ausschließlichem Handtransport oder unter Feldbedingungen mit Fahrzeugtransport zu überprüfen.
- Die Überwachung der Gravimeter bzgl. Maßstabsinstabilität und instrumentellem Luftdruckeinfluss wird dringendst empfohlen.
- Wiederkehrende Kalibriermessungen im Harz und zeitnah in Hannover sind sehr wünschenswert, um die Qualität der Kalibrierlinien zu kontrollieren und zu erhalten.
- Zukünftig werden hoffentlich Absolutmessungen im VGKH (Hochhaus oben/unten) möglich sein. Die neue atominterferometrische Messtechnik mit Quanten sollte das ermöglichen (/Schilling et al. 2012/).

DANKSAGUNG

Großer Dank gilt all den Institutionen und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die das Gravimeter-Kalibriersystem Hannover nutzen und mit Messungen unterstützen. Olivier Francis vom European Centre of Geodynamics and Seismology (ECGS) stellte 2005 dem IfE das Gravimeter Scintrex CG5-10008 für mehrere Monate zur Verfügung. 2007 führte Gerhard Jentzsch (Gravity-Consult GmbH) umfangreiche Messungen mit dem ZLS Burris B-25 im VGKH durch. Seit einigen Jahren nutzt die Firma Bo-Ra-tec GmbH Weimar die vertikale Kalibrierlinie zur Kalibrierung ihres ZLS-Burris-Gravimeters. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) unterstützen das IfE seit vielen Jahren, was in verschiedenen Projekten und auch in der Autorenliste dieses Beitrags sichtbar wird.

LITERATUR

Cieslack, M. (2017): Erste Erfahrungen mit dem weltweit ersten Relativgravimeter des Typs Scintrex CG-6. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 124(2017)8-9, 264–271.

Falk, R. (1995): Erste Erfahrungen mit dem automatisierten Gravimeter SCINTREX CG-3M Autograv. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 120(1995)1, 26–34.

Gabriel, G.; Lindenthal, N.; Schön, S.; Sörgel, U.; Timmen, L. (2015): Geometrische und gravimetrische Überwachung des GeneSys-Frac-Experiments. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 122(2015)5, 207–218.

JCGM (2008): Evaluation of measurement data – Guide to expressions of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, corrected version 2010. Copyright shared by BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML. 134 S.

Jentzsch, G.; Schulz, R.; Weise, A. (2015): Ein bekanntes Prinzip in einem neuen Gravimeter: Das automatisierte Burris-Gravimeter. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 122(2015)5, 168–175.

Kanngieser, E.; Kummer, K.; Torge, W.; Wenzel, H.-G. (1983): Das Gravimeter Eichsystem Hannover. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 120. 95 S.

Kersten, T.; Kobe, M.; Gabriel, G.; Schön, S.; Timmen, L; Vogel, D. (2017): Integrated Geodetic Monitoring of Subsidence Processes by Levelling, Gravimetry and GNSS – Preliminary Report. In: Journal of Applied Geodesy 11(2017)1, 21–29.

Schilling, M.; Gitlein, O. (2015): Schweremessungen mit dem Micro-g La-Coste gPhone-98 und dem ZLS Burris Gravity Meter B-64. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 122(2015)5, 176–183.

Schilling, M.; Müller, J.; Timmen, L. (2012): Einsatz der Atominterferometrie in der Geodäsie. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 137(2012)3, 185–194.

Schilling, M.; Timmen, L. (2016): Traceability of the Hannover FG5X-220 to the SI Units. In: Freymueller, J. T., Sánchez, L. (Hrsg.): International Association of Geodesy Symposia, 147, 69–75. DOI: 10.1007/1345_2016_226.

Timmen, L. (1996): Absolutgravimetrie – Aufgaben und Anwendungen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 121(1996), 286–295.

Timmen, L. (2010): Absolute and Relative Gravimetry. In: Guochang Xu (Hrsg.): Sciences of Geodesy-I. Advances and Future Directions. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–48. DOI: 10.1007/978-3-642-11741-1_1.

Timmen, L.; Engfeldt, A.; Scherneck, H.-G. (2015): Observed secular gravity trend at Onsala station with the FG5 gravimeter from Hannover. In: Journal of Geodetic Science (2015)5, 18–25. DOI: 10.1515/jogs-2015-0001.

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 (Brazilian Journal of Cartography) 56(2004)02, 89–95.

Torge, W. (2003): Geodäsie. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin/New York.

Wenzel, H. G. (1985): Schwerenetze (mit Kapitel "Das Programmsystem GNLSA zur Ausgleichung von Schwerenetzen"). In: Pelzer, H. (Hrsg.): Kontaktstudium 1985. Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 13). Wittwer, Stuttgart, 457–86.

Dr.-Ing. Ludger Timmen LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

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

Dr.-Ing. Reinhard Falk BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG)



Richard-Strauss-Allee 11 | 60598 Frankfurt a.M. reinhard.falk@bkg.bund.de

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE

Dr. rer. nat. Gerald Gabriel



Stilleweg 2 | 30655 Hannover gerald.gabriel@liag-hannover.de

GEOPHYSIK (LIAG)

Dipl.-Ing. Alexander Lothhammer BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG)



Richard-Strauss-Allee 11 | 60598 Frankfurt a. M. alexander.lothhammer@bkg.bund.de

M. Sc. Manuel Schilling LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)



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

Dipl.-Ing. Detlef Vogel LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOPHYSIK (LIAG)

Stilleweg 2 | 30655 Hannover detlef.vogel@liag-hannover.de

Manuskript eingereicht: 12.01.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

