

**Feldanweisung
für
terrestrische Gravimetrie
(FA-TG)**

**Terrestrische gravimetrische Messungen
im Deutschen Hauptschwerenetz 2016 (DHSN2016)**

Version 1.0 – Stand 19.02.2019

(Redaktionsstand: 24.05.2019)



Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Anlagenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	4
Literaturverzeichnis	5
Teil A Grundsätze für die Realisierung des DHSN2016.....	7
A.1. Allgemeines.....	7
A.2. Zum Fehlerbudget der Schwerewerte von Schwerfestpunkten	7
A.3. Standortauswahl für SFP 1.O.	8
A.4. Vermarkung von SFP 1.O.	9
Teil B Absolutschweremessungen mit Absolutgravimeter A10.....	11
B.1. Gerätebeschreibung Absolutgravimeter A10	11
B.2. Messverfahren, Geräteprüfungen, Korrekturwerte und Genauigkeiten	12
B.3. Messungsdurchführung und Auswertung.....	14
B.4. Dokumentation der Ergebnisse	15
Teil C Relativschweremessungen	16
C.1. Relativgravimeter.....	16
C.1.1. Funktionsweisen	16
C.1.2. Gerätwartung	17
C.1.2.1 Besonderheiten von SCINTREX-Gravimetern	18
C.1.2.2 Besonderheiten von LCR-Gravimetern	18
C.1.3. Gravimetertransport.....	19
C.1.4. Geräteprüfung.....	19
C.1.4.1 Gravimeterdrift	20
C.1.4.2 Maßstabsbestimmung	22
C.1.4.3 Bestimmung der periodischen Spindelfehler bei LCR-Gravimetern.....	23
C.1.5. Zusatzausrüstung	23
C.2. Bestimmung von SFP 1.O. des DHSN2016	24
C.2.1. Messverfahren	24
C.2.2. Messungsdurchführung	25
C.2.3. Messungsdokumentation.....	26
C.2.4. Auswertung.....	27
C.2.4.1 Anforderungen an die Berechnungssoftware	27
C.2.4.2 Vorauswertung und Festlegung des Driftansatzes.....	27
C.2.4.3 Ausgleichung	28
C.2.4.4 Qualitätssicherung	28
C.2.5. Dokumentation der Ergebnisse	28
C.3. Bestimmung des Vertikalen Schweregradienten	30
C.3.1. Messverfahren	30
C.3.2. Messungsdurchführung	31
C.3.3. Auswertung.....	32
C.3.4. Dokumentation der Ergebnisse	32
C.4. Flächenhafte Schweremessungen zur Geoidmodellierung	33
C.4.1. Punktauswahl	33
C.4.1.1 Punktdichte	33
C.4.1.2 Punktlage und Punktverteilung.....	34

C.4.1.3	Einteilung der GCG- Tauglichkeit.....	34
C.4.2.	Punktvermarkung.....	35
C.4.3.	Messverfahren	35
C.4.4.	Messungsdurchführung und Auswertung.....	37
C.4.5.	Dokumentation der Ergebnisse	38
Schlussbemerkung		38

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Fotos geeigneter Vermarkungen für SFP 1.Ordnung (Beispiele)
Anlage 2	Datenabgabe-Protokoll Absolutschweremessung (Beispiel)
Anlage 3	Formulare für Geräteprüfung SCINTREX CG-5 und CG-6 (Beispiele)
Anlage 4	Zusammenstellung der von den Landesvermessungsbehörden, dem BKG, dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover (LIAG) und Universitäten betreuten Gravimeter-Kalibrierbasen (ehemals „Gravimeter-Eichlinien“) in Deutschland mit Darstellung der jeweils abgedeckten Schwerebereiche
Anlage 5	Messungsformular für SCINTREX CG-5 (Beispiel)
Anlage 6	Zusammenstellung möglicher Fehlerquellen und deren Auswirkungen bzw. deren Beseitigung
Anlage 7	Erläuterungen zum Vertikalen Schweregradienten
Anlage 8	Übersicht der horizontalen Schweregradienten in Deutschland
Anlage 9	Formatbeschreibung der Datenabgabe-Datei (Version 2.0 ab 2019) für die Übernahme von neuen Schweredaten in die Schwere-Datenbasis des BKG

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AFIS	Amtliches Festpunktinformationssystem
AVN	Allgemeine Vermessungs-Nachrichten
A10	Feldtaugliches Absolutgravimeter der Firma Micro-g LaCoste Inc.
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CG-3, CG-5, CG-6	Autograv TM - Relativgravimeter der Firma Scintrex Ltd.
CPI	Kapazitiver Positions-Indikator
DGM	Digitales Geländemodell
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DHSN	Deutsches Hauptschwerenetz
EOP	Erdorientierungsparameter
FG5	Absolutgravimeter der Firma Micro-g LaCoste Inc.
Galileo	Programm-System zur Auswertung von Schweremessungen (Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - Geobasis NRW)
GCG	German Combined Geoid, AdV-Quasigeoidmodell
GeoInfoDok	Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens
GGN	Geodätisches Grundnetz
GGP	Geodätischer Grundnetzpunkt
GKB	Gravimeter-Kalibrierbasis (ehem. Gravimereichlinie)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNSS-RTK	GNSS-RTK Echtzeitkinematik, Verfahren zur Koordinatenbestimmung
GRAV	Programm-System zur Ausgleichung von Schwerenetzen (H.-G. Wenzel)
GravAP	Software zur Analyse terrestrischer gravimetrischer Messungen und zur Schwerenetzgleichung (T. Schüler)
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
HFP	Höhenfestpunkt
IERS	International Earth Rotation and Reference System Service
IGRF	International Gravity Reference Frame
IGRS	International Gravity Reference System
IGSN71	International Gravity Standardization Net 1971
IGM	Ingenieurgesellschaft für Geophysikalische Meßtechnik mbH, Überlingen
LCR	LaCoste & Romberg
Rili-RB-AdV	Richtlinie für den einheitlichen integrierten Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland
PDOP	Position Dilution of Precision (Zusammenhang zwischen Fehlern der Empfängerposition und der Satellitenposition)
SAPOS [®]	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SFP	Schwerfestpunkt
SFP 1.O.	Schwerfestpunkt 1. Ordnung
SP	Schwerpunkt (für GCG)
UTC	Universal Time Coordinated (Koordinierte Weltzeit)
VSG	Vertikaler Schweregradient
ZfV	Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement

Literaturverzeichnis

AdV Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006-2011, 3. überarbeitete Fassung vom 01.08.2010 = Feldanweisung Absolutschweremessungen 2006-2011. - 2010.

AdV Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland, Version 3.0, Stand 16.05.2017 = Rili-RB-AdV. - 2017.

Bonatz M. Gravimetrisches Glossar. - 2006.

Budetta G. und Carbone D. Potential application of the Scintrex CG-3M gravimeter for monitoring volcanic activity: results of field trials on Mt. Etna, Sicily [Artikel] // Journal of volcanology and geothermal research . - 1997. - 76.

Cieslack M. Erste Erfahrungen mit dem weltweit ersten Relativgravimeter des Typs SCINTREX CG-6 [Artikel] // AVN. - 2017. - 8/9.

Falk R. [et al.] Precise Gravimetric Surveys with the Field Absolute Gravimeter A-10 [Buchabschnitt] // Geodesy for Planet Earth - Proceedings of the 2009 IAG Symposium Buenos Aires / Buchverf. Kenyon S., Pacino M. und Marti U. . - [s.l.] : Springer, 2012.

Falk R. Erste Erfahrungen mit dem automatischen Gravimeter Scintrex CG-3M Autograv [Artikel] // ZfV 120. - 1995. - S. 26-34.

Gettings Paul , Chapman David S. und Allis Rick Techniques, analysis, and noise in a Salt Lake Valley 4D gravity experiment [Artikel] // Geophysics. - 2008. - Bd. Vol.73 (6). - <https://doi.org/10.1190/1.2996303> .

Kanngieser Erich Genauigkeitssteigerungen in der Relativgravimetrie [Artikel] // ZfV 108. - 1983. - 5. - S. 180-189.

Male Bill E-Mail-Antwort "CG-5 - some questions" an IGM. - 31. 01. 2018.

National Geodetic Survey NGS Ten-Year Strategic Plan - Positioning America for the Future [Bericht]. - 2013. - http://www.ngs.noaa.gov/web/news/Ten_Year_Plan_2013-2023.pdf.

Peters Thomas [et al.] Erfahrungen im Gravimeterkalibriersystem Zugspitze [Artikel] // ZfV 134. - 2009. - 3. - S. 167-176.

Reicheneder K. Über den Einfluß der Höhe des Meßsystems im Gravimeter [Buchabschnitt] // Gerlands Beitr. Geophysik 75, S. 179-183. - 1966.

Reudink R. [et al.] High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters [Artikel] // Journal of Geodesy 88 (6). - [s.l.] : Springer, 2014. - DOI:10.1007/s00190-014-0705-0.

Schlesinger und Cieslack Simultane Messung mit zehn SCINTREX CG-5-Gravimetern im stationären Parallelbetrieb [Artikel] // AVN 125. - 2018. - S. 8-9.

Scintrex Manual CG-5 Revision 8 [Bericht]. - 2012. - S. 241. - https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2017/02/CG-5-Manual-Ver_8.pdf.

Scintrex www.scintrexltd.com [Online]. - What is the integrator voltage?. - 2017. - scintrexltd.com/support/faq/#1493669681610-b124975e-1f8b.

Seigel H.O. A Guide to high precision Land Gravimeter Surveys. - 1995. - S. 33. - <https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2017/02/Guide-High-Precision-Land-Gravimeter-Surveys.pdf>.

Timmen Ludger [et al.] Das Relativgravimeter Eichsystem Hannover für 10⁻⁴ Maßstabsbestimmungen [Artikel] // AVN 125. - 2018. - 5. - S. 140-150.

Timmen Ludger Vortrag auf dem "MicrogLaCoste-Workshop". - 2012. - unveröffentlicht.

Torge W. Geodäsie [Buch]. - [s.l.] : De Gruyter Lehrbuch , 2002.

Vorbemerkungen

Die vorliegende Feldanweisung soll eine einheitliche Vorgehensweise der deutschen Landesvermessungsbehörden bei der Realisierung des Deutschen Hauptschwerenetzes 2016 (DHSN2016) als Bestandteil des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges in der Bundesrepublik Deutschland gewährleisten.

Sie dient sowohl als Grundlage für die Überführung geeigneter Schwerefestpunkte 1. Ordnung (SFP 1.O.) des DHSN96 in das DHSN2016, als auch für die partiell notwendige Schaffung neuer SFP 1.O. mittels aktueller Messtechnologien und Messverfahren unter Berücksichtigung gültiger Genauigkeitsstandards entsprechend der Richtlinie für den einheitlichen integrierten Raumbezug (AdV, 2017).

Des Weiteren bildet diese Feldanweisung die Grundlage für die Erfassung aktueller Schweredaten zur Modellierung des AdV-Quasigeoids nach einheitlichen Qualitätsstandards über das Gebiet der gesamten Bundesrepublik Deutschland.

Die bisherige „Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006-2011, 3. überarbeitete Fassung vom 01.08.2010“ (AdV, 2010) wurde aktualisiert und als Teil B in die vorliegende Feldanweisung integriert.

Die Ausführungen zu Gravimetern in dieser Feldanweisung beziehen sich ausschließlich auf Geräte, die aktuell von den Landesvermessungsbehörden und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) eingesetzt werden. Nähere Informationen zu den unterschiedlichen Typen von Gravimetern und deren Besonderheiten sind den entsprechenden Handbüchern zu entnehmen.

Festlegungen zur Anlage und Bestimmung nachgeordneter SFP-Felder (2. bis 4. Ordnung) sind nicht Bestandteil dieser Feldanweisung. Diese SFP sind entsprechend länderspezifischer Vorschriften zu behandeln.

Die Maßeinheit der Schwerebeschleunigung im Internationalen Einheitensystem ist m/s^2 . Die Staatsfläche der Bundesrepublik Deutschland wird von einem Schwerebereich von 9,801 bis 9,815 m/s^2 überdeckt. Die Genauigkeiten der Messverfahren und der eingesetzten Instrumente liegt in der Größenordnung von 0,02 bis 0,1 $\mu\text{m/s}^2$. Aus historischen Gründen findet in der Gravimetrie auch noch die Maßeinheit 1 Gal = 0,01 m/s^2 Anwendung, da sich mit ihr in der gravimetrischen Praxis die Genauigkeiten der Verfahren und Geräte besser beschreiben lassen ($0,1 \mu\text{m/s}^2 = 10 \mu\text{Gal}$).

Teil A Grundsätze für die Realisierung des DHSN2016

A.1. Allgemeines

Die Realisierung und die Sicherung des bundesweit einheitlichen Schwerebezugssystems erfolgt gemäß Rili-RB-AdV (AdV, 2017) Abschnitt 4.1 durch die Schwerefestpunkte 1. Ordnung (SFP 1.O.). Sie stellen als DHSN2016 den aktuellen amtlichen Schwerebezugsrahmen dar. Das DHSN2016 besteht aus ausgewählten SFP 1.O. des früheren DHSN96, aus ausgewählten GGP sowie neu festgelegten SFP 1.O., die die Anforderungen bzgl. Standortauswahl und Punktvermarkung gemäß Rili-RB-AdV (AdV, 2017) Abschnitt 4.3 erfüllen. Ergänzende Hinweise dazu werden in den Abschnitten A 3 und A 4 dieser Feldanweisung gegeben.

Aufgrund des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts in der Bestimmung des absoluten Schwerewertes und der metrologischen Herangehensweise bei der Betrachtung seines Genauigkeitsmaßes, sowie möglicher Schwereänderungen seit der Realisierung des DHSN96, kann das DHSN96 nicht pauschal dem DHSN2016 gleichgesetzt werden.

Auch wurde im DHSN96 der lokale vertikale Schweregradient (VSG) der SFP 1.O. nicht berücksichtigt. Dessen Kenntnis ist jedoch von entscheidender Bedeutung für die Reduktion des in Sensorhöhe gemessenen Schwerewertes auf den Schwerebezugspunkt bei Messungen mit verschiedenen Typen von Gravimetern, und deren bauartbedingt unterschiedlichen Sensorhöhen.

Im DHSN96 konnten die Fehler der durch Relativmessungen bestimmten Schwerewerte nur in Bezug zu den verwendeten Schwerewerten der Anschlusspunkte angegeben werden. Diese wurden in der Regel in den Netzausgleichungen als fehlerfreie Anschlusswerte betrachtet.

Durch die Entwicklung der feldtauglichen Absolutgravimetrie können heutzutage anschlussunabhängige Schweremessungen durchgeführt werden. Damit wird eine realistischere Genauigkeitsabschätzung für SFP 1.O. des DHSN2016 möglich.

Muss ein SFP 1.O. des DHSN96 aufgrund länderspezifischer Besonderheiten ohne Überprüfung und/oder ohne Bestimmung des lokalen VSG in das DHSN2016 übernommen werden, so wird empfohlen, dem Schwerewert im DHSN2016 ein Genauigkeitswert von $\geq 20 \mu\text{Gal}$ zuweisen, da die tatsächliche Genauigkeit, aufgrund des unbekanntenen lokalen VSG und der im DHSN96 mittels Normalgradient erfolgten Reduktion auf den Schwerebezugspunkt, nicht bekannt ist. Diese Vorgehensweise ist nur in begründeten Ausnahmefällen anzuwenden.

Nur unter der Berücksichtigung der vorgenannten Gründe können die in der Rili-RB-AdV (AdV, 2017) geforderten Genauigkeiten sowohl realistisch ermittelt, als auch eingehalten und damit eine bundesweite einheitliche Qualität des DHSN2016 gewährleistet werden.

A.2. Zum Fehlerbudget der Schwerewerte von Schwerefestpunkten

Durch die Entwicklung der Absolutgravimetrie und des in Vorbereitung befindlichen „Internationalen Schwerereferenzsystems (IGRS)“, das das IGSN71 ablösen wird, ist es heutzutage möglich, realistischere Genauigkeitsmaße für den Schwerewert eines Festpunktes abzuleiten.

Mit Hilfe internationaler Vergleiche von Absolutgravimetern, absolutgravimetrischen Messungen auf gravimetrischen Referenzstationen und einer sorgfältigen metrologischen Fehlerana-

lyse der systematischen und zufälligen Fehler bei Absolutschweremessungen werden gegenwärtig absolute Schweremessungen in Gebäuden mit einer Genauigkeit von besser als $\pm 5 \mu\text{Gal}$ (FG5 Messungen) bzw. im Gelände von $\pm 10 \mu\text{Gal}$ (A10 Messungen) ausgeführt.

Der Fehler des Schwerewertes eines Schwerfestpunktes setzt sich letztlich aus dem Fehler der absoluten Schweremessung, der Bestimmungsgenauigkeit der Anschlussmessungen (relative Schweremessungen zur Übertragung des Schwerewertes vom jeweiligen Bezugspunkt der absoluten Schwerebestimmungen bis in die Vermarkung des betreffenden Schwerfestpunktes) und den zeitlichen Schwerevariationen, die nicht durch Korrekturmodelle des verwendeten Schwerereferenzmodells (Gezeitenresteinflüsse, Grundwasserschwankungen etc.) erfasst werden, zusammen. Letztere sollten schon durch eine geeignete Auswahl der Punktlage möglichst minimiert werden. (s. A.3.)

Die statistische Genauigkeit der absoluten Schweremessung wird durch die Standardabweichungen eines Fallversuches bzw. eines Satzes von 100 Fallversuchen bzw. von mindestens 6 derartigen Sätzen zum Ausdruck gebracht, sie liegt aber in der Regel deutlich unter den systematischen Fehlern einer Absolutgravimetermessung.

Gegenwärtig können so die Schwerewerte von entsprechend vermarkten Feldpunkten mit einer Genauigkeit von $\pm 12 - 15 \mu\text{Gal}$ in Höhe der Vermarkung realisiert werden. Um zukünftig auch die zeitlichen Variationen erfassen zu können, ist die Angabe des Bestimmungszeitpunktes bei der Bekanntgabe von Schwerewerten notwendig.

A.3. Standortauswahl für SFP 1.O.

Im Folgenden werden die Ausführungen der Rili-RB-AdV (AdV, 2017) im Abschnitt 4.3 zur Standortwahl von SFP 1.O. noch einmal aufgeführt sowie mit ergänzenden Erläuterungen und Hinweisen versehen.

SFP 1.O sollen nachhaltig angelegt werden und die dort gewonnenen Messungsergebnisse müssen möglichst eindeutig interpretierbar sein. Deshalb sollte der Untergrund geologisch und hydrologisch weitestgehend stabil und der Festpunkt muss gegen mögliche Zerstörung weitestgehend geschützt sein. Massenänderungen in der näheren Punktumgebung infolge von Bergbau, großräumigen Baumaßnahmen und/oder Grundwasservariationen sollen nicht zu erwarten sein.

Außerdem sind SFP 1.O. außerhalb des Einflusses von Störquellen (z. B. Bodenerschütterungen, elektromagnetische Felder) durch Verkehr und technische Anlagen (Windenergieanlagen, Sendemasten, Hochspannungsleitungen usw.) zu errichten und sollen frei zugänglich, gut erreichbar bzw. direkt anfahrbar sein. Potentielle Störquellen sollen vom SFP 1.O. mindestens 200 m entfernt sein.

Grundwasserschwankungen von 1 m können Variationen des Schwerewertes bis zu $15 \mu\text{Gal}$ verursachen. Deshalb sind Feuchtgebiete, Uferbereiche usw. als SFP 1.O.-Standorte nicht zulässig.

Wenn möglich, soll sich in der Nähe des SFP 1.O. eine Grundwassermessstelle befinden, um den Einfluss eventueller Grundwasservariationen auf den Schwerewert abschätzen zu können.

Bei der Standorterkundung wird die Zusammenarbeit mit den zuständigen Landesbehörden (für Geologie, Umwelt usw.) empfohlen.

Vor der endgültigen Punktvermarkung ist am geplanten Standort eine Testmessung mit einem Relativgravimeter zur Einschätzung der lokalen Mikroseismik vorzunehmen.

Dazu wird sowohl auf einem bekannten Punkt mit wenig Mikroseismik als auch am geplanten Standort eine Messung von 10 bis 30 Minuten Dauer mit einem registrierenden Relativgravimeter durchgeführt. Anschließend können die ermittelten Größen (Standardabweichung, Anzahl der Ausreißer o.a.) auf beiden Punkten miteinander verglichen werden. Der direkte Vergleich ist erforderlich, da die Grundseismik großen jahreszeitlichen und/oder witterungsbedingten Änderungen unterliegt und je nach Region sehr unterschiedlich ausfällt. So kann ein Großteil der Grundseismik in Deutschland der Brandung im Nordatlantik zugeordnet werden, die sich, aufgrund der räumlichen Nähe intensiver in den nördlichen Bundesländern auswirkt. Ist die Größenordnung der Grundseismik bekannt, dann sind darüber hinausgehende Effekte der lokalen Seismik zuzuordnen. Erdbeben induzierte Seismik kann durch Abgleich mit einem aktuellem Erdbebeninformationssystem (z.B. <https://geofon.gfz-potsdam.de>) erkannt werden, sie gibt keinen Beitrag zur lokalen Mikroseismik.

Die direkte Anfahrbarkeit bzw. Parkmöglichkeit ist ein Hauptkriterium für SFP, auf denen Absolutschweremessungen durchgeführt werden sollen. Aufgrund der Länge des Verbindungskabels zwischen dem Messsystem (A10 Gravimeter) und den peripheren Datenerfassungssystemen im Messfahrzeug, muss das Fahrzeug während der Messung innerhalb eines Abstandes von etwa 10 m vom zu messenden Punkt geparkt werden können!

Bei der Standortwahl von SFP 1.O. ist neben den Anforderungskriterien an die Festpunkte auch zu berücksichtigen, dass eine gleichmäßige flächenhafte Punktverteilung über das gesamte Bundesgebiet erreicht wird. Bei Bedarf erfolgt die Abstimmung zwischen benachbarten Bundesländern.

A.4. Vermarkung von SFP 1.O.

In Ergänzung zur Rili-RB-AdV (AdV, 2017), Abschnitt 4.3, werden nachfolgend noch detaillierte Hinweise zur Vermarkung von SFP 1.O. gegeben. Ein SFP 1.O. ist in geeigneter Form stabil und dauerhaft zu vermarken. Geeignete Vermarkungen sind z. B. Gravimeterplatten, GGP-Pfeiler, SFP-Pfeiler und HFP-Pfeiler im Betonfundament, oder auch 3D-Bolzen auf sicheren, frostfrei gegründeten, horizontalen Flächen. Die Oberfläche der Vermarkung muss eine direkte zentrische Aufstellung des Gravimeters ermöglichen. Für moderne Relativgravimeter ist eine ebene, horizontale Aufstellfläche von 20 cm x 20 cm anzustreben. Der Schwerebezugspunkt muss eindeutig definiert sein und sollte sich vorzugsweise auf der Oberfläche der Vermarkung befinden.

Soll ein SFP 1.O. mittels Absolutgravimetrie schweremäßig bestimmt werden, ist die Vermarkung so auszuführen, dass ein feldaugliches Absolutgravimeter (derzeit das Absolutgravimeter A10) zentrisch auf dieser Vermarkung aufgestellt werden kann. Für das A10 ist dazu grundsätzlich eine ebene, vorzugsweise bodengleiche Aufstellfläche von mindestens 50 cm x 50 cm erforderlich.

In Ausnahmefällen können bereits bestehende SFP-Pfeilervermarkungen des DHSN96 mit einer Kopffläche von 25 cm x 25 cm bis 30 cm x 30 cm genutzt werden. Derartige Pfeiler müssen mit einer frostfrei gegründeten Betonumrandung von umlaufend mindestens 10 cm Breite sowie einem vertikalen Abstand von höchstens 18 cm unter der Aufstellfläche des A10 (Oberfläche Pfeilerkopf) versehen sein, damit die Stativbeine der oberen Geräteeinheit des A10 sowie das Gradientenstativ auf festem Untergrund stehen und somit bei der Messung die geforderte Genauigkeit erreicht werden kann. (vgl. Anlage 1)

Auf unterirdisch vermarkten Festpunkten können keine Schweremessungen in der laut Rili-RB-AdV (AdV, 2017) geforderten Genauigkeit durchgeführt werden!

Ist ein SFP, der mittels Absolutgravimetrie bestimmt werden soll, durch einen Schachtring o. ä. gesichert, darf die Oberkante des Schachtringes max. 15 cm höher sein als die Gravimeter-Aufstellfläche. In diesem Fall muss der Schachtring einen Durchmesser von mindestens 1 m haben, um die Kabelverbindung (unterer Kabelstecker) des Absolutgravimeters A10 zu seinen Peripheriegeräten zu gewährleisten.

Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen in der Rili-RB-AdV (AdV, 2017) sind einige SFP-Vermarkungen, die in früheren Schwerenetzen zur Anwendung kamen, als SFP 1.O. des DHSN2016 grundsätzlich ungeeignet. Dazu gehören z. B.:

- unterirdische Vermarkungen
- Höhenbolzen (Mauerbolzen) an Bauwerken
- Pfeiler, auf denen ein Gravimeter nicht direkt aufgestellt werden kann
- Punkte auf schrägen Flächen oder Kanten
- Punkte auf Mauern
- „leichte“ Vermarkungen (Nägel in Pflasterfugen u. ä.)

Sofern diese Punkte nicht durch geeignete lokale Maßnahmen in SFP 1.O. ertüchtigt werden können, sollten sie auf Dauer nur noch als SFP 2.O. oder 3.O. im Nachweis geführt werden.

Teil B Absolutschweremessungen mit Absolutgravimeter A10

Das feldtaugliche Absolutgravimeter A10 der Firma Micro-g LaCoste eignet sich als Messgerät für Arbeiten im DHSN2016. Auf der Grundlage regelmäßiger Messungen auf gravimetrischen Referenzstationen des BKG, im Vergleich zu Registrierungen Supraleitender Gravimeter und Messungen von Absolutgravimetern vom Typ FG5, kann es dazu beitragen, das DHSN2016 in das System des DSGN2016 einzubinden.

B.1. Gerätebeschreibung Absolutgravimeter A10

Mit dem Absolutgravimeter A10 steht ein batteriebetriebenes kompaktes Feldgravimeter für Messungen auf Außenpunkten zur Verfügung (Falk, et al., 2012). Es arbeitet nach dem Messprinzip des freien Falls eines Probekörpers in einer evakuierten Fallkammer. Die für die Bestimmung der Fallbeschleunigung notwendigen physikalischen Messgrößen Weg und Zeit werden durch einen stabilisierten Laser und ein Rubidium-Frequenznormal definiert. Durch die Messungen kann unmittelbar der Betrag der Schwerebeschleunigung am Messpunkt bestimmt werden.



Abb. 1

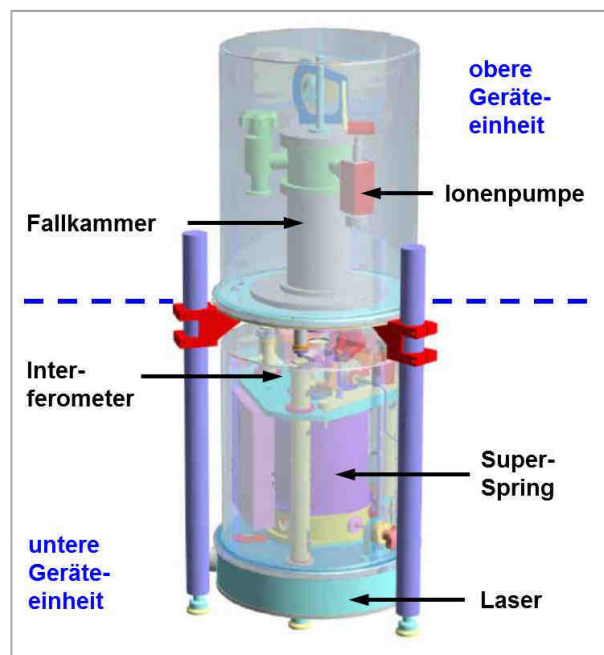


Abb. 2

Das Gravimeter besteht aus zwei zylinderförmigen Geräteeinheiten mit jeweils 20 kg Gewicht (Durchmesser 33 cm, Gesamthöhe des aufgebauten Instruments ca. 1 m). (Abb. 1)

Die obere Geräteeinheit des A10 enthält die Fallkammer, in der die Freifallmessung im Vakuum stattfindet. Ein Liftsystem transportiert den Probekörper dabei entsprechend der gewählten Messfolge nach oben und fährt dann beschleunigt nach unten, so dass der Probekörper mit dem Winkelprisma über eine Strecke von 6 cm frei fällt und an der unteren Liftposition wieder aufgefangen wird.

Die untere Geräteeinheit enthält die sogenannte „Superspring“, die wie ein sehr sensibles Seismometer arbeitet und das von der Bodenunruhe entkoppelte Referenzprisma der Wegmessung trägt, sowie den Laser und das Interferometer. Im Interferometer wird das Laser-

licht auf zwei Wege aufgeteilt, einen festen und einen veränderlichen Weg, der die Testmasse in der Fallkammer und das Referenzprisma an der Superspring einbezieht. Das zurückkehrende überlagerte Lichtsignal (Interferenz) wird durch eine Avalanche-Photodiode in ein elektrisches Messsignal umgewandelt.

Die Steuerung des Instruments, Aufbereitung der Messsignale und Aufzeichnung der Ergebnisse erfolgt in einer separaten Elektronikereinheit und dem hiermit verbundenen Steuerrechner. Messsystem und Elektronik sind durch zwei ca. 15 m lange Kabel verbunden.

Die Stromversorgung erfolgt über eine externe 12V Batterie, Netzteil bzw. Lichtmaschine eines Fahrzeugs oder einen externen Stromgenerator.

Durch die kompakte Bauweise kann das A10 schnell für die Messung installiert werden. Die batteriebetriebene Stromversorgung während des Transportes bewirkt, dass das Messsystem nach dem Aufbau des Gerätes sofort einsatzbereit ist. Das A10 besitzt eine automatische Horizontierung. Bei Wind oder ungünstigen Witterungsbedingungen ist es unter einem Schutzzelt aufzubauen. Elektronikkomponente und Steuerrechner bleiben im Transportfahrzeug.

Die Genauigkeit der Schwerebestimmung mit dem Absolutgravimeter A10 beträgt nach Herstellerangaben ca. $\pm 0,10 \mu\text{m/s}^2$ ($\pm 10 \mu\text{Gal}$). Sie wird durch die Frequenzstabilität des eingebauten Lasers begrenzt, aber auch die Umgebungs- bzw. Aufstellbedingungen sowie die Anzahl der einzelnen Fallversuche haben Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Die im A10 verwendete kleine Fallkammer erlaubt Messungen im Sekundentakt. Die reine Messzeit auf einem Geländepunkt beträgt in der Regel etwa eine Stunde.

B.2. Messverfahren, Geräteprüfungen, Korrekturwerte und Genauigkeiten

Die Einspeisung des Laserlichts mit einer definierten Wellenlänge in das Interferometer bewirkt am dort eingebauten halbdurchlässigen Spiegel eine Strahlteilung. Während ein Strahl einen konstanten Weg bis zur Photodiode durchläuft, ändert sich die durchlaufene Weglänge des zweiten Strahls (mit Reflexionen am Winkelprisma des freifallenden Probekörpers sowie dem Winkelprisma an der quasi-inertialen Superspring) kontinuierlich, ehe er ebenfalls auf die Photodiode trifft. Bei der Überlagerung beider Laserstrahlen kommt es daher abwechselnd zu maximaler Verstärkung oder zur Auslöschung des Laserlichts (Interferenz). Misst man die Zeitabstände (Rubidium-Normal) der Nulldurchgänge dieser Interferenzen (Fringe-Signal) - zwischen denen der Probekörper jeweils einen der halben Laser-Wellenlänge entsprechenden Weg zurückgelegt hat - kann man die Fallbeschleunigung g direkt aus der Zeitdifferenz und der Wellenlänge berechnen.

Referenzsystem und Geräteprüfung

Aufgrund des Messverfahrens stellen die Beobachtungen mit Absolutgravimetern gegenwärtig das Referenzsystem für die Bestimmung der Schwerebeschleunigung in Deutschland dar. Das in Vorbereitung befindliche Internationale Schwerereferenzsystem IGRS, basierend auf aktuellen Absolutmessungen, wird das IGSN71 ablösen und so eine höhere Langzeitstabilität garantieren können. Die Ableitung der Schwerebeschleunigung erfolgt direkt am Messpunkt auf der Grundlage der Nutzung der physikalischen Messgrößen Länge (Wellenlänge des Lasers) und Zeit (Frequenz eines Rubidium-Normals). Die Schwerewerte sind durch diese Verbindung auf das SI-System (hier: m/s^2) rückführbar.

Die A10 werden durch Vergleiche mit anderen Absolutgravimetern (FG5) in ihrem Referenzstatus (Schwereniveau) kontrolliert. Dies erfolgt zum einen auf gravimetrischen Referenzstationen (z. B. in Bad Homburg oder Wettzell), auf denen zusätzlich Supraleitende Gravimeter

registrieren und Zeitreihen von Messungen mit FG5 - Absolutgravimetern vorliegen. Zum anderen erfolgt eine regelmäßige Teilnahme dieser FG5 - Absolutgravimeter an den internationalen Vergleichen von Absolutgravimetern.

Die Gültigkeit der gewonnenen Absolutschwerewerte wird in diesem Sinne durch regelmäßige Wiederholungsmessungen auf gravimetrischen Referenzstationen (z.B. des BKG), sowie der kontinuierlichen Überwachung der Gerätestandards (Frequenzen des Laser bzw. des Rubidium-Frequenznormals) gegenüber Vergleichsstandards höherer Genauigkeit gewährleistet.

Korrekturen

Entsprechend der derzeitigen wissenschaftlichen Praxis werden die Messungen mit folgenden Korrekturen versehen und damit auf ein zeitunabhängiges Referenzsystem für die Erde bezogen:

Korrektur	maximaler Effekt	Fehler
Gezeiten der festen Erde	$\pm 1,5 \mu\text{m/s}^2$	0,001 x Korrektur
Ozeanauflast	$\pm 0,3 \mu\text{m/s}^2$	0,1 x Korrektur
Polbewegung	$\pm 0,1 \mu\text{m/s}^2$	0,0005 $\mu\text{m/s}^2$
Luftdruck, bezogen auf Normaldruck in Höhe des Messpunktes	$\pm 0,1 \mu\text{m/s}^2$	0,01 $\mu\text{m/s}^2$

Genauigkeit der A10-Messung

Die höchste Genauigkeit weist der gemessene Absolutschwerewert in einem bestimmten Punkt auf dem Fallweg des Probekörpers in der Fallkammer auf, der als gradientenunabhängiger Punkt (sensitiver Punkt) bezeichnet wird und dessen Lage gegenüber dem Bezugspunkt der Messung durch die Aufstellung des A10 definiert ist. Im Allgemeinen befindet sich dieser gradientenunabhängige Punkt ca. 70 cm über der Aufstellfläche des A10. Verwendet man ein oder mehrere Stative als Unterbauten für das A10, kann sich der Abstand des gradientenunabhängigen Punktes zur Aufstellfläche bzw. zum Schwerebezugspunkt um bis zu 14 cm vergrößern.

Die (a-priori) Genauigkeit des Absolutschwerewertes in Höhe des gradientenunabhängigen Punktes beträgt ca. $\pm 0,10 \mu\text{m/s}^2$ ($\pm 10 \mu\text{Gal}$) und entspricht der Messgenauigkeit des A10 unter der Voraussetzung der kontinuierlichen Überwachung der Instrumentenstandards, der regelmäßigen Kontrolle der Geräte auf einer gravimetrischen Referenzstation sowie von zwei unabhängigen Aufstellungen während der Messung am Punkt. Die a-posteriori erreichte Genauigkeit in Höhe des gradientenunabhängigen Punktes wird durch die konkreten Aufstellungsbedingungen sowie (örtlich bedingte) Umwelteinflüsse bestimmt. (vgl. A.3 und A.4)

Zur Übertragung des am gradientenunabhängigen Punkt gemessenen Schwerewertes auf den Schwerebezugspunkt muss der lokal gültige vertikale Schweregradient (VSG) bekannt sein bzw. bestimmt werden (vgl. Abschnitt C.3.). Die a-posteriori erreichbare Genauigkeit am Schwerebezugspunkt wird daher zusätzlich von der Genauigkeit der VSG-Bestimmung beeinflusst und beträgt für Punkte mit idealen Aufstell- und Umgebungsbedingungen ca. $\pm 0,12 \mu\text{m/s}^2$ ($\pm 12 \mu\text{Gal}$).

B.3. Messungsdurchführung und Auswertung

Sofern eine Landesvermessungsbehörde selbst keine Absolutschweremessungen mit A10 - Gravimetern durchführt, beauftragt sie einen externen Anbieter/Auftragnehmer (z.B. das BKG) mit diesen Arbeiten. Der Anbieter muss in der Lage sein, diese Absolutschweremessungen und Auswertungen entsprechend dieser Feldanweisung auszuführen und das anhand von bereits durchgeführten Referenzmessungen nachweisen.

Vor und nach einer Messungskampagne im DHSN2016 sind Vergleichsmessungen auf einer Schwerereferenzstation des BKG durchzuführen, um die Einsatzbereitschaft des eingesetzten Feldabsolutgravimeters A10 zu prüfen und nachzuweisen. Regelmäßig sind die Laserfrequenzen mit Hilfe z.B. der Vergleichseinrichtung des BKG (Jodstabilisierter Laser WEO100 und Cäsium-Normal) zu bestimmen bzw. ist das Rubidium-Normal des A10 mit einem anderen Frequenznormal höherer Genauigkeit (z.B. dem Stations-Normal des BKG-Observatoriums in Wettzell) zu vergleichen.

Die Vermarkung sowie die Lage- und Höhenbestimmung der zu bestimmenden SFP sind Aufgabe der für den SFP verantwortlichen Institution und entsprechend dieser Feldanweisung auszuführen.

Für die Durchführung der absoluten Schweremessungen werden dem Auftragnehmer die Festpunktbeschreibung (AFIS-Einzelnachweis), die Koordinaten und die Höhe im DHHN2016 sowie alle relevanten Punktinformationen (z. B. auch Details zu nahen Grundwassermessstellen) bereitgestellt. Diese beinhalten auch eine Beschreibung der Anfahrtswege sowie Kontaktdaten von Eigentümern, Pächtern oder Nutzern der Grundstücke. Bei Punktlagen auf Ackerflächen sind die Nutzer über die Messung zu informieren.

Die Organisation der Absolutmessung mit dem A10 vor Ort obliegt dem Auftragnehmer. Es werden pro Messpunkt mindestens zwei unabhängige Aufstellungen (dazu wird das Gerät um 180° gedreht, üblicherweise erfolgt die Messung in Nord- und Südausrichtung) zu je mindestens sechs Sätzen mit mindestens 100 Fallversuchen gemessen. Unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Aufstellungen um mehr als $\pm 0,10 \mu\text{m/s}^2$ ($\pm 10 \mu\text{Gal}$) ist mindestens in einer dritten unabhängigen Aufstellung zu messen (und falls nötig, weitere Wiederholungsmessungen anzuschließen).

Im Rahmen der notwendigen Feldarbeiten ist der aktuelle vertikale Schweregradient zwischen dem gradientenunabhängigen Punkt des A10 (ca. 70 cm) und der Vermarkung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05 \mu\text{m/s}^2/\text{m}$ ($\pm 5 \mu\text{Gal}/\text{m}$) zu bestimmen. (vgl. Abschnitt C.3.)

Die bei der Feldmessung aufgezeichneten Messdaten werden bei der Reprozessierung der Messung nochmals geprüft und bewertet. Dabei werden die Modelle für die Korrekturen (vgl. Abschnitt B.2.) bestmöglich auf die Punktlage der Messung angepasst (Gezeiten der festen Erde). Die zum Zeitpunkt der Messung vorläufigen Polkoordinaten werden durch die vom IERS (<https://datacenter.iers.org/data/latestVersion>) bereitgestellten finalen Erdorientierungsparameter (EOP) ersetzt. Falls für die Messungen ein theoretischer oder vorläufiger VSG genutzt wurde, ist der im Zuge der Messungen neu bestimmte VSG in der Auswertung einzuführen.

B.4. Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Absolutschweremessung werden dem Auftraggeber im „Datenabgabeprotokoll Absolutschweremessung“ (vgl. Anlage 2) bereitgestellt.

Darin werden die Ergebnisse für die Schwerebeschleunigung der Einzelmessungen (i. d. R. Nord- und Südaufstellung) für den gradientenunabhängigen Punkt dokumentiert und zu einem Endergebnis zusammengefasst. Weiterhin sind die Ergebnisse der Bestimmung des aktuellen vertikalen Schweregradienten (VSG) inklusive der Bezugshöhen für dessen Gültigkeitsbereich sowie die aus diesen beiden Ergebnissen berechnete Schwerebeschleunigung am Schwerebezugspunkt (Bezugspunkt der Vermarkung) im Protokoll enthalten.

Zur eindeutigen Punktidentifizierung enthält das Datenabgabeprotokoll außerdem die Punktkenntung, Koordinaten- und Höhenangabe sowie die Art der Punktvermarkung und die Angabe des Schwerebezugspunktes.

Besonderheiten, die während der Messung aufgetreten sind, werden ebenfalls im Datenabgabeprotokoll dokumentiert. Zusätzlich dokumentieren Fotos den Ablauf und die Bedingungen bei der Messungsdurchführung.

Teil C Relativschweremessungen

C.1. Relativgravimeter

Gravimeter gehören hinsichtlich ihrer Handhabung zu den anspruchsvollsten Sensoren in der Grundlagenvermessung. Im Unterschied zu anderen Messgeräten erfordern Gravimeter auch bei Nichtgebrauch eine ständige Wartung zur Erhaltung der Einsatzbereitschaft.

In den deutschen Landesvermessungsbehörden kommen gegenwärtig hauptsächlich zwei Arten von Relativgravimetern zum Einsatz: Geräte mit Metallfedersystem (LCR-Gravimeter) und Geräte mit Quarzfedersystem (SCINTREX-Gravimeter vom Typ Autograv TM- CG-3, - CG-5 oder - CG-6). Änderungen der Federlänge im Bereich von 1/10.000 mm sind damit messbar und ermöglichen so die Bestimmung von Schweredifferenzen.

Da auch Gravimeter gleicher Bauart teilweise unterschiedliche Gerätecharakteristiken aufweisen, ist es wichtig, diese zu kennen um deren Auswirkungen auf die Messungen richtig zu interpretieren.

C.1.1. Funktionsweisen

Funktionsweise Quarzfeder-Gravimeter (hier SCINTREX-Gravimeter ab Typ CG-3):

Der Messsensor der SCINTREX-Gravimeter besteht aus einem elastischen Quarzglas-System und ist dadurch unempfindlich gegenüber Magnetfeldeinflüssen. Sein Messbereich überdeckt den weltweiten Schwerebereich an der Erdoberfläche.

Die Prüfmasse, auf die die Schwerkraft einwirkt, wird durch eine lotrecht hängende Quarzglas-Feder und eine elektrostatische Rückstellkraft im Gleichgewicht gehalten. Die vertikale Stellung der Prüfmasse, die sich durch unterschiedliche Schwerewerte verändert, wird durch einen hochauflösenden kapazitiven Wegaufnehmer abgetastet und korrigiert.

Eine Abweichung gegenüber der Normal-Position (Nulllage) der Testmasse bewirkt eine Steuerspannung an einem Plattenkondensator und damit eine elektrostatische Kraft, die die Testmasse in die Normal-Position zurückführt. Die dafür nötige Steuerspannung ist wiederum proportional zur Messgröße des relativen Schwerewertes. Sie wird in ein digitales Signal umgewandelt und im Gravimeter automatisch registriert.

Aufgrund der elastischen Eigenschaften des Quarzglases in Kombination mit den seitlichen Anschlägen um die Prüfmasse, wird die Quarzfeder während des Transports nicht arretiert. Die jeweils drei ober- und unterhalb der Messkammer befindlichen Stoßdämpfer filtern bei der Messung mikroseismische Einflüsse und machen das Gerät unempfindlicher gegenüber ungleichmäßigen Beschleunigungen während des Transports.

Großen Einfluss auf das Messergebnis haben Temperaturschwankungen im Sensorsystem von Quarzfeder-Gravimetern. Um diese auf ein Minimum zu reduzieren, befinden sich der Schweresensor, die A/D-Elektronik und die Neigungssensoren in einer zweistufigen thermostatisierten Messkammer. Auf diese Weise kann die Temperatur bei ca. 50 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0005$ °C konstant gehalten werden.¹

Funktionsweise Metallfeder-Gravimeter (LCR-Gravimeter):

Bei Gravimetern der Firma LaCoste & Romberg (LCR) wird die Gleichgewichtslage einer Masse beobachtet, auf welche Schwerkraft und elastische Federkraft wirken. Durch die schräge Aufhängung der Feder (Astasierung) haben schon geringe Änderungen der Schwe-

¹ Quellen: (Scintrex, 2012), (Falk, 1995), (Torge, 2002) und (Peters, et al., 2009)

re große Auslenkungen der Feder zur Folge. Dieses Federsystem wird durch eine Arretierung geschützt, welche nur für den Vorgang der Messung gelöst wird. LCR-Gravimeter sind druckdicht und entmagnetisiert. Die Metallfeder besitzt normalerweise ebenfalls keine Magnetisierung. Diese kann sich aber im Laufe der Jahre durch äußere Einwirkungen aufbauen. Deshalb sollen LCR-Gravimeter bei der Messung einheitlich nach Norden ausgerichtet werden. Die Temperatur wird durch einen Thermostat kontrolliert und auf einer konstanten Betriebstemperatur gehalten. Die Messspindel bringt, mit Hilfe eines reflektierten Lichtstrahles, die Feder zum Ablesen des Wertes in die Nullposition (Reading Line). In dieser Stellung, welche durch das Okular zu sehen ist, wird der Messwert am Instrument (Zählwerk und Messspindel) abgelesen. LCR-G Gravimeter haben einen Messbereich von ca. 7000 mGal, LCR-D Gravimeter arbeiten nur über einen Bereich von 200 mGal, der aber mittels Reset-Schraube für das jeweilige Einsatzgebiet einstellbar ist.

Zur Steigerung von Messgeschwindigkeit und Ablesegenauigkeit haben heutzutage die meisten LCR-Gravimeter eine kapazitive Messanzeige und/oder ein elektronisches Rückkopplungssystem (Feedback). Dabei wird eine Regelspannung aufgebaut, die den Waagebalken in die Null-Lage zurückführt und dort hält.

C.1.2. Gerätewartung

Für alle Gravimeter gilt:

Außerhalb des Messeinsatzes sind die Gravimeter horizontal in einem weitgehend erschütterungsfreien Raum mit möglichst kleinen Temperaturschwankungen und geringer Luftfeuchtigkeit aufzustellen. LCR-Gravimeter sollen dabei auch entarretiert sein.

Eine ständige Stromversorgung des Gravimeters ist sicherzustellen. Diese gewährleistet ein gleichbleibendes Temperaturniveau des Sensors. Horizontierung und Stromversorgung des Gravimeters sind regelmäßig zu überprüfen.

Wird die Stromversorgung des Gravimeters unterbrochen, ändert sich das Temperaturniveau des Sensors. Je nach Dauer der Stromunterbrechung muss der Sensor eine gewisse Zeit wieder beheizt werden, um dessen Temperaturniveau zu stabilisieren, bevor das Gravimeter wieder messbereit ist. War die Stromversorgung längere Zeit (mehr als 24 Stunden) unterbrochen, ist das Gravimeter mindestens eine Woche lang vor dem nächsten Messeinsatz zu beheizen. (Scintrex, 2012)

LCR-Gravimeter sind laut Herstellerangaben nach vier Stunden Aufheizzeit einsatzbereit. Da jedoch keine Informationen bzgl. der danach erreichbaren Genauigkeiten vorliegen, wird empfohlen, nach einer Unterbrechung der Stromversorgung auch diese Geräte mindestens eine Woche vor dem nächsten Messeinsatz zu beheizen.

Für SCINTREX-Gravimeter wird nach einer Unterbrechung der Stromversorgung empfohlen, eine Langzeit-Standdriftbestimmung über mehrere Tage durchzuführen (vgl. Abschnitt C.1.4.1.1.) und diese in 24 Stunden-Abschnitten graphisch auszuwerten, um zu erkennen, ab wann die Drift des Gravimeters wieder stabil und linear verläuft.

Für das SCINTREX CG-6 gibt es diesbezüglich noch keine Informationen oder praktische Erfahrungen. Nach Angabe des Herstellers wurde das Messsystem des CG-6 aus dem CG-5 übernommen und optimiert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass das Verhalten beider Gerätesysteme nahezu identisch sein wird. (Cieslack, 2017), (Seigel, 1995)

Gravimeter müssen regelmäßig eingesetzt werden, um ihre Messtauglichkeit zu erhalten. Die Häufigkeit ist dabei abhängig von der geforderten Qualität der durchzuführenden Messung sowie von der Art des Gravimeters.

Sollen Messungen höchster Genauigkeit durchgeführt werden (z. B. im GGN oder SFP-Netz 1.Ordnung), empfiehlt es sich, das Gravimeter im Vorfeld mehrfach für Messungen mit niedrigeren Genauigkeitsanforderungen (z. B. für flächenhafte Schweremessungen) einzusetzen. Dies gilt insbesondere für den Einsatz von neuen Gravimetern.

Neue Gravimeter sollen, insbesondere in den ersten drei Monaten, regelmäßig untersucht werden. Zur Untersuchung gehören mehrmalige Standdriftbestimmungen, mehrmalige Maßstabsbestimmungen, die Beurteilung der Fahrdriften bei Messeinsätzen und die Kalibrierung der (elektronischen) Libellen. Auch parallele Messungen mit einem zweiten, bereits längere Zeit eingesetzten Gravimeter können wichtige Anhaltspunkte liefern. Sobald sich das Gravimeter als stabil erweist, kann es für Messungen mit den Genauigkeitsanforderungen des DHSN2016 eingesetzt werden.

C.1.2.1 Besonderheiten von SCINTREX-Gravimetern

Beim Aufstellen eines CG-5 nach einer Transportfahrt und dem zeitnahem Start der Messung kann es zu sogenannten Einlaufeffekten kommen. (Schlesinger, et al., 2018)

Einlaufeffekte beschreiben nichtlineare Messwertänderungen am Anfang der Datenregistrierung. Diese sind zeitabhängig und können eine Größenordnung bis zu mehreren $\mu\text{Gal}/\text{min}$ erreichen.

Die genaue Ursache ist nicht bekannt. Es wird vermutet, dass diese Effekte mit den Materialeigenschaften der jeweils drei Stoßdämpfer, die sich ober- und unterhalb der Sensorkammer befinden, zusammenhängen. Die Stoßdämpfer bestehen hauptsächlich aus Gummi, die möglicherweise unterschiedlich auf Temperaturänderungen und einseitige Belastungen reagieren.

Um den Einfluss dieser Effekte auf die Relativmessung zu minimieren, soll der Zeitraum vom Aufstellen des Gravimeters bis zum Start der Messung auf jedem Messpunkt eines Tages gleich sein. (vgl. Abschnitt C.2.2.) Bei starken Einlaufeffekten kann die Messdauer verlängert werden, die ersten Datensätze der Messung werden dann bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Bei einem Experiment der Universität Delft wurde festgestellt, dass CG-5 Gravimeter sehr empfindlich auf Neigungen reagieren. (Reudink, et al., 2014)

Wird ein CG-5 Gravimeter länger als 10 min um mehr als etwa 5° geneigt (Gravimeter-spezifisch unterschiedlich), ergibt sich bei den Messwerten ein Offset von mehreren $10 \mu\text{Gal}$. Die Zeit, die das Gravimeter benötigt, um nach der Horizontierung das ursprüngliche Niveau wieder zu erreichen, beträgt laut der Untersuchung das 5 bis 10fache der Zeit, die das Gerät in einer Neigung über dem kritischen Wert verbracht hat.

Aufgrund der gleichen Bauart des Sensors bei CG-3, CG-5 und CG-6 sind die Ergebnisse dieses Experimentes vermutlich auch auf diese Geräte übertragbar.

Neigungen größer 5° können z. B. beim Transport des Gravimeters auf der Rücksitzbank des Messfahrzeuges oder beim Parken an einer Straßenböschung schnell erreicht werden. Deshalb ist beim Gerätetransport bzw. beim Abstellen des Messfahrzeuges darauf zu achten, dass SCINTREX-Gravimeter immer nahezu horizontal stehen.

Ist der nahezu horizontale Gravimetertransport nicht möglich (z.B. wenn Punkte nur über steile Straßen anfahrbar sind), ist die Zeit zwischen Aufstellung und Horizontierung des Gravimeters und dem Start der Messung entsprechend anzupassen.

C.1.2.2 Besonderheiten von LCR-Gravimetern

Bauartbedingt erfordern LCR-Gravimeter mehr Aufwand bei der Wartung als Quarzfedergravimeter. Die Spindel soll einmal monatlich über den Messbereich des Einsatzgebietes be-

wegt werden. Im gleichen Intervall soll der Arretier-Vorgang mehrfach wiederholt werden. Nach Erschütterungen (z. B. durch Erdbeben) oder falscher Messbereichseinstellung „klebt“ der Sensor häufig an den Endanschlägen und muss durch leichtes Klopfen wieder gelöst werden.

Vorteilhaft ist es in den Zeiten außerhalb von Messungskampagnen eine ständige Registrierung des CPI- oder Feedbacksignals zusammen mit dem Signal eines digitalen Luftdrucksensors durchzuführen. Auf diese Weise können ggf. auch Undichtigkeiten des Gehäuses erkannt werden.

Die Kontakte zur Stromversorgung müssen fest und oxidationsfrei sein. Sie sind auch die Schwachpunkte bei feuchter Witterung. Das Gerät ist zudem nicht spritzwassergeschützt, weshalb Messungen bei Regen nicht zu empfehlen sind.

Da das LCR-Gehäuse eine vergleichsweise geringe Isolierung aufweist, können bereits bei Außentemperaturen unter +5 °C Schwankungen in der Temperaturstabilisierung auftreten. Messungen bei Außentemperaturen unter +5 °C sind deshalb zu vermeiden.

Auch der Wechsel des Instrumentes vom Messfahrzeug zum Messpunkt kann zu kritischen Temperaturschwankungen führen. Nach (Kangieser, 1983) kann man von einem Fehler von $\pm 8 \mu\text{Gal}$ bei einer Thermostatisierung auf 0,05 °C ausgehen. Da beim LCR die Temperatur in der Messkammer nur auf eine Nachkommastelle angezeigt wird, fallen Schwankungen in dieser Größenordnung nicht auf.

C.1.3. Gravimetertransport

Gravimeter sind möglichst erschütterungsarm und horizontal zu transportieren. Beim Fahrzeugtransport soll sich das Gravimeter in einer gepolsterten und/oder gefederten Transporteinrichtung befinden, die vorzugsweise in der Mitte (Schwerpunkt) des Fahrzeuges positioniert ist. Es sollen möglichst Fahrzeuge mit komfortabler Federung eingesetzt werden.

Besonders bei hohen Außentemperaturen ist darauf zu achten, dass sich das Gravimeter im Fahrzeug nicht zu stark aufheizt, um große Temperaturdifferenzen zwischen Transport und Messung oder im Extremfall, eine Überhitzung des Sensors, zu vermeiden.

C.1.4. Geräteprüfung

Gravimeter sind entsprechend der Herstellervorgaben zu prüfen, zu justieren und zu überwachen. Insbesondere ist auf die korrekte Einstellung von Zeit und Position zu achten, damit die Messdaten mit der richtigen Gezeitenkorrektur verbessert werden. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, alle für die Datenerfassung eingesetzten Sensoren (Gravimeter, GNSS-Ausrüstung, Erfassungssoftware, Digitalkamera, usw.) auf die UTC-Zeit einzustellen und mit einem amtlichen Zeitsignal zu synchronisieren.

Alle Geräteprüfungen sind mit den Prüfergebnissen und dem Datum der Prüfung zu dokumentieren und dauerhaft zu speichern.

Die Überprüfung von SCINTREX-Gravimetern (CG-3, CG-5, CG-6) soll folgende Punkte umfassen (vgl. Anlage 3):

- Bestimmung der Gerätestanddrift (Voraussetzung für die Prüfung der Neigungssensoren)
- Sensor-Check (nur bei CG-5) (in Verbindung mit der Standdriftbestimmung)
- Überprüfung und Neubestimmung des Neigungssensor-Offsets – alle 2 Monate
- Überprüfung und Neubestimmung der Empfindlichkeit des Neigungssensors – alle 4 Monate

- Überprüfung und ggf. Justierung der Kreuzkopplung der Neigungssensoren – alle 4 Monate
- Überprüfung und Nachregulierung der Temperaturkompensation (nur bei CG-3) (täglich)

Zum Sensor-Check beim CG-5 sind folgende Hinweise zu beachten:

Der Sensorcheckwert wird als Spannung in Volt angegeben und bezeichnet die Spannung, welche aufgebracht werden muss, um die an der Quarzfeder befindliche Prüfmasse in der Nulllage zu halten. (Scintrex)

Der Sensorcheckwert ist vom Schweremessbereich (Messort) und vom Alter des Gerätes (aufgrund der Längenänderung der Quarzfeder) abhängig. Aus diesem Grund soll die Überprüfung des Sensorcheckwertes immer am selben Messort, idealerweise in Verbindung mit der Standdriftbestimmung erfolgen.

Ein hoher gerätespezifischer Schweremesswert (Anzeigewert > 8000 mGal) führt zu einem hohen Sensorcheckwert (bis max. 5 Volt).

Der Zusammenhang zwischen Sensorcheckwert und gemessenem, nicht korrigiertem Schwerewert (Rohdaten) lässt sich in der Formel, mit welcher der Schwerewert berechnet wird, abschätzen:

Schwerewert = $G_{Cal1} * \text{Spannung (in Volt)} / 5$ (G_{Cal1} ist ein gerätespezifischer Wert)
(Male, 2018)

Nach Angaben von SCINTREX ist das CG-5 bei Sensorcheckwerten zwischen 0,1 V und 4,9 V einsatzfähig. Ab 4,9 V muss das Federsystem (Sensor) durch den Hersteller zurückgestellt werden. (Male, 2018)

Die Überprüfung von LCR-Gravimetern soll folgende Punkte beinhalten:

- Überprüfung und ggf. Justierung der Längslibelle (Neigungsempfindlichkeit)
 - alle 3 Monate
- Überprüfung und ggf. Justierung der Querlibelle (Minimum der Neigungsempfindlichkeit)
 - alle 3 Monate
- Ermittlung der korrekten „Reading-Line“ (Ablesestellung des Fadens) – alle 3 Monate
- Temperatur-Kontroll-Stromkreis (Temperaturbeobachtung) – täglich
- Feedbacksystem (für LCR-G) und Maßstabsbestimmung des Feedbacksystems
 - jährlich

Gravimeterprüfungen sind vorzugsweise in Zeiträumen geringer Gezeitenvariation und geringer Seismik durchzuführen.

C.1.4.1 Gravimeterdrift

Der Begriff „Gravimeterdrift“ (auch „Gravimergang“) beschreibt die zeitliche Änderung des Messsignals als Folge instrumenteller Eigenschaften und Vorgänge und ist damit ein systematischer Fehler des Messgerätes. (Bonatz, 2006 S. 10 "Drift") Man unterscheidet die beiden Komponenten „Standdrift“ und „Fahrtdrift“.

Das Federsystem eines Gravimeters unterliegt im stationären Betrieb aufgrund der Gravitation und der Alterung der Feder einer permanenten Längenänderung. Dieser physikalische Effekt wird als Standdrift bzw. Standgang bezeichnet.

Die Standdrift von Metallfedergravimetern ist geringer als 0,01 mGal/Tag. Bei Quarzfedergravimetern CG-3 und CG-5 liegt die mittlere Langzeitstanddrift zwischen 0,2 und 0,9 mGal/Tag. Aus Beobachtungen lässt sich folgern, dass die tatsächliche Standdrift ca. 10 bis 15 % um diese mittlere Langzeitdrift variiert und sich mit dem Alter des Gerätes ändert.² Beim CG-6 ist die bisher beobachtete Langzeitstanddrift niedriger. (Cieslack, 2017)

Im Feldeinsatz ist das Gravimeter äußeren Einflüssen ausgesetzt, die im stationären Betrieb nicht auftreten. Diese Einflüsse verursachen ebenfalls Längenänderungen des Federsystems und werden als Fahrtdrift bezeichnet. Die Charakteristiken der Fahrtdrift (Trend und Nicht-Linearitäten) unterscheiden sich meist deutlich von denen der Standdrift.

C.1.4.1.1. Bestimmung der Gravimeter-Standdrift

Aufgrund der geringen Standdrift von Metallfedergravimetern erfolgt für diese Geräte keine separate Standdriftbestimmung.

Die Standdriftbestimmung von Quarzfedergravimetern ist mindestens einmal monatlich vorzunehmen. Dabei wird die Standdrift über Langzeitmessungen von mindestens 24, idealerweise über 48 Stunden ermittelt. Längere Störungen in den Datenaufzeichnungen, wie Einlaufeffekte nach Messungsstart, Erschütterungen, Erdbeben u.ä. können die Standdriftbestimmung verfälschen. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass die Messwerte der Driftmessung mit den für den Messort gültigen Gezeitenreduktionen korrigiert sind, bevor die Driftberechnung durchgeführt wird.

Das Ergebnis der Standdriftbestimmung kann als Korrekturparameter im Gerät gespeichert werden und wird dann bei den Messungen automatisch berücksichtigt. Dadurch wird bei der Messung der Anteil der Standdrift nahezu vollständig eliminiert, die Messdaten enthalten nur noch die Einflüsse der Fahrtdrift. Dies ermöglicht eine genauere Beurteilung der auf den einzelnen Messpunkten aufgetretenen Fahrtdriften und ist ein wichtiges Qualitätskriterium in Bezug auf die Messung und den Zustand des eingesetzten Gravimeters. Außerdem wird erst dadurch der direkte Vergleich mit den Fahrtdriften anderer Gravimeter möglich.

Des Weiteren können bei automatischer Standdriftkorrektur die Messungsergebnisse direkt im Gelände schon für die Vorkontrolle (Einschätzung der Qualität der Messungen) genutzt werden.

C.1.4.1.2. Bestimmung der Gravimeter-Fahrtdrift

Mit der Bestimmung der Fahrtdrift eines Gravimeters kann die Qualität einer Schweremessung eingeschätzt werden.

Beeinflusst durch die Art und Weise des Transportes sowie der Beschaffenheit des Transportweges wirken ungleichmäßige Kräfte (Störbeschleunigungen) auf den Sensor des Gravimeters. Zusammen mit Temperaturänderungen verursachen diese Kräfte eine Fahrtdrift, die strenggenommen nicht linear verläuft.

Die Fahrtdrift wird aus den Messwerten, die während eines Messtages erfasst werden, berechnet. Dafür sind mehrere Messungen auf einem (oder mehreren) identischen Punkt(en) (Driftbestimmungspunkt(en)) in unterschiedlichen zeitlichen Abständen erforderlich. Der Driftbestimmungspunkt kann dabei sowohl ein bekannter oder ein neu zu bestimmender SFP, als auch ein geeignet gelegener temporärer Punkt sein. (vgl. Abschnitte C.2.1. und C.4.3.)

² Quellen: (Budetta, et al., 1997 S. 199-214), (Gettings, et al., 2008), (Timmen, 2012)

Die Berechnung der Fahrtdrift erfolgt in der Regel mit einem linearen Driftansatz. In der Praxis können jedoch auch Fahrtdriften auftreten, die nur mit Polynomen 2. oder 3. Grades modelliert werden können. In diesen Fällen sind für eine signifikante Fahrtdriftbestimmung zusätzliche Messungen auf einem (oder auf mehreren) Driftbestimmungspunkt(en) erforderlich. Das Ergebnis der Fahrtdriftbestimmung wird nicht als Korrekturparameter im Gerät erfasst. Treten bei den Messungen während eines Messtages stark unterschiedliche und damit schwer zu modellierende Gravimeter-Fahrtdriften auf, kann das auf Sprünge (Bonatz, 2006 S. 50 "Sprünge") zurückzuführen sein. Solche Messungen sind diesbezüglich zu prüfen, bei der Auswertung entsprechend zu gewichten oder ggf. zu wiederholen. Sprünge sollten möglichst schon während der Messung erkannt werden und durch zusätzliche Messungen auf Driftbestimmungspunkten abgesichert werden.

C.1.4.2 Maßstabsbestimmung

Für die Auswertung von Präzisionsschweremessungen ist die Kenntnis des Maßstabsfaktors des verwendeten Relativgravimeters erforderlich.

Dieser Maßstabsfaktor dient zur Umrechnung der mit Relativgravimetern gemessenen Schweredifferenzen auf den einheitlichen Maßstab des DSGN2016 und somit auf amtliche Schwereunterschiede im DHSN2016.

Die Ermittlung des Maßstabsfaktors ist auf einer geeigneten Gravimeter-Kalibrierbasis (GKB) (früher Gravimeter-Eichlinie) vorzunehmen, welche einen möglichst großen Teil des tatsächlichen Messbereiches des Einsatzgebietes des Relativgravimeters abdeckt.

Eine GKB soll aus mindestens drei durch Absolutschweremessungen bestimmten Punkten bestehen, welche eine Gesamtschweredifferenz ≥ 100 mGal aufweisen. Die Schwerewerte der Punkte müssen mit einer Genauigkeit von ≤ 12 μ Gal, bestimmt sein und aus einer unabhängigen Doppelbestimmung resultieren. Die zugehörigen vertikalen Schweregradienten müssen mit einer Genauigkeit von ≤ 5 μ Gal/m bekannt sein.

Unter der Berücksichtigung von Variationen des Grundwasserspiegels und der Bodenfeuchte sowie der Genauigkeit der Relativmessung kann der Gravimetermaßstab auf einer GKB mit einer Genauigkeit von etwa $1,5 \cdot 10^{-4}$ (= 150 ppm) bestimmt werden. (Timmen, et al., 2018)

Die Punkte der GKB sind bezüglich ihrer Schwerewerte mindestens alle 10 Jahre zu überprüfen.

Neue GKB sind so anzulegen, dass ein möglichst großer Schwereunterschied bei minimalem horizontalem Punktabstand auf einem geeigneten Transportweg realisiert wird. Das ermöglicht mehrere Messreihen pro Tag. Die Punktvermarkung ist entsprechend den Anforderungen an einen SFP 1.O. (vgl. A.4.) auszuführen.

Die Maßstabsbestimmung soll einmal pro Jahr erfolgen. Dabei sollen pro Tag möglichst mehrere Messungen auf mindestens drei Punkten durchgeführt werden, um eine ausreichende Redundanz für die Maßstabsberechnung zu erhalten.

Nach einem Eingriff in das Messsystem oder wenn Messungen im SFP-Feld 1. Ordnung Zweifel an der Richtigkeit des Maßstabsfaktors vermuten lassen, ist eine erneute Bestimmung vorzunehmen.

Sollte die Prüfung zu einem Ergebnis führen, bei dem der neue Maßstabsfaktor signifikant vom alten abweicht (Abweichung größer als Messgenauigkeit der Relativmessung), ist die Prüfung zu wiederholen.

Sollte die zweite Prüfung die Abweichung bestätigen, so ist der neue Maßstabsfaktor für künftige Messungen anzuhalten.

Die Maßstabsbestimmungen sind zu dokumentieren und dauerhaft zu speichern.

Anlage 4 enthält eine Übersicht über die derzeit in Deutschland verfügbaren GKB, graphische Darstellungen der von den einzelnen GKB abgedeckten Schwerebereiche sowie die Schwerebereiche der einzelnen Bundesländer.

C.1.4.3 Bestimmung der periodischen Spindelfehler bei LCR-Gravimetern

Die Herstellereichtabellen enthalten bereits gute Näherungen der periodischen Einflüsse. Für LCR-Gravimeter können optional die Spindelfehler, die eine Größenordnung von i. d. R. $\leq 10 \mu\text{Gal}$ haben, bestimmt werden.

Berücksichtigt man die Messgenauigkeit und die vorhandenen Unsicherheiten der Schwere-
daten der GKB, ist die signifikante Bestimmung der Spindelfehler sehr aufwändig. (Bonatz, 2006 S. 50 "Spindelfehler")

Werden bzw. wurden für LCR-Gravimeter signifikante Spindelfehler bestimmt, müssen diese Messungen mit geeigneter Berechnungssoftware (z. B.: GRAV von Prof. Wenzel) ausgewertet werden.

C.1.5. Zusatzausrüstung

Für Relativmessungen wird neben dem Gravimeter (inkl. Akku und gerätespezifischem Spezialstativ) zur Erfassung der messungsrelevanten Daten folgende Zusatzausrüstung benötigt:

- Barometer Genauigkeit 1hPa
- Zollstock (ggf. Nivellierausrüstung) Messung der Instrumentenhöhe
- Wasserwaage
- Kompass (für LCR-Geräte) Orientierung der Gravimeteraufstellung nach Norden
- Uhr/Funkuhr (für LCR-Geräte)
- Thermometer (für LCR-Geräte) Anzeige 1°C (vgl. Abschnitt C.1.2.2.)
- Neigungsmesser / Dosenlibelle (vgl. Abschnitte C.1.2.1. und C.2.2.)
- Wind- und Sonnenschutz
- VSG-Stativ
- Fotokamera

C.2. Bestimmung von SFP 1.O. des DHSN2016

Neben der direkten absolutgravimetrischen Bestimmung des Schwerewertes eines SFP 1.O. des DHSN2016 räumt die RiLi-RB-AdV (AdV, 2017) die Möglichkeit ein, den Schwerewert eines SFP 1.O. mit Hilfe von Relativgravimetern durch Anschluss an Absolutschwerepunkte zu bestimmen. Geeignet dafür sind die Punkte des DSGN2016, gleichwertige mit FG5 Gravimetern bestimmte Absolutstationen und SFP, die mit dem A10 Absolutgravimeter entsprechend der bisher gültigen Feldanweisung Absolutschweremessungen (AdV, 2010) gemessen worden sind. Diese Anforderung erfüllen alle A10 Messungen des BKG ab 03/2009, sofern die jeweilige Punktvermarkung den Kriterien der oben genannten Feldanweisung entsprochen hat.

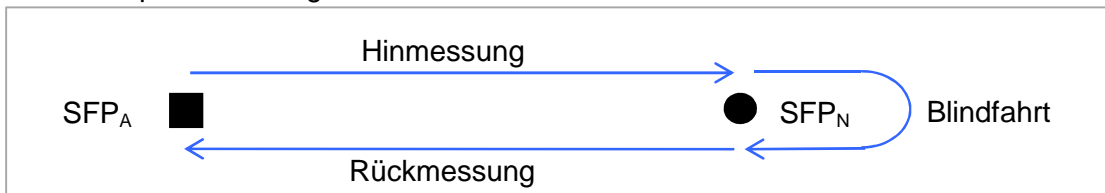
Werden Anschlusspunkte verwendet, deren Schwerewerte aus Relativmessungen resultieren, ist sicherzustellen, dass die Genauigkeit dieser Schwerewerte im DHSN2016 mindestens gleichwertig zur Genauigkeit von A10-Messungen ist.

C.2.1. Messverfahren

Folgende Messverfahren sind zur Bestimmung von SFP 1.O. geeignet:

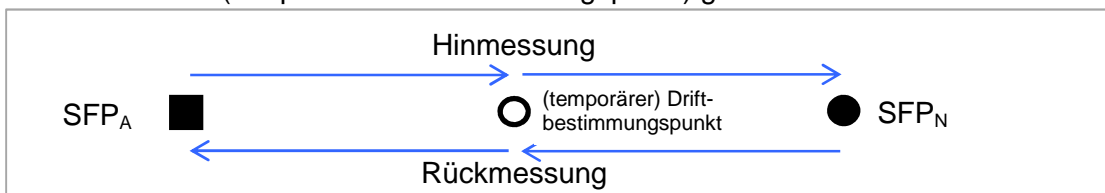
a) Verfahren der doppelten Differenzmessung

Nach Messung des Anschlusspunktes (SFP_A) und eines zu bestimmenden SFP (SFP_N) wird eine Blindfahrt (Bonatz, 2006) durchgeführt und nach erneuter Messung auf SFP_N auf den Anschlusspunkt zurückgekehrt: $SFP_A - SFP_N - SFP_N - SFP_A$

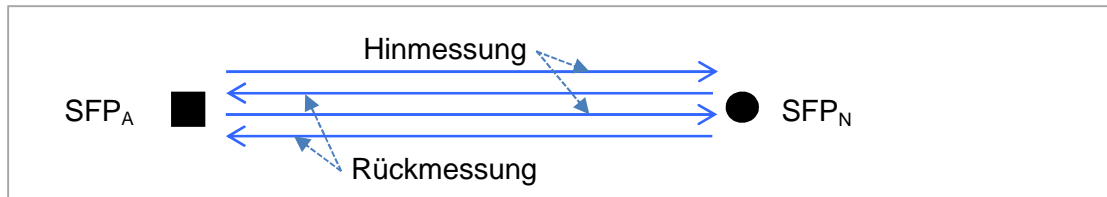


Die Messung kann auch auf dem Neupunkt (SFP_N) begonnen werden.

Als Alternative zur Blindfahrt kann zwischen SFP_A und SFP_N bzw. SFP_N und SFP_A ein zusätzlicher Punkt (temporärer Driftbestimmungspunkt) gemessen werden.



Bei einem Messablauf $SFP_A - SFP_N - SFP_A - SFP_N - SFP_A$ kann sowohl auf die Blindfahrt als auch auf einen temporären Driftbestimmungspunkt verzichtet werden.

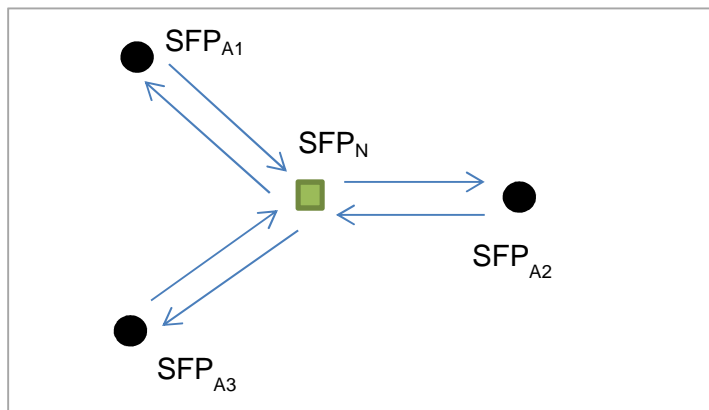


b) Sternverfahren:

Nach Messung des Neupunktes (SFP_N) und anschließender Messung des ersten Anschluss-SFP (SFP_{A1}) wird auf den Neupunkt zurückgekehrt. Anschließend wird der zweite Anschluss-SFP (SFP_{A2}) gemessen und wieder auf den Neupunkt zurückgekehrt usw.

SFP_N – SFP_{A1} – SFP_{A1} – SFP_N – SFP_{A2} – SFP_{A2} – SFP_N – SFP_{A3} – SFP_{A3} – SFP_N

Die zweite Messung auf den SFP_{Ax} erfolgt nach einer erneuten Aufstellung des Gravimeters. Eine Blindfahrt zwischen den beiden Aufstellungen ist nicht erforderlich.



Mit allen Messverfahren muss der Verlauf der Fahrtdrift eindeutig modelliert werden können.

C.2.2. Messungsdurchführung

Der Messungsablauf ist in Abhängigkeit von Fahrtrouten und Zeitbedarf vor Beginn der Messung festzulegen.

Es wird empfohlen, zeitnah vor der Messung eine örtliche Punktüberprüfung, ggf. in Verbindung mit notwendigen Lage- und/oder Höhenbestimmungen, durchzuführen. Dabei können auch die geplanten Fahrtrouten und der Zeitbedarf den aktuellen Bedingungen angepasst werden.

Lage- und/oder Höhenbestimmungen für SFP 1.O. sollen nicht während der gravimetrischen Messungen durchgeführt werden, um den gleichmäßigen Messungsablauf nicht durch zusätzliche Aufgaben zu beeinflussen.

Vor Beginn der ersten Messung des Tages sind die Gravimeter zur Anpassung an die Fahrtdrift ca. 30 Minuten mit dem Messfahrzeug zu transportieren.

Ein gleichmäßiger Messrhythmus über den gesamten Messtag ist einzuhalten, um eine möglichst lineares Driftverhalten des Gravimeters zu erzielen. Das bedeutet, dass während der Messungen je Punkt der gleiche Zeitaufwand aufgebracht werden soll und gleiche Fahrtzeiten zwischen den Punkten bei der Hin- und Rückmessung anzustreben sind. Zwischenzeitliche Unterbrechungen der Messfahrten sind zu vermeiden.

Bei den Messungen ist darauf zu achten, dass alle eingesetzten Gravimeter immer in derselben Reihenfolge nacheinander zentrisch über dem Festpunkt aufgestellt und die Messungen auf jedem Punkt im selben zeitlichen Rhythmus durchgeführt werden. Werden Gravimeter mit unterschiedlichen Sensorhöhen verwendet, ist mit Hilfe geeigneter Unterkonstruktionen (DreifüÙe) eine möglichst gleiche Sensorhöhe anzustreben. Die Orientierung der Gravimeter auf der Vermarktung soll für alle Geräte gleich sein und, wenn möglich, in Nordrichtung erfolgen. Vor dem Start der Datenaufzeichnung sind Instrumentenhöhe, Luftdruck sowie ggf. die Lufttemperatur zu bestimmen und zu dokumentieren.

Die Gravimeter sind weitestgehend horizontal zu transportieren. Beim Abstellen des Messfahrzeuges ist darauf zu achten, dass SCINTREX-Gravimeter nur kurzzeitig (maximal 10 Minuten) einer Neigung $> 5^\circ$ ausgesetzt werden dürfen. (vgl. Abschnitt C.1.2.1.) Beim CG-5 kann die Überschreitung der kritischen Neigung mittels Sensorcheck überprüft werden. In diesem Fall würde ein Sensorcheckwert nahe 0,000 V angezeigt. (Reudink, et al., 2014) Deshalb wird empfohlen, am Messort sofort nach dem Aufbau des ersten Gravimeters auf dem SFP, alle weiteren Gravimeter in unmittelbarer Nähe des SFP horizontal aufzustellen und erst danach die Messung des ersten Gerätes zu starten.

Während der Messung ist das Gravimeter durch geeignete Maßnahmen (Feldschirm, Windschutz, o. ä.) vor direkter Sonneneinstrahlung und Windeinflüssen zu schützen.

Nach Beendigung der Tagesmessung sind die Messdaten zu sichern.

C.2.3. Messungsdokumentation

Für die Auswertung und Qualitätssicherung sind für jedes Projekt bzw. jeden Messtag und für jedes eingesetzte Gravimeter mindestens folgende Informationen zu erfassen.

- Projektname
- Messungsdatum
- eingesetztes Gravimeter (Typ und Gerätenummer)
- Messungsparameter
 - Messungsdauer der Einzelmessung
 - Anzahl der Einzelmessungen je Aufstellung
 - Zeitsystem (UTC, MEZ, MESZ)
- Beobachter

Für jede Aufstellung bzw. Messung sind außerdem mindestens folgende Angaben zu erfassen:

- Punktnummer / Punktkennung
- Startzeit der jeweiligen Messung (hh:mm)
- Luftdruck am jeweiligen Messort (1 hPa)
- Lufttemperatur (LCR, CG-3) (1°C)
- Instrumentenhöhe (mm)
- Schwerebezugspunkt „Nullpunkt“ für die Messung der Instrumentenhöhe

Als Instrumentenhöhe wird hier der vertikale Abstand vom Schwerebezugspunkt bis zur Oberkante des jeweiligen Relativgravimeters bezeichnet. Die Sensorhöhe (oder auch Aufstellhöhe), d. h. der vertikale Abstand vom Schwerebezugspunkt bis zum sensitiven Punkt des Gravimeters, ist nicht direkt messbar, wird aber benötigt, um den in Sensorhöhe des Gravimeters gemessenen Schwerewert auf den Schwerebezugspunkt reduzieren zu können. Der Höhenunterschied zwischen Sensor und Oberkante des Gravimeters ist eine gerätetyp-

spezifische Konstante, die jeweils in den für die Auswertung benötigten Instrumentendateien gespeichert wird. Die aus dieser Konstante resultierende Reduktion wird bei der Auswertung berücksichtigt.

Je nach eingesetztem Gerätetyp können weitere Angaben erforderlich sein. Zusätzlich sind Bemerkungen bzw. Besonderheiten während der Messung zu dokumentieren, sofern diese für die Auswertung relevant sind. Auch durch Fotos können nützliche Informationen bereitgestellt werden. (Es wird empfohlen, die richtige Datumseinstellung der Kamera zu überprüfen und die Uhrzeit auf UTC einzustellen, damit die Bilder den Gravimetermessungen eindeutig zugeordnet werden können.)

Die Erfassung der Informationen kann sowohl in einem analogen Messprotokoll, (vgl. Anlage 5) als auch digital erfolgen.

C.2.4. Auswertung

C.2.4.1 Anforderungen an die Berechnungssoftware

Die Software muss folgende Kriterien erfüllen:

- Gezeitenreduktion
- Luftdruckreduktion
- Aufstellungshöhenreduktion (mit lokalem vertikalen Schweregradienten)
- für LCR Gravimeter: Umrechnung von Skaleneinheiten in Schwerebeschleunigung (Herstellereichtabelle, Feedbackmaßstab, optional Spindelfehler)
- Gravimetermaßstabsberechnung und entsprechende Korrektur
- Driftberechnung mit graphischer Darstellung vor und nach der Ausgleichung (lineare Drift bis Polynom 3.Grades), bei Messungen mit mehreren Gravimetern optional eine vergleichende Driftdarstellung
- Freie Ausgleichung bzw. Diagnose- und Zwangsausgleichung
- Gewichtung der Messungen und optional Gewichtung der Anschlusspunkte

Für Messungen in Küstenregionen sollen die Partialtidenparameter angepasst werden können.

Derzeit sind in den Vermessungsverwaltungen der Länder folgende Auswerteprogramme im Einsatz: Galileo, GravAP, GRAV(Wenzel)

Es existieren gegenwärtig noch keine Informationen bzgl. einer Validierung der Auswertansätze und Ergebnisse der verschiedenen Softwarelösungen. **Eine Standardisierung ist anzustreben.**

C.2.4.2 Vorauswertung und Festlegung des Driftansatzes

Die Vorauswertung mit Festlegung des Driftansatzes und ggf. unterschiedlicher Gewichtung der Messungen sollte direkt nach Abschluss der Messfahrt durch den Beobachter erfolgen. Dazu sind i. d. R. bereits Diagnoseausgleichungen erforderlich. Damit kann sichergestellt werden, dass aktuelle Erkenntnisse über das Messverhalten des Gravimeters bei der Planung der nächsten Messfahrten berücksichtigt werden können.

C.2.4.3 Ausgleichung

Ausgeglichen werden die auf den Anschluss- und Neupunkten durchgeführten (korrigierten und reduzierten) Schwerebeobachtungen nach der Methode der kleinsten Quadrate. Ausgleichungsunbekannte sind die Schwerewerte der Neupunkte, und je Messfahrt und Gravimeter eine Niveauunbekannte sowie je eine bis drei Driftunbekannte (i. d. R. abhängig vom Driftansatz), optional eine Maßstabsunbekannte pro Gravimeter (bei Auswertung der Maßstabsbestimmung auf der GKB).

Die Kontrolle der Anschlusspunkte muss über eine Freie- bzw. Diagnoseausgleichung erfolgen. Die Klaffungen auf den Anschlusspunkten sind zu prüfen. Werden als Anschlusspunkte sowohl Punkte des DSGN2016 als auch des DHSN2016 verwendet, sind diese differenziert zu gewichten.

C.2.4.4 Qualitätssicherung

Schweremessungen und -auswertungen höchster Genauigkeit erfordern die Verwendung regelmäßig geprüfter Geräte, die Nutzung aktueller Soft- und Firmware der eingesetzten Systeme sowie viel Erfahrung, insbesondere bezüglich der individuellen Gerätecharakteristiken und dem daraus resultierenden spezifischen Messverhalten der zu verwendenden Gravimeter.

Um sicherzustellen, dass bei der Auswertung alle relevanten Faktoren einer Messfahrt berücksichtigt und richtig interpretiert werden, sollen Messung und Auswertung möglichst durch **denselben** Bearbeiter ausgeführt werden.

Außerdem können bei durchgängiger Bearbeitung der Messung, von der Vorbereitung bis zur Auswertung durch einen Bearbeiter, wichtige Erkenntnisse gesammelt und bei zukünftigen Projekten berücksichtigt werden. (National Geodetic Survey, 2013 S. 13)

Anlage 6 enthält eine Zusammenstellung von Fehlerquellen und ihren Auswirkungen bzw. deren Beseitigung.

C.2.5. Dokumentation der Ergebnisse

Für jedes Projekt sind mindestens folgende Angaben zu dokumentieren:

- Projektname, Arbeitsaufgabe und Genauigkeitsanforderungen
- verwendete Bezugssysteme für Lage, Höhe und Schwere
- eingesetzte Gravimeter (Typ und Gerätenummer) mit Datum der letzten Geräteprüfung
- Punktnummer (Punktkennung) und Zustand der Anschlusspunkte
- Besonderheiten während der Messungen, die Auswirkungen auf die Auswertung haben (z. B. unterschiedliche Gewichtung der Messungen aufgrund äußerer Einflüsse während der Datenregistrierung)
- Plausibilitätskontrollen und Prüfvermerk zur Qualitätssicherung

Für jeden Neupunkt sind mindestens folgende Angaben zu dokumentieren:

- Punktnummer
- Punktvermarkung und Schwerebezugspunkt
- Koordinaten und Höhe
- Vertikaler Schweregradient (für SFP 1.O.)

Zur Dokumentation der Ergebnisse gehören mindestens:

- alle Messprotokolle
- originale Messdaten / Messdateien
- für Berechnung bearbeitete (editierte) Messdateien
- Kalibrier- bzw. Gerätedateien der verwendeten Gravimeter
- Berechnungsergebnisse
- Datei zur Übernahme der Ergebnisse in die Festpunktinformationssysteme

Ergänzt werden kann die Dokumentation durch eine Netzskizze der Messungsanordnungen, einen Arbeits- bzw. Erläuterungsbericht sowie ggf. durch Fotos.

C.3. Bestimmung des Vertikalen Schweregradienten

Unter Punkt 4.5 der Rili-RB-AdV (AdV, 2017) wird für SFP 1.O. des DHSN2016 eine Genauigkeit des Schwerewertes, bezogen auf einen eindeutig definierten (vermarkten) Schwerebezugspunkt, von $12 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ($12 \text{ } \mu\text{Gal}$) gefordert. Schwerewerte werden jedoch originär bei ihrer Bestimmung erst einmal auf den sensitiven Punkt des Gravimeters bezogen, das ist beim Absolutgravimeter A10 der gradientenunabhängige Punkt im Bereich des freien Falls bzw. beim Relativgravimeter die Position des Sensors im Gravimeter über dem Bezugspunkt (Sensorhöhe). Der gradientenunabhängige Punkt und auch die Sensorhöhe berechnen sich aus einem gravimetertypbedingten konstanten Anteil und einem aufstellungsbedingten variablen Anteil.

Die Übertragung eines im sensitiven Punkt des Gravimeters bestimmten Schwerewertes auf den Schwerebezugspunkt erfolgt mittels eines Reduktionswertes, der sich als Produkt des Höhenunterschiedes zwischen sensitiven Punkt und Schwerebezugspunkt und dem Vertikalen Schweregradienten (VSG) ergibt. Der VSG beschreibt die Änderung der Schwere mit der Änderung der Höhe ($\Delta g/\Delta h$).

Im Allgemeinen wird für den VSG ein Standardwert von $-308,6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{m}$ (spricht $-308,6 \text{ } \mu\text{Gal/m}$) verwendet. Dieser sogenannte Normalgradient an der Erdoberfläche ist jedoch ein theoretischer Wert, dem die Theorie des Normalschwerefeldes zum Aufbau und der Dichteverteilung der Erde zugrunde liegt.

Der tatsächliche VSG ist abhängig von der Topographie und den Massenverhältnissen in der Punktumgebung und kann deshalb erheblich vom Normalgradienten abweichen. Die tatsächlichen VSG in Deutschland haben Werte meist zwischen ca. $-360 \text{ } \mu\text{Gal/m}$ und $-260 \text{ } \mu\text{Gal/m}$. Bei extremer Topographie sind auch schon kleinere bzw. größere Werte ($-500 \text{ } \mu\text{Gal/m}$ und $-220 \text{ } \mu\text{Gal/m}$) bestimmt worden.

Im DHSN82 und DHSN96 wurde für die Reduktion auf den Schwerebezugspunkt standardmäßig der Normalgradient benutzt. Um bei der Realisierung des DHSN2016 die Genauigkeitsanforderungen einhalten zu können, ist die Kenntnis des lokalen VSG am Ort des SFP 1.O. unerlässlich. Außerdem ist der VSG für die Verknüpfung von Messungen mit unterschiedlichen Sensorhöhen erforderlich. (Reicheneder, 1966), (vgl. Anlage 7)

C.3.1. Messverfahren

Der lokale VSG wird durch die Messung des Schwereunterschiedes zwischen zwei unterschiedlich hohen Aufstellebenen über dem Schwerebezugspunkt ermittelt.

Die Sensorhöhe des Relativgravimeters bei der oberen Aufstellung soll der Höhe des gradientenunabhängigen Punktes des eingesetzten Absolutgravimeters (derzeit FG5 bzw. A10, d.h. ca. 1,25 m bzw. 0,7 m) entsprechen. Die untere Aufstellebene soll sich idealerweise möglichst dicht über dem Schwerebezugspunkt befinden, um den Abstand zwischen dem sensitiven Punkt und dem Schwerebezugspunkt und den damit verbundenen Extrapolationseffekten möglichst gering zu halten.

Die Änderung der Schwere zwischen der Messhöhe auf der unteren Aufstellebene (Sensorhöhe des Gravimeters (SH_u)) und dem Schwerebezugspunkt lässt sich messtechnisch nur näherungsweise bestimmen, da kein Schweresensor direkt in die Position der Vermarkung gebracht werden kann. Da der VSG, insbesondere in Bodennähe nicht linear verläuft, ist der ermittelte Wert des VSG nur eine Näherung, welche auch nur für den Bereich zwischen den beiden Sensorhöhen gilt. Streng genommen kann deshalb die Reduktion systematisch um

bis zu 4 μGal verfälscht sein. Der VSG über einem SFP 1.0 soll mit einer Genauigkeit von $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{m}$ (5 $\mu\text{Gal}/\text{m}$) (vgl. Rili-RB-AdV, Kap. 4, Abs. 4 (AdV, 2017)) bestimmt werden.

Die Genauigkeit des VSG (s_{VSG}) kann mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$s_{\text{VSG}} = \pm \sqrt{\left(\frac{s_{\Delta g}}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{s_{\Delta h} \cdot \Delta g}{\Delta h^2}\right)^2}$$

wobei:

- $s_{\Delta g}$ Fehler des gemessenen Schwereunterschiedes (in μGal)
- Δg gemessener Schwereunterschied (in μGal)
- Δh gemessener Höhenunterschied (in m)
- $s_{\Delta h}$ Standardabweichung $s_{\Delta h}$ der Bestimmung des Höhenunterschiedes (kann bei der Messung mit Zollstock und Wasserwaage mit 0,002 m angenommen werden).

Da die Größen des zu bestimmenden Höhenunterschiedes (zwischen 0,5 m und 1,2 m) und der zu messenden Schweredifferenz (zwischen 100 μGal und 600 μGal) aus der Aufgabenstellung vorgegeben sind, ist die folgende Näherungsformel ausreichend:

$$s_{\text{VSG}} = \pm \left(\frac{s_{\Delta g}}{\Delta h} + 0,1 \mu\text{Gal}/\text{m} \right)$$

Die tatsächlich erreichte Genauigkeit für den Schwerewert eines SFP 1.0. kann unter Beachtung der Fehlerfortpflanzung nach folgender Formel berechnet werden:

$$s_{\text{BezP}} = \sqrt{s_{\text{Sensor}}^2 + ([\Delta h_{\text{Sensor}}] \cdot s_{\text{VSG}})^2 + s_{\text{NL}}^2}$$

wobei:

- s_{BezP} Genauigkeit des Schwerewertes am Bezugspunkt (in μGal)
- s_{Sensor} Genauigkeit des Schwerewertes in Sensorhöhe des Gravimeters (in μGal)
- s_{VSG} Genauigkeit des VSG (in $\mu\text{Gal}/\text{m}$)
- Δh_{Sensor} Höhenunterschied zw. Bezugspunkt und Sensor des Gravimeters (in m)
- s_{NL} Einfluss der Nichtlinearität (Abschätzung: 4 μGal)

C.3.2. Messungsdurchführung

Zur Messung des VSG auf Geländepunkten wird die Nutzung eines speziellen Gradientenstatives empfohlen, da sich dessen zwei Aufstellebenen einfach auf den vertikalen Abstand von 60 cm einstellen lassen. Dieser Abstand ermöglicht zum einen die problemlose Aufstellung des Gravimeters auf der unteren Aufstellebene, zum anderen befindet sich der Sensor bei Aufstellung auf der oberen Aufstellhöhe etwa in der gleichen Höhe wie der Sensor des Absolutgravimeters A10.

Die Höhendifferenzen der beiden Aufstellebenen (bzw. der jeweiligen Oberflächen des Gravimeters bei Aufstellung unten und Aufstellung oben) zum Schwerebezugspunkt sind mit einer Genauigkeit von $\leq 2 \text{ mm}$ zu bestimmen.

Die Bestimmung des VSG erfolgt durch wechselseitige Messungen auf den beiden Aufstellenebenen. Auf jeder Aufstellenebene sollen mindestens 5 Messsätze von mindestens je 3 Messzyklen mit einer Messzeit von jeweils ca. einer Minute pro Messzyklus durchgeführt werden. Die Zeitintervalle zwischen den jeweiligen Messungsstarts sollen gleich sein (ca. 10 min).

Der Standardfall ist die zentrische VSG-Bestimmung. Dabei liegen die beiden Sensorhöhen zur VSG-Bestimmung direkt über der Vermarkung bzw. dem Schwerebezugspunkt.

Bei Vermarkung eines SFP 1.O. durch einen HFP-Pfeiler mit seitlichem Höhenbolzen wird der Gradient zentrisch über dem Pfeiler bestimmt, auch wenn der Schwerebezugspunkt der seitliche Höhenbolzen ist. Die Höhen der Aufstellenebenen für die VSG-Bestimmung (bzw. die jeweiligen Instrumentenhöhen bei Aufstellung unten und Aufstellung oben) werden immer auf den Schwerebezugspunkt bezogen.

Die exzentrische VSG-Bestimmung sollte nur in begründeten Ausnahmefällen durchgeführt werden. Dabei ist bei der Genauigkeitsangabe des, auf den Schwerebezugspunkt reduzierten, Schwerewertes der Einfluss der exzentrischen VSG-Bestimmung sachgerecht zu berücksichtigen.

Es wird empfohlen, die Vorauswertung der VSG-Messung bereits vor Ort durchzuführen, um die Qualität der Messdaten zu prüfen (Standardabweichungen, Sprünge in den Messungen). Bei Messätzen, die nicht den Anforderungen genügen, können somit direkt Nachmessungen erfolgen.

Optional kann durch eine Zweitmessung mit einem anderen Gravimeter bei gleichem Stativ-aufbau die VSG-Bestimmung kontrolliert werden. Bei einer Abweichung beider Ergebnisse von $\leq 10 \mu\text{Gal/m}$ sind diese zu mitteln. Bei Abweichungen $\geq 10 \mu\text{Gal/m}$ soll eine weitere Messung erfolgen.

C.3.3. Auswertung

Für die Auswertung sind an die rohen Messwerte die Korrekturen für die Gravimeterparameter (Maßstab, geringfügig variierender Höhenbezug zwischen den Aufstellungen, ggf. Feedbackfaktor bei LCR-Gravimetern), sowie die Reduktionen für Erdzeiten und bezüglich der Langzeitdrift anzubringen. Auf die Berücksichtigung von Luftdruckschwankungen kann verzichtet werden, da die VSG-Messung im Regelfall nicht länger als 2 Stunden dauern.

Es wird eine Schweredifferenz sowie die Restdrift aus mehrfach wiederholten Messungen berechnet. Diese Berechnung soll mit einem geeigneten Auswerteprogramm nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen werden.

C.3.4. Dokumentation der Ergebnisse

Die Angaben zum VSG können ab GeoInfoDok 7.0.3 in AFIS geführt werden.

Bis dahin wird empfohlen, den Wert des VSG, die Genauigkeitsangabe, den Gültigkeitsbereich (beide Aufstellhöhen in Relation zum Schwerebezugspunkt) sowie das Datum der Bestimmung in geeigneter Weise in die Nachweise zu übernehmen.

C.4. Flächenhafte Schweremessungen zur Geoidmodellierung

Ziel der flächenhaften Schweremessungen ist, das GCG2016 hinsichtlich Aktualität, Zuverlässigkeit und Genauigkeit weiter zu optimieren, um dadurch die Genauigkeit der satellitengestützten Bestimmung von Höhen im DHHN2016 weiter zu verbessern.

Mit modernen Gravimetern und GNSS-RTK Positionsbestimmungen lassen sich gegenüber den 1980er Jahren heute viel effektiver genaue und zuverlässige gravimetrische Daten für das GCG erheben.

Mittelfristig sind deshalb alte Schweremessungen an/auf Punkten, die nicht die umgebende Topographie repräsentieren (z.B. HFP an Gebäuden), und somit das GCG verfälschen können, durch neue Messungen entsprechend dieser Feldanweisung zu ersetzen.

Vor Ausführung örtlicher Arbeiten soll der vorhandene gravimetrische Datenbestand des jeweiligen Bearbeitungsgebietes, der bisher für die Berechnung des GCG berücksichtigt wurde, bezüglich seiner aktuellen GCG-Tauglichkeit (vgl. C.4.1.3.) überprüft werden.

Altpunkte, die den aktuellen Anforderungen an das GCG nicht genügen, sind der für die Geoidmodellierung verantwortlichen Stelle (derzeit das BKG) mitzuteilen und durch diese in der GCG-Datenbank entsprechend zu kennzeichnen.

Flächenhafte Schweremessungen sind auszuführen wenn:

- die Punktdichte (vgl. Tabelle in C.4.1.1.) mit geeigneten Punkten entsprechend der GCG-Tauglichkeit nach C.4.1.3. nicht erreicht wird
- die Schweredaten eine geringe Aktualität und/oder geringe Zuverlässigkeit aufweisen
- in Gebieten große Massenverlagerungen stattgefunden haben (Bergbau, Tagebau, Stauseen, ...)

Die Genauigkeit des GCG ist abhängig von der Genauigkeit der Lage-, Höhen-, und Schwerebestimmung der Schwerepunkte (SP), sowie der für die Geoidmodellierung repräsentativen Punktlage des SP.

Punktdichte und Genauigkeit der SP sind bedarfsgerecht dem technischen Stand der Geoidmodellierung anzupassen. Grundsätzlich wird empfohlen, die Anforderungen an die Genauigkeit der gravimetrischen Datenbasis für das AdV-Quasigeoidmodell (vgl. Rili-RB-AdV, Kap. 6, Abs. 4 (AdV, 2017) zu unterschreiten.

Mit den aktuell zur Verfügung stehenden Messsystemen lassen sich Genauigkeiten für die Lage ≤ 5 cm, für die ellipsoidische Höhe ≤ 5 cm, für die Schwere ≤ 50 μ Gal, ohne großen zusätzlichen Aufwand realisieren. Damit ist sichergestellt, dass mit den aktuellen Messungen auch zukünftig zu erwartende höhere Genauigkeitsforderungen an die gravimetrische Datenbasis schon heute erfüllt werden.

C.4.1. Punktauswahl

C.4.1.1 Punktdichte

Die Mindestanforderung an die Punktdichte beträgt entsprechend der aktuellen Technologie zur GCG Berechnung 1 SP auf eine Fläche von 4 km x 4 km (vgl. der Rili-RB-AdV (AdV, 2017) im Kapitel 6). Die Anzahl der zur Geoidmodellierung zur Verfügung stehenden SP

sollte in Abhängigkeit von der Rauigkeit des Schwerfeldes variieren, d.h. bei größeren horizontalen Gradienten der Bougueranomalien soll auch die Punktdichte höher sein.

Folgende Tabelle gibt eine Empfehlung:

Mittlerer horizontaler Gradient der Bougueranomalie	Anzahl SP
$\leq 1 \text{ mGal} / 4 \text{ km}$	1
$> 1 \text{ mGal} \leq 2 \text{ mGal} / 4 \text{ km}$	2
$> 2 \text{ mGal} \leq 3 \text{ mGal} / 4 \text{ km}$	3
$> 3 \text{ mGal} / 4 \text{ km}$	4 bis max. 16

Anlage 8 zeigt den Überblick über die Größenordnungen der horizontalen Gradienten der topographisch reduzierten Schwerestörungen in Deutschland unter Verwendung von 4 km x 4 km großen Flächenelementen. Im Rahmen der Genauigkeit dieser Abschätzung kann dieser Wert mit dem Horizontalgradienten der Bougueranomalie gleichgesetzt werden.

Für die Planungen der Punktlagen sind topographische Karten mit Bougueranomalien, 4 km x 4 km Gitter und ggf. mit Bodenbewegungsgebieten zu erstellen. In den Karten sollen die vorhandenen und für die Modellierung geeigneten Schwerepunkte und die Anschluss-SFP dargestellt werden. In großen Waldgebieten sind zusätzlich Orthofotos nützlich, um für GNSS-Messungen geeignete Standpunkte (z.B. Lichtungen) zu identifizieren.

Grundsätzlich soll vor der Ausführung flächenhafter Schweremessungen eine Abstimmung mit der für die GCG-Berechnung verantwortlichen Stelle (aktuell das BKG) bzgl. der notwendigen Punktdichten, in Verbindung mit dem verwendeten DGM, erfolgen.

C.4.1.2 Punktlage und Punktverteilung

Der Messort für einen SP kann unter Beachtung der folgenden Kriterien frei gewählt werden.

- repräsentativ für die umgebende Topographie, GCG-tauglich (vgl. C.4.1.3.)
- hinreichende Horizontfreiheit für die GNSS-Messung
- Gewährleistung der Sicherheit für den Messtrupp

nach Möglichkeit

- Aufstellung auf befestigter Oberfläche (z.B. asphaltierte Wirtschaftswege)
- Standorte mit geringer Mikroseismik
- gut anfahrbar und frei zugänglich

Auf eine bedarfsgerechte, möglichst gleichmäßige Verteilung der SP ist zu achten.

C.4.1.3 Einteilung der GCG- Tauglichkeit

Das Kriterium „GCG-Tauglichkeit“ (vgl. GeoInfoDok, V 7.1) gilt gleichermaßen für die „Tauglichkeit zur Ableitung repräsentativer Schwereanomalien“.

Die GCG-Tauglichkeit der Messpunkte wird wie folgt unterschieden.

Gut geeignet sind:

- Punkte im Gelände, welche die Topographie, die im genutzten DGM (aktuell DGM25) abgebildet ist, repräsentieren

Bedingt geeignet sind:

- Punkte die bis 0,2 m unterhalb oder bis 1 m oberhalb der repräsentativen Geländeoberfläche liegen
- Punkte an kleineren Gebäuden (z.B. Einfamilienhäuser)
- Punkte mit kleinflächiger umgebender Topographie (Felsen, Aufschüttungen, Vertiefungen (Größe/Ausdehnung kleiner 25 m))
- Punkte die über die Freiluftreduktion mit einer Genauigkeit $< 50 \mu\text{Gal}$ auf die Erdoberfläche reduziert werden können

Ungeeignet sind:

- Punkte an/auf Brücken, Unterführungen, Durchlässen, Mauern
- Punkte an großen Gebäuden (z.B. Kirchen)
- Punkte in Gebäuden
- Punkte an Felswänden oder an Steilhängen
- Punkte in unmittelbarer Nähe von Massenänderungen (z.B. Tagebau, Deponie, Gewässer mit stark schwankenden Wasserspiegeln)
- Punkte mit ungenügender Genauigkeit der Lage- und/oder Höhenbestimmung
- Punkte, deren Abstände zur Erdoberfläche nicht bekannt sind

C.4.2. Punktvermarkung

Grundsätzlich ist eine Vermarkung der SP nicht erforderlich. Zur Reproduzierbarkeit der Messungen und zur Qualitätskontrolle wird jedoch die Punktvermarkung (z.B. mit Bolzen, Eisenrohr, u. ä.) empfohlen.

C.4.3. Messverfahren

Als Anschlusspunkte sind SFP zu verwenden, die über aktuelle und überprüfte Schwerewerte im DHSN2016 verfügen.

Für die Bestimmung der SP können folgende Messverfahren zur Anwendung kommen:

a) Verfahren der Schleifenmessung

Die erste und letzte Messung erfolgt auf einem SFP.

Im Laufe des Messtages soll einer der SP oder der Anschlusspunkt (SFP) ein weiteres Mal gemessen werden. Dadurch wird die Driftbestimmung kontrolliert.

Die Messungen können auch an zwei SFP angeschlossen werden, wenn diese in der notwendigen Dichte vorliegen.

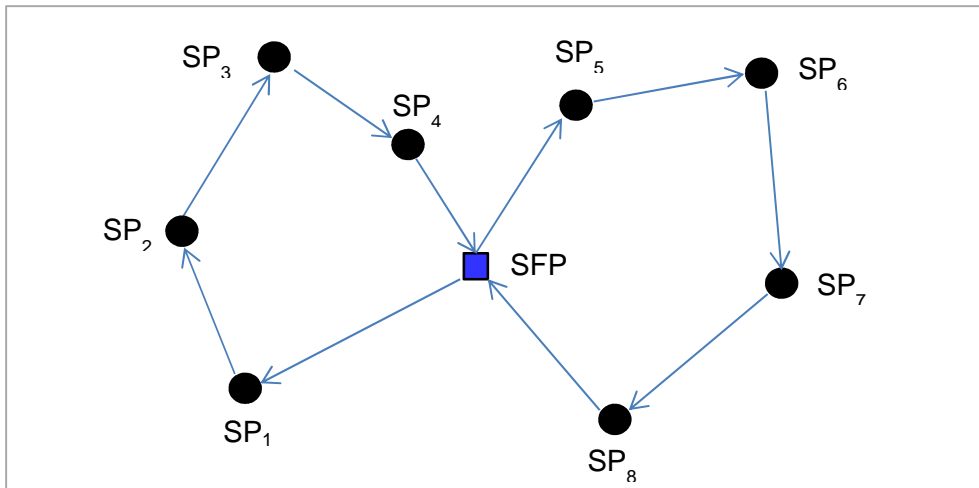


Abb. 7

b) Verfahren der Profilmessung

Auf der Hinmessung werden nach Messung des Ausgangspunktes (SFP_A) mehrere Neupunkte (SP_N) nacheinander sowie ein Zwischenpunkt (SP_z) gemessen und auf dem Endpunkt (SFP_E) abgeschlossen. Bei der Rückmessung wird erst der Endpunkt (SFP_E), weitere SP_N nacheinander, dann wieder der Zwischenpunkt (SP_z) und von dort zum Ausgangspunkt (SFP_A) gemessen.

Der Zwischenpunkt (SP_z) kann sowohl ein Neupunkt als auch ein temporärer Anschlusspunkt oder ein SFP sein.

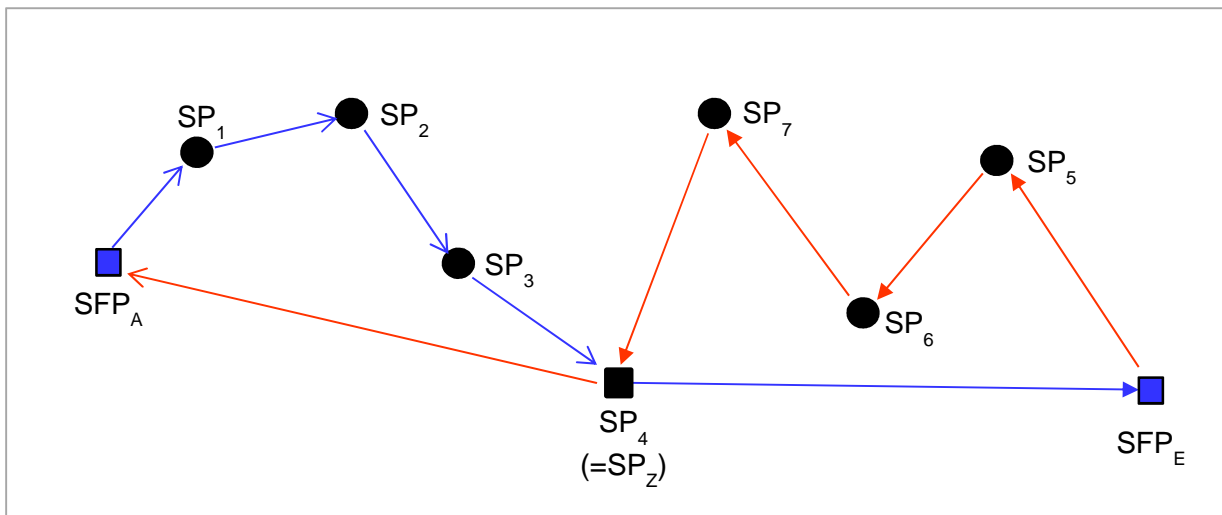


Abb. 8

Messreihenfolge in Abbildung 8:

$SFP_A - SP_1 - SP_2 - SP_3 - SP_4 - SFP_E - SP_5 - SP_6 - SP_7 - SP_4 - SFP_A$

Auf die Doppelmessung auf SP_z kann verzichtet werden, wenn der zeitliche Abstand zwischen Hin- u Rückmessung auf SFP_E für die Bestimmung der Fahrt drift ausreicht.

Alternative Messreihenfolge:

$SFP_A - SP_1 - SP_2 - SP_3 - SFP_E - SP_4 - SP_5 - SP_6 - \dots - SFP_E - SP_{xx} - \dots - SFP_A$

Bei größerem Abstand des Messgebietes zu den SFP und in Abhängigkeit von den Fahrtstrecken, kann es erforderlich sein, temporäre Anschlusspunkte (AP_{Tx}) im Messgebiet zu schaffen. Diese sind zu vermarken und so anzulegen, dass sie auch als Stützpunkte für die Geoidmodellierung (vgl. C.4.1.2.) verwendet werden können.

Die Schwerebestimmung der temporären Anschlusspunkte ist durch doppelte Profilmessung mit Anschluss an mindestens zwei SFP durchzuführen.

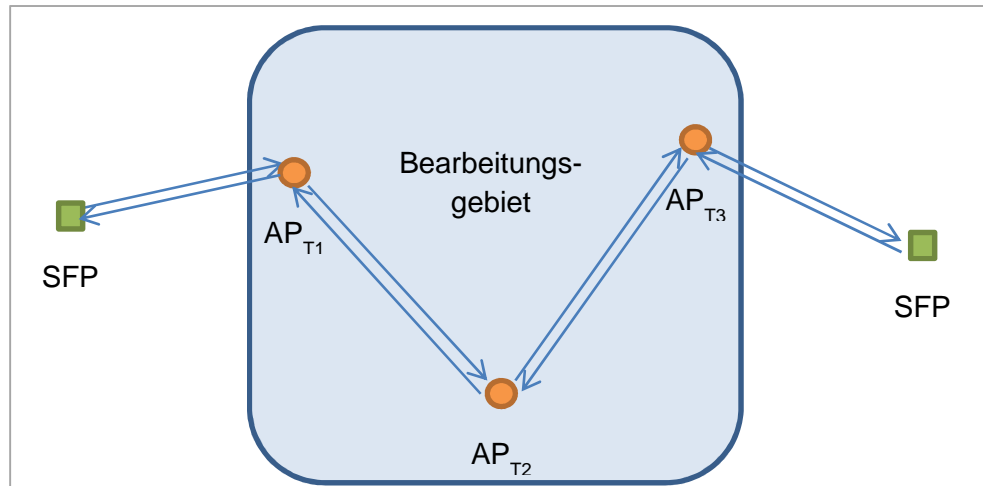


Abb. 9

Für flächenhafte Schweremessungen sind vorzugsweise selbstregistrierende Gravimeter einzusetzen, um Fehler bei der analogen Datenregistrierung auszuschließen.

C.4.4. Messungsdurchführung und Auswertung

Positionsbestimmung der SP

Die GNSS-RTK Messung unter Verwendung des **SAP^{OS}**-Dienstes (HEPS) ist mit folgenden Geräteparametern durchzuführen

- PDOP ≤ 3
- Beobachtungszeit ≥ 30 Sekunden
- Antennenhöhe 2,000 m (Standardwert der meisten GPS-RTK Systeme)

Die Höhe ist mit einer Genauigkeit von $< 3\text{mm}$ auf das Gravimeter zu übertragen. Das Gravimeter ist entweder zentrisch über oder direkt neben dem Messpunkt (SP) aufzustellen.

Besteht keine Mobilfunkverbindung zum **SAP^{OS}**-Dienst muss statisch ≥ 10 Minuten, vorteilhaft zeitgleich zur Schweremessung, gemessen werden.

Das Setup der GNSS-RTK Ausrüstung, insbesondere der höhenrelevanten Parameter, ist auf Referenzpunkten zu überprüfen.

Schweremessung und Auswertung

Die Gravimeteraufstellung soll möglichst bodennah erfolgen. Das verwendete Gravimeterstativ muss auch auf weicheren Untergründen während der Messung eine stabile Horizontierung gewährleisten. Die Messdauer ist abhängig vom Gravimetertyp und der am Messort herrschenden Mikroseismik. I.d.R. sind für registrierende Gravimeter 5×30 sec ausreichend. Weist das Gravimeter nennenswerte Einlaufeffekte auf, sollte es bereits während der GNSS-RTK Messung aufgebaut werden.

Der automatische Datenfluss zum Auswerteprogramm soll gewährleistet sein.

Für die SP ergibt sich bei Beachtung aller Vorgaben dieser Feldanweisung eine Genauigkeit von $\leq 20 \mu\text{Gal}$, hinzu kommt die Genauigkeit der Anschlusspunkte.

Messungsdokumentation

Die Messungsdokumentation hat analog C.2.3. zu erfolgen. Auf die Registrierung des Luftdrucks kann verzichtet werden.

Qualitätssicherung:

- Die Schwerewerte der Anschlusspunkte im DHSN2016 müssen gesichert bekannt sein
- 10-15% der SP sind durch Doppelmessungen zu kontrollieren (Zweitmessung nicht am selben Tag durchführen)
- Plausibilisierung der Messung durch Auswertung und Plot der Schwereanomalien. Anomalie bestimmende Einzelpunkte durch Zweitmessung verifizieren
- Digitalfoto mit Umfeld des Messpunktes. Vorteilhaft ist es die Punktnummer mit auf dem Foto abzubilden, z.B. mittels neben den Punkt gestellten Tafel oder Tablet-Computer bzw. eventuell einer gesprühten Farbmarkierung
- Uhrzeiten von GNSS-Empfänger, Gravimeter, Fotokamera synchronisieren
- Konsistenz der Punktnummern zwischen Gravimeter, GNSS-Ausrüstung u. ggf. Foto muss gewährleistet sein
- Automatischer Datenfluss vom Gravimeter zum Auswerteprogramm
- ggf. Abweichung der Punkthöhen zum DGM prüfen
- Überprüfung der GNSS-RTK Ausrüstung auf Referenzpunkten

C.4.5. Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der flächenhaften Schweremessungen sind entsprechend der Festlegungen der verantwortlichen Landesvermessungsbehörden zu dokumentieren und zu speichern.

An das BKG sind folgende Daten abzugeben:

- Punktnummer/Punktkenung
- Ellipsoidische Koordinaten (Bezugssystem ETRS89 / Realisierung 2016)
- Ellipsoidische Höhe (Bezugssystem ETRS89 / Realisierung 2016)
- Normalhöhe (DHHN2016)
- Schwerewert (DHSN2016)
- Genauigkeitskennziffern für L, H und S (entspr. Vorlagendatei des BKG)
- Messepoche (JJJJMM)

Die Daten für das BKG sind entsprechend der Vorlagendatei „format_g_datenbasis_BKG.txt“ des BKG (Anlage 9) aufzubereiten und abzugeben.

Schlussbemerkung

Die vorliegende Feldanweisung bezieht sich bezüglich der Messtechnologien, verfügbarer Messtechnik, Genauigkeitsangaben sowie der zugrunde liegenden Vorschriften und Rahmenbedingungen auf den Aktualitätsstand 02/2019.

Wenn sich einzelne der vorgenannten Komponenten aufgrund des technischen Fortschritts, Überarbeitungen und/oder Weiterentwicklungen ändern, muss diese Feldanweisung entsprechend aktualisiert werden.

Anlage 1: Beispiele geeigneter Punktvermarkungen für SFP 1.Ordnung

GGP-Pfeiler (Kopffläche 50x50 cm)



horizontale Fläche mit 3D Bolzen



Gravimeterplatte 60x60 cm



Gravimeterplatte in Betonring



SFP/HFP-Pfeiler, Kopffläche 25x25 cm, (aufbetoniert für Absolutmessungen mit A10)



SFP-Pfeiler (für Relativmessungen)



CG6 (mit NRW/RP- Dreifuss) auf SFP/TP



**Anlage 2: Datenabgabe-Protokoll Absolutschweremessung
(Beispiel für GGP 5532 0 58700)**

Datenabgabe-Protokoll Absolutschweremessung



erstellt am 08.09.2017 durch Dipl.-Ing. Andreas Reinhold
bearbeitet am 29.11.2017 durch Dr.-Ing. Reinhard Falk

Seite 1/2

Allgemeine Punktinformationen	
Punktbezeichnung	GGP 587 Siegmundsburg
Amtliche Punktnummer	5532 0 58700
Bundesland	Freistaat Thüringen
Länge	11,05725220°
Breite	50,47213575°
Ell. Höhe	
Normalhöhe (DHHN2016)	789,714 m
Vermarkung (Bezugspunkt)	Steinfeiler mit Metallmarke im Brunnenring, OK Marke

Messung	
Gemessen am	08.04.2017, 08:00 - 11:50 UTC
Gemessen von	Dipl.-Ing. Andreas Reinhold, Werner Müller
Instrumente	Absolutgravimeter A10 #012 Relativgravimeter Scintrex CG5 40496

Ergebnis der Absolutschweremessung	
Messung I (Nord)	9.809.321,87 $\mu\text{m/s}^2$ (72,3 cm über Bezugspunkt)
Messung II (Süd)	9.809.321,81 $\mu\text{m/s}^2$ (72,3 cm über Bezugspunkt)
Schwerewert am sensitiven Punkt:	9.809.321,84 \pm 0,10 $\mu\text{m/s}^2$ (72,3 cm über Bezugspunkt)

Ergebnis der Bestimmung des vertikalen Schweregradienten	
Gemessen/Gültig	von 22,0 cm bis 72,5 cm über Bezugspunkt
Vertikaler Schweregradient:	-3,260 \pm 0,022 $\mu\text{m/s}^2$ pro m

Endergebnis	
SCHWEREWERT AM BEZUGSPUNKT:	9.809.324,20 \pm 0,11 $\mu\text{m/s}^2$

Bemerkungen	
<p>- Fotos von der Vermarkung mit Schutzabdeckung für die Metallmarke (1), von der Messung mit A10-Gravimeter in Ausrichtung Nord (2), der Messung mit dem Absolutgravimeter in Ausrichtung Süd (3) und der Messung des vertikalen Schweregradienten, Aufstellung des CG5 auf dem Gradientenstativ oben (4) auf Seite 2</p> <p>- Absolutschweremessung mit IB-Stativ-Untersatz</p> <p>- die Schwere-Messungen wurden im Schutzzelt ausgeführt</p>	

Datenabgabe-Protokoll Absolutschweremessung



erstellt am 08.09.2017 durch Dipl.-Ing. Andreas Reinhold
bearbeitet am 29.11.2017 durch Dr.-Ing. Reinhard Falk

Seite 2/2

Punktbezeichnung	GGP 587 Siegmundsburg
Ämtliche Punktnummer	5532 0 58700

(1)



(2)



(3)



(4)



Anlage 3: Formular zur Geräteprüfung für Relativgravimeter SCINTREX CG-5 (Beispiel RP)

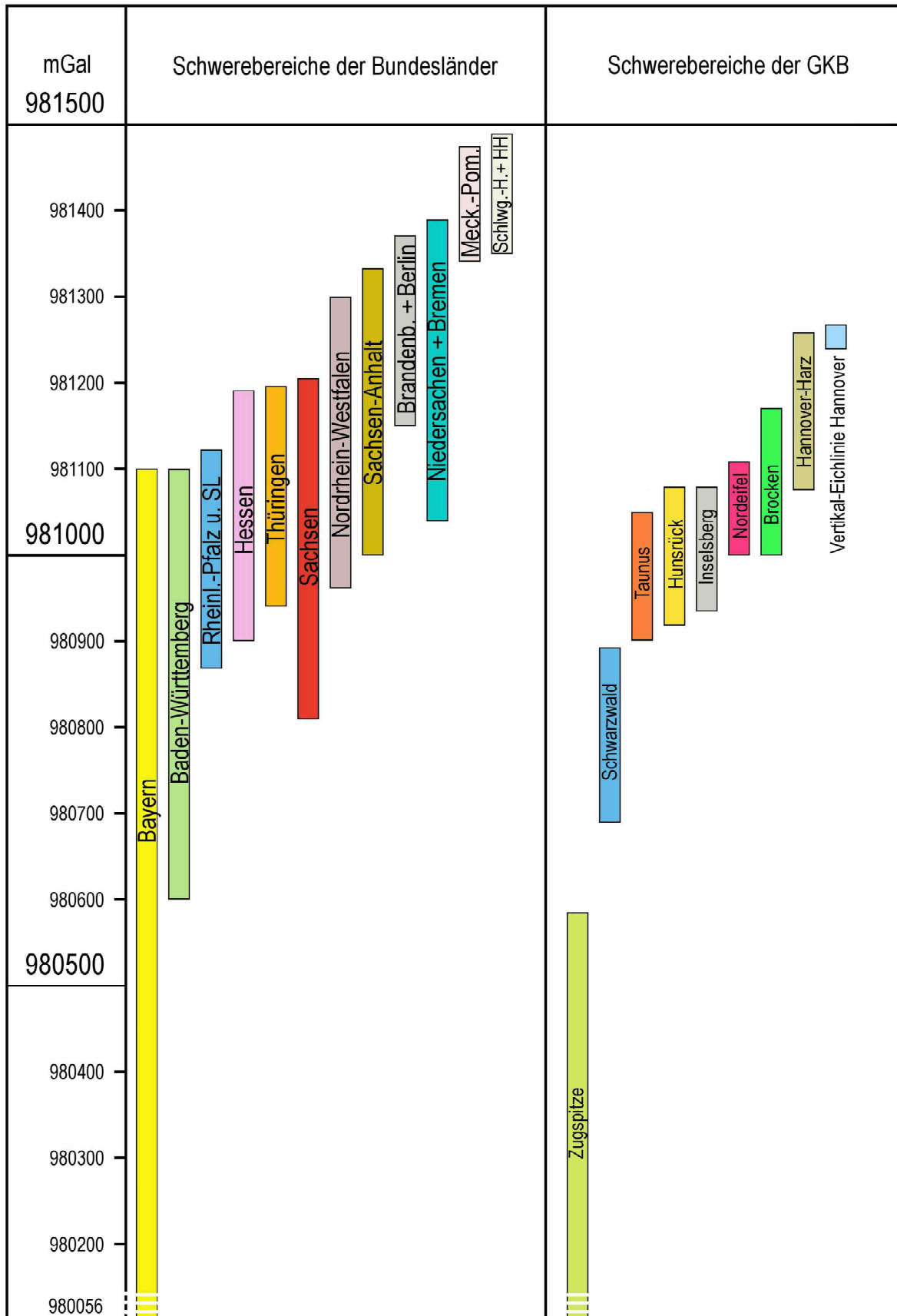
Justierung SCINTREX CG-5					
Dienststelle:	LVerGeo RP	CG-5 SN:	647		
Abw. Uhr?Korrigiert?	i.O.	Firmware:	V 4.1		
Kalibrieren der elektronischen Libellen					
Handbuch V8	ab Seite 200	Voraussetzung für Prüfung			
Intervall	Alle 2 Monate	Driftkorrektur aktuell bestimmt			
Einstellungen	1 Cycle a 120 sec	Gezeitenkorrektur aktiviert			
	Auf +/- 5 Bogensek.	Cont.Tilt.Corr aktiviert			
	Auslöseverzögerung 5 sec	L,B,h am Messort eingeben			
Adjusting Tilt Sensor Offsets (Service > Calibration: XYOFFSET)					
Datum	11.10.2018				
Old X Offset	6,4	Fehlergrenze Diff. Max. 10-20 Bogensek.			
New X Offset	5,2	5,0	5,4	5,2	ok
Old Y Offset	-73,1				
New Y Offset	-68,6	-68,4	-68,6	-68,5	ok
nächste Prüfung	11.12.2018				
Adjusting Tilt Sensor Sensitivity (Service > Calibration: XYSSENS)					
Datum	11.10.2018				
Intervall	Alle 4 Monate				
zusätzliche Voraussetzung	o.g. Prüfung				
Old X Sens.	684,3	Fehlergrenze Diff. Max. 10-20 Bogensek.			
New X Sens.t	681,8	683,7	683,7	683,1	ok
Old Y Sens.	615,7				
New Y Sens.	611,3	610,7	609,8	610,6	ok
nächste Prüfung	11.02.2019				
Sensorcheck		4,043	ok		
(siehe Handbuch ab S.190)		(Soll: 0 – 5 Volt)			
Aktueller Messwert		7350,1			
(Anm.: bei regelmäßiger Prüfung auf identischen Punkt erkennt man die Geschwindigkeit mit der sich der Messbereich des CG-5 verschiebt, Ursache: u.a.Alterungsprozess der Quartzfeder)					
Test Cross Coupling		Y0 = -2	$ Y2 - Y0 < 5$	3	ok
(siehe Handbuch ab S.212)		Y1 = -6	$ Y1 - Y0 < 5$	4	ok
		Y2 = +1			
Prüfung, ob die Achsen der elektr. Libellen senkrecht zueinander stehen (Anm.: Prüfung vor jeder Messperiode empfohlen)					
Name d. Prüfers		Datum/Unterschrift			
Vieten		11.10.2018		V1.4 LVerGeo RP	

Formular zur Geräteprüfung für Relativgravimeter SCINTREX CG-6 (Beispiel RP)

Justierung SCINTREX CG-6					
Dienststelle: LVermGeo RP		CG-6 SN: 16110010			
Abw. Uhr?Korrigiert? i.O		Firmware: 20170705-1			
Kalibrieren der elektronischen Libellen					
Handbuch Entwurf	ab Seite 4.29		Voraussetzung für Prüfung		
Intervall	Alle 2 Monate		Driftkorrektur aktuell bestimmt		
Einstellung	1 Cycle a 120 sec		Tide+Oceanload Korrektur aktiviert		
	Auf +/- 5 Bogensek.		Temp.+Tilt Korrektur aktiviert		
	Auslöseverzögerung 5 sec		L,B,h am Messort eingeben		
Tilt Calibration Test (Offsets – Einheit in xVolt)					
Datum	30.10.2018		Mittel	Prüfung	
Old X Offset	-141376	Fehlergrenze Diff. New Max. 300 *			
New X Offset	-141170	-141189	-141201	-141187	ok
Old Y Offset	-30963				
New Y Offset	-30909	-30900	-30930	-30913	ok
nächste Prüfung	30.12.2018				
Tilt Calibration Test (Sensitivities – Bogensekunden pro xVolt)					
Datum	30.10.2018				
Intervall	Alle 4 Monate				
zusätzliche Voraussetzung	o.g. Prüfung				
Old X Sens.	0,03104528	Fehlergrenze Diff. Max. ?		Mittel	Prüfung
New X Sens.t	0,03106064	0,03100619	0,03115464	0,03107382	?
Old Y Sens.	0,03103260				
New Y Sens.	0,03118566	0,03121275	0,03123764	0,03121202	?
nächste Prüfung	28.02.2019				
Aktueller Messwert		4611,734			
(Anm.: bei regelmäßiger Prüfung auf identischen Punkt erkennt man die Geschwindigkeit mit der sich der Messbereich des CG-6 verschiebt, Ursache: Alterungsprozess der Quartzfeder)					
* = Fehlergrenze ist gerätespezifisch und unterschiedlich für X- und Y-Offset (ca. 200-400)					
Name d. Prüfers		Datum/Unterschrift			
Vieten		30.10.2018			V1.1 LVermGeo RP
Seite 1					

Anlage 4: Zusammenstellung der von den Landesvermessungsbehörden, dem BKG, dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover (LIAG) und Universitäten betreuten Gravimeter- Kalibrierbasen (ehemals „Gravimeter-Eichlinien“) in Deutschland mit Darstellung der jeweils abgedeckten Schwerebereiche

1. **Taunus**, HE (Bad Soden - Großer Feldberg)
19 Festpunkte; Länge: 13 km; $\Delta h = 738$ m; $\Delta g = 143$ mGal
zuständig: *Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation*
2. **Hannover – Harz**, NI (Hannover – Torfhaus)
20 Stationen; Länge: ca. 120 km; $\Delta h = 770$ m; $\Delta g = 190$ mGal
zuständig: *Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen*
3. **Zugspitze**, BY (Garmisch – Zugspitze)
6 Festpunkte; Länge: 40 km; $\Delta h = 2220$ m; $\Delta g = 528$ mGal
zuständig: *Technische Universität München*
4. **Schwarzwald**, BW (Sasbachwalden – Hornisgrinde)
22 Festpunkte; Länge: 7 km; $\Delta h = 951$ m; $\Delta g = 202$ mGal
zuständig: *Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg*
5. **Brocken**, ST (Wernigerode – Brockengipfel)
3 Festpunkte; Länge: 24 km; $\Delta h = 854$ m; $\Delta g = 167$ mGal
zuständig: *Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt*
6. **Inselsberg**, TH (Sättelstädt – Großer Inselsberg)
3 Festpunkte; Länge: 10 km; $\Delta h = 650$ m; $\Delta g = 138$ mGal
zuständig: *Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation des Freistaates Thüringen*
7. **Nordeifel**, RP und NRW (Kempenich – Bad Godesberg)
4 Festpunkte; Länge: 75 km; $\Delta h = 390$ m; $\Delta g = 104$ mGal
zuständig: *Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - Geobasis NRW und Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz*
8. **Hunsrück**, RP (Koblenz – Hermeskeil)
4 Festpunkte; Länge: 120 km; $\Delta h = 445$ m; $\Delta g = 162$ mGal
zuständig: *Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz*
9. **Vertikal- GKB Hannover**, NI (Hochhaus der Leibniz Universität Hannover)
23 Stationen zwischen Tiefkeller und Dach; $\Delta h = 75$ m; $\Delta g = 19$ mGal
zuständig: *Leibniz-Universität Hannover*



Anlage 6: Zusammenstellung möglicher Fehlerquellen und deren Auswirkungen bzw. deren Beseitigung

Teil 1: Messung

Einfluss	Auswirkung	Berichtigung
unsachgemäße Lagerung während der Nichtbenutzung	Driftverhalten nicht linear und sprunghaft, schlechte Messgenauigkeit in den ersten Wochen des Einsatzes	Auf sachgemäße Wartung achten, Driftbestimmung mehrfach redundant ausführen
ungünstige Transportbedingungen	Fahrtdriftverhalten nicht linear und sprunghaft, ggf. große Standdrift auf dem SFP	Geeignetes Fahrzeug mit guter Federung benutzen (PKW ist besser als Transporter), Straßenbeschaffenheit insbesondere bei der Anfahrt zu SFP sollte gut sein.
große Temperaturdifferenzen zwischen Lagerort, Transport und Messung	ungünstiges Driftverhalten	Temperaturen im Fahrzeug Außentemperaturen anpassen. LCR: Keine Messungen 1.O. unter 10°C
Einsinken des Statives	Verfälschung der Ablesung	Zum Untergrund passendes Stativ verwenden (z.B.: auf Asphalt keine spitzen Füße)
Hysterese	Verfälschung der Ablesung	LCR: systematische Spindeldrehung immer von derselben Seite
Sonne	u.a. Beeinflussung der Libellen	Feldschirm benutzen
Wind	hohe Standardabweichung der Messwerte	Windschutz verwenden, Gerät möglichst niedrig aufbauen, ggf. Anzahl der Messungen erhöhen
Magnetfeld	Verfälschung der Ablesung	LCR: Gerät möglichst immer mit gleichem Azimut aufstellen, keine Messungen neben Transformatoren u. ä.
Mikroseismik	höhere Standardabweichung	SFP müssen ausreichenden Abstand von Störquellen haben, ggf. Anzahl der Messungen erhöhen, Großwetterlage berücksichtigen.
starke Mikroseismik	ungewöhnliche Instabilität der Messwerte	Kontrolle, ob es aktuell ein Erdbeben gibt (https://geofon.gfz-potsdam.de/), möglicherweise Unterbrechung bzw. Abbruch der Messung notwendig
differierende Sensorhöhen bei Verwendung unterschiedlicher Gravimetertypen	unterschiedliche Reduktionsbeträge auf SFP Vermarkung	Gleiche Sensorhöhen durch Verwendung entsprechender Stative realisieren und / oder vertikale Schweregradienten bestimmen

Zusammenstellung möglicher Fehlerquellen und deren Auswirkungen bzw. deren Beseitigung

Teil 2: Auswertung

Einfluss	Auswirkung	Berichtigung
inhomogenes SFP Feld	Klaffungen bei der freien Ausgleichung auf den Anschlusspunkten	Anschlusspunkte gleicher Genauigkeit und Aktualität verwenden, ggf. gewichten.
ungenügende Maßstabbestimmung	Klaffungen bei der freien Ausgleichung auf den Anschlusspunkten	Maßstabsbestimmung auf geeigneter Kalibrierbasis
zweifelhafte Driftbestimmung	Verfälschung der Schweredifferenzen	Festlegung von Driftansatz und Sprüngen durch den Beobachter, ggf. Wiederholung der Messung.
falsche Gezeitenreduktion	Verfälschung der Schweredifferenzen	Messdatum und verwendetes Zeitsystem kontrollieren, ggf. Partialtidenparameter anpassen. Korrekte Gezeitenreduktion über stationäre Messungen überprüfen.
falsche Luftdruckreduktion	Verfälschung der Schweredifferenzen	Für die Luftdruckreduktion müssen korrekte Höhen der SFP vorliegen. verwendete Barometer sollen kalibriert sein
falsche Sensorhöhen-Reduktion	Verfälschung der Schweredifferenzen	Plausibilisierung der Instrumentenhöhen über Vermarktungsart des SFP und Hin- / Rückmessungsvergleich, ggf. Vorzeichen prüfen.

Anlage 7: Erläuterungen zum Vertikalen Schweregradienten (VSG)

Anmerkung: Für die in der deutschen Landesvermessung gebräuchlichen Begriffe (diese werden im Weiteren verwendet) gibt es in der Wissenschaft z.T. andere Fachausdrücke. So wird der Begriff „**Freiluftgradient**“ in der Wissenschaft als Oberbegriff genutzt.

In der deutschen Landesvermessung wird mit dem Begriff „Freiluftgradient“ oft der „**Vertikalgradient der Normalschwere** (kurz: Normalgradient)“ bezeichnet, ein Gradient, der die Änderung der Normalschwere mit der Höhe im Bereich des Außenraumes der Erde beschreibt (siehe Glossar Bonatz).

Der **Vertikale Schweregradient (VSG)** beschreibt die Änderung der Schwere(-beschleunigung) mit der Höhe und ist abhängig von der geographischen Breite und weiteren Faktoren. Er wird für die Reduktion des in Sensorhöhe des Gravimeters gemessenen Schwerewertes auf die Höhe des Schwerebezugspunktes genutzt (= Schwerereduktion). Als eine Art Spezialfall des VSG anzusehen ist der Normalgradient.

Der **Normalgradient (NG)** beschreibt ebenfalls die Änderung der Schwere mit der Höhe aber im theoretischen Normalschwerefeld und wird in Deutschland mit $-308,6 \mu\text{Gal/m}$ angenommen. Dieser Wert ist ein Näherungswert, der dem realen VSG nur im oberflächennahen Außenraum der Erde und nur für ebenes Gelände mit homogener Massenverteilung sehr nahe kommt. Im DHSN82 bzw. DHSN96 wurde der NG standardmäßig genutzt, da der Einfluss des Gradienten aufgrund der geringen Sensorhöhe der genutzten LCR-Gravimeter als zu gering eingeschätzt wurde und VSG-Messungen deshalb nicht durchgeführt wurden. Der NG ist besonders im Mittel- und Hochgebirge nicht repräsentativ.

Beispiel: Ein CG-5 Gravimeter steht auf einem TP-Pfeiler (Bezugspunkt = Oberkante Pfeiler) Die Höhendifferenz zwischen dem Sensor des CG-5 und dem Schwerebezugspunkt beträgt ca. 25 cm.

Bei Nutzung des Normalgradienten ist der Schwerewert am Bezugspunkt um $77 \mu\text{Gal}$ größer als der Schwerewert am Sensor des CG-5 ($-0,25 \text{ m} \times -308,6 \mu\text{Gal/m} = 77 \mu\text{Gal}$)

Der **Vertikale Schweregradient** kann in Deutschland Werte zwischen ca. -220 bis ca. $-400 \mu\text{Gal/m}$ aufweisen (Zugspitze: $< -500 \mu\text{Gal/m}$). Werden diese beiden Extremwerte zur Schwerereduktion genutzt, betragen die Schwereunterschiede im oben genannten Beispiel zwischen Sensor und Bezugspunkt 54 bzw. 100 (125) μGal .

Die Bestimmung des VSG erfolgt durch zentrische Relativmessungen in zwei unterschiedlichen Höhen über dem Schwerebezugspunkt. Bei der Bestimmung des VSG (z.B. mit einem CG-5 Gravimeter in Verbindung mit einem Gradientenstativ) ergibt sich, gerätetechnisch bedingt, ein Messbereich von ca. $0,2 \text{ m}$ (Instrumentenhöhe bei Aufstellung unten) – ca. $0,9 \text{ m}$ (Instrumentenhöhe bei Aufstellung oben) über dem Schwerebezugspunkt (Abb. 1).

Ein oberflächennaher oder ein zu großer Messbereich ist zu meiden, da oberflächennah die Nichtlinearität des VSG stark zunimmt und bei zu hohen Messhöhen der ermittelte VSG nicht mehr repräsentativ ist.

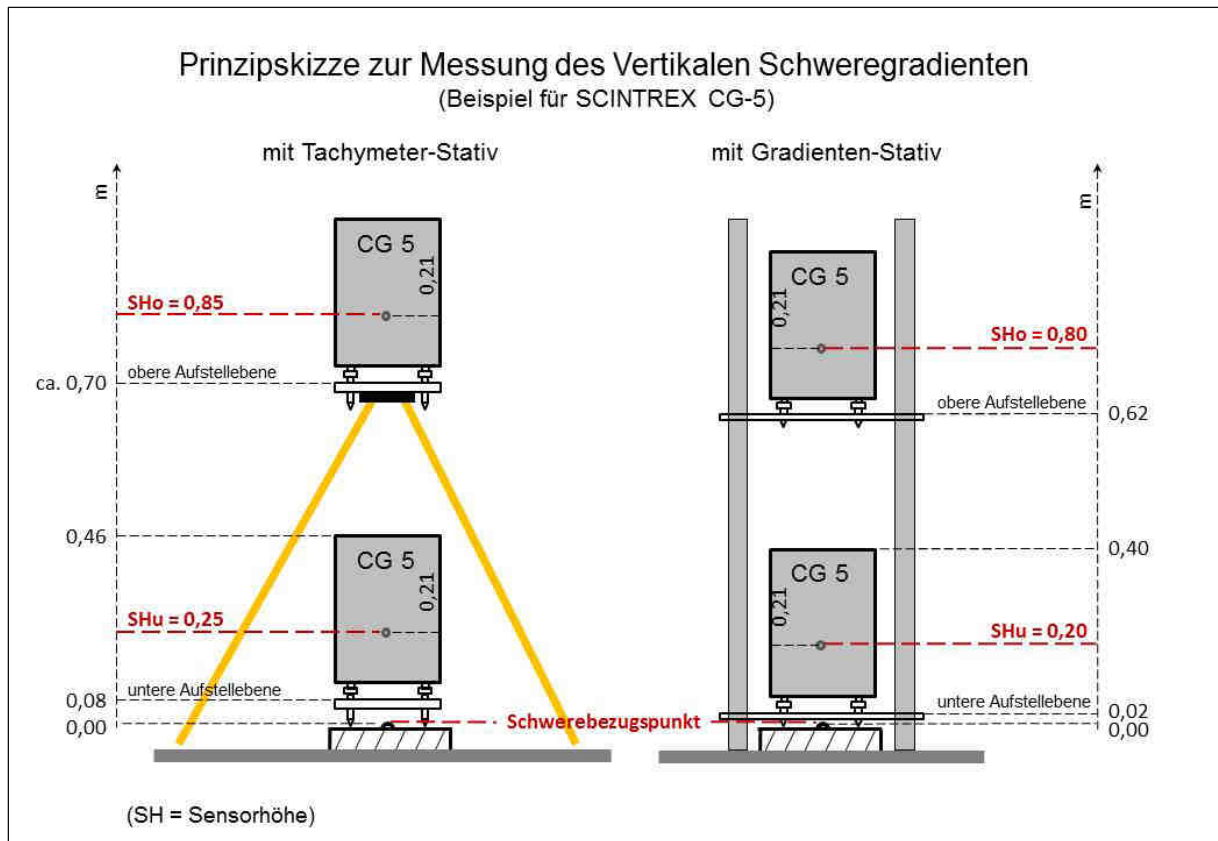


Abb. 1

Ausnahmen hiervon sind:

- Verbindung von präzisen LCR-Messungen mit CG-5 Messungen (in diesem Fall soll der VSG möglichst zwischen den entsprechenden Sensorhöhen beider Gravimeter gemessen werden)
- Die Übertragung des in ca. 1,25 m Höhe gemessenen Schwerewertes mit dem Absolutgravimeter FG-5 auf den Schwerebezugspunkt (in diesem Fall soll der VSG möglichst zwischen der Sensorhöhe des FG-5 und dem möglichst dicht über dem Schwerebezugspunkt stehenden Relativgravimeter gemessen werden)



Abb. 2

In Abb. 2 sind die VSG-Messungen des BKG im Rahmen der bisherigen Absolutschweremessungen dargestellt. Bei diesen Absolutschweremessungen wurden sowohl SFP 1.O. als auch GGP bestimmt.

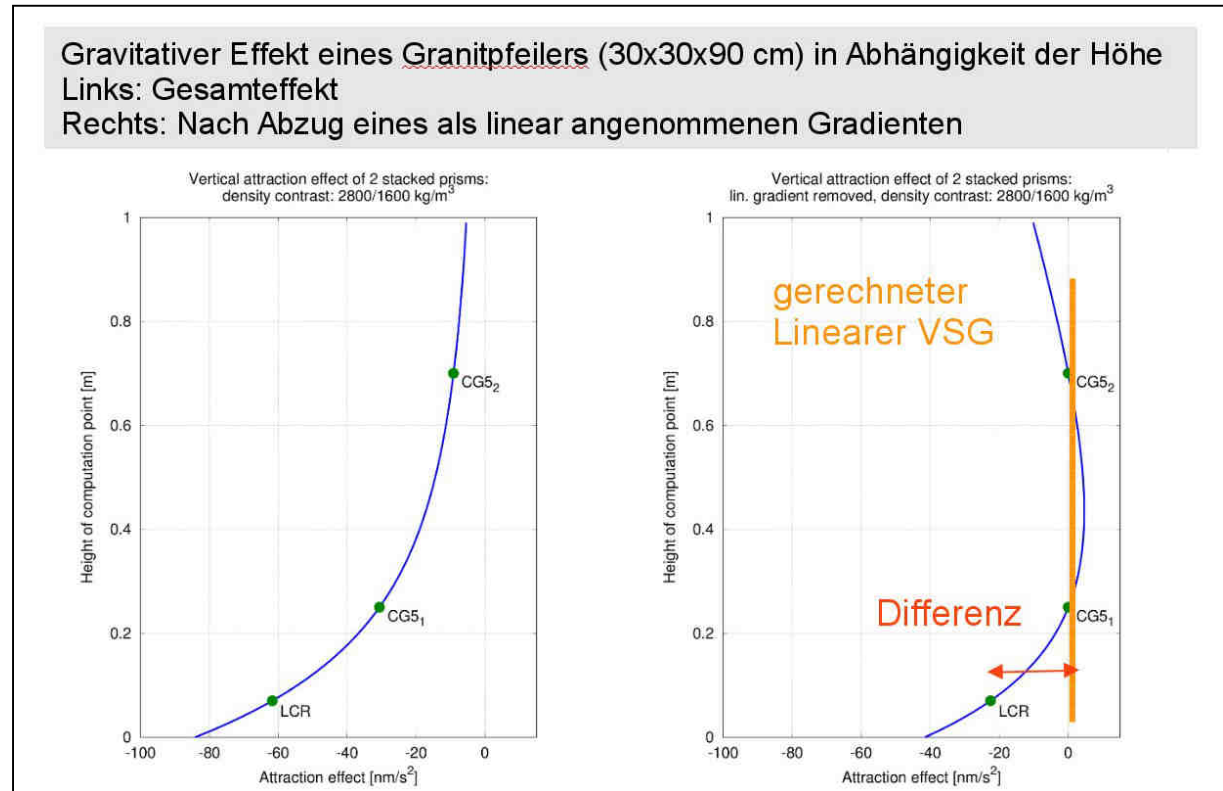


Abb. 3

Abb. 4

In Abb. 3 wurde vom BKG (Dr. Wziontek) beispielhaft der gravitative Effekt eines Granitpfeilers (30x30x90 cm) in Abhängigkeit von der Höhe modelliert. Gut zu erkennen ist der nicht lineare Verlauf des tatsächlichen VSG. Wird dieser durch die Messung in den beiden Sensorhöhen CG5₁ und CG5₂ bestimmt und als linear angenommen (Abb. 4), ergibt sich durch den in der Realität nicht linearen Verlauf eine Abweichung von ca. 2 µGal auf Sensorhöhe LCR und von ca. 4 µGal auf dem Schwerebezugspunkt (hier Pfeileroberkante). An diesem Beispiel wird deutlich, dass auch ein gemessener VSG nur eine Näherung an die Realität darstellt. Diese Näherung reicht aus, um die gemäß Rili-RB-Adv (Adv, 2017) geforderten Genauigkeitsanforderungen für den Schwerewert am Bezugspunkt zu erreichen. Der VSG wird auf einen Meter normiert angegeben, ist aber nur für den Messbereich gültig, in dem er bestimmt wurde.

Die Differenz zwischen den tatsächlichen VSG und dem Normalgradient kann unter folgenden Gegebenheiten einen großen Betrag annehmen und sich damit auf die Genauigkeit des Schwerewertes am Schwerebezugspunkt erheblich auswirken:

- raue Topographie
- Extremlagen (z.B.: Bergkuppe, Hang oder enges Tal)
- unmittelbare Nähe zu Massen (z.B.: Gebäude oder Fels)
- innerhalb der Erde (z.B.: unterirdisch vermarktete Punkte)

- Nähe zu Schwereanomalien

Die Auswirkungen eines stark vom Normalgradienten abweichenden VSG auf die Messpraxis soll an folgenden realen Beispielen exemplarisch aufgezeigt werden. Es wird eine Sensorhöhe (Höhe zwischen Sensor und Bezugspunkt) des Gravimeters von 7 cm (z.B. LCR) und eine Sensorhöhe eines Gravimeters von 25 cm (z.B. CG-5) vorausgesetzt.

Einfluss des VSG bei Vergleich von Relativ- und Absolutmessung

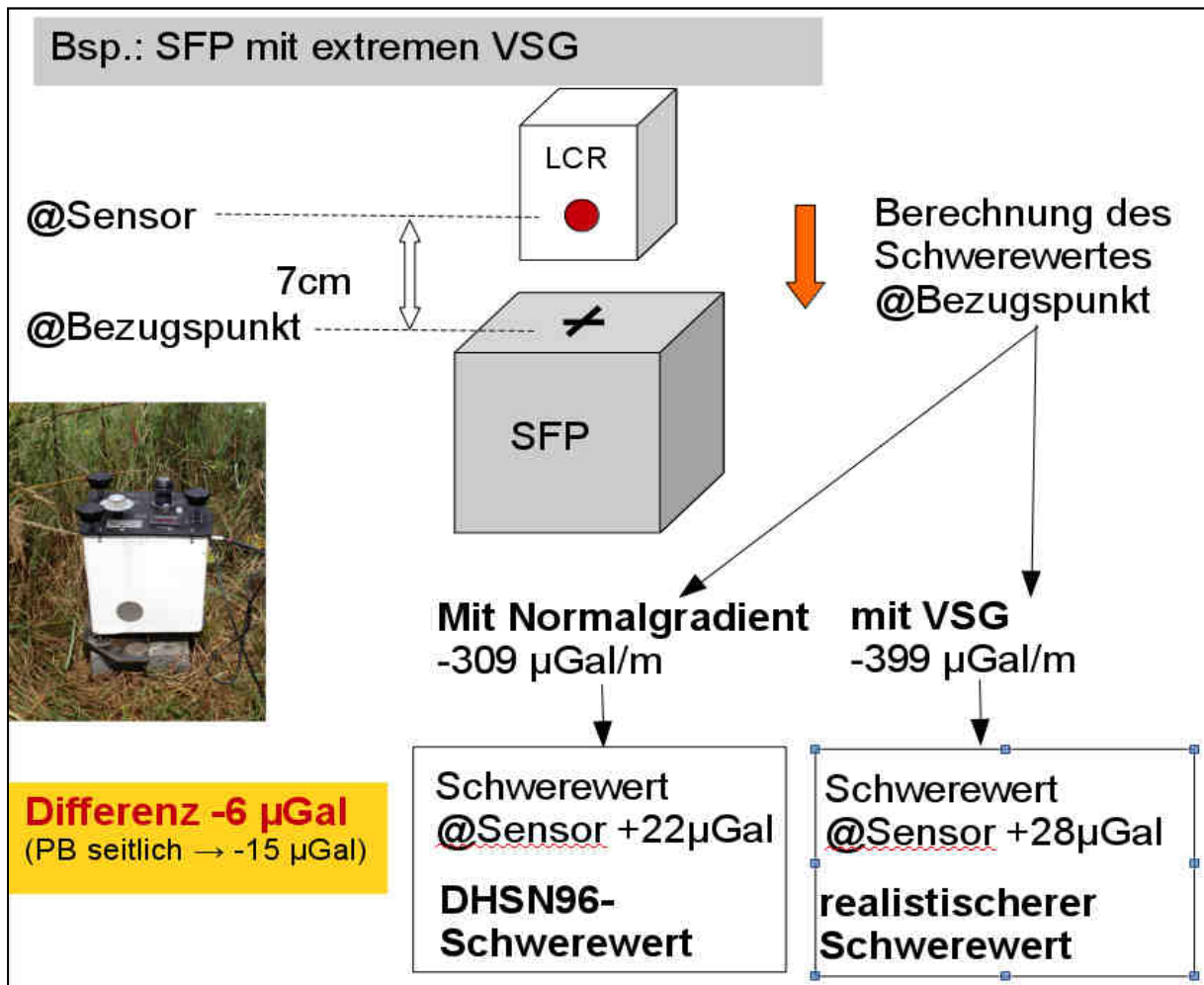


Abb. 5

Sachverhalt: Ein SFP 1.O. besitzt einen VSG der um $-90 \mu\text{Gal/m}$ vom Normalgradient abweicht. Für die ursprüngliche Berechnung des Schwerewertes dieses Punktes im DHSN96 wurde aber der Normalgradient benutzt.

Auswirkung:

1) Für die Relativgravimetrie ist der Sachverhalt unkritisch, solange der Schwerewert bei einer Folgemessung wieder mit dem gleichen Gravimetertyp (oder anderes Gravimeter aber mit ähnlicher Sensorhöhe) abgeholt wird. Der Schwerewert wird dann mit dem gleichen Fehler abgeholt mit dem er ursprünglich auch bestimmt wurde.

2) Wird der durch Relativgravimetrie ursprünglich bestimmte Schwerewert im DHSN96 verglichen mit dem Schwerewert, der mit einem A10 gemessen wurde, dann ergibt sich eine Differenz von $6 \mu\text{Gal}$ (Bezugspunkt = OK Pfeiler, $15 \mu\text{Gal}$ wenn Bezugspunkt = seitlicher

NivP 10 cm unterhalb OK Pfeiler). Der mit einem A10 in einer Höhe von ca. 70 cm gemessene Schwerewert wird mit dem gemessenen VSG auf den Bezugspunkt heruntergerechnet. Bei der Relativmessung wird dagegen der in diesem Fall ungenaue Normalgradient genutzt. Bei dieser Betrachtung bleiben die ohnehin vorhandenen Fehler der Relativ- und Absolutschweremessung unberücksichtigt.

Fazit:

- 1) Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen an das DHSN2016 sind die VSG auf allen Punkten des DHSN2016 zu messen.
- 2) Sollten extreme VSG gemessen werden und/oder wurde die Urmessung mit Gravimetern durchgeführt die eine Sensorhöhe < 10 cm besitzen, wird empfohlen, die DHSN96-Schwerewerte mit den gemessenen VSG und den ursprünglichen Aufstellhöhen zu korrigieren. Um einschätzen zu können, ab wann ein extremer VSG vorliegt, kann folgende Formel, die den Einfluss auf den Messwert beschreibt, verwendet werden: Sensorhöhe Gravimeter (in m) (über Bezugspunkt) x Differenz (Normalgradient - VSG) (in $\mu\text{Gal/m}$) $\leq \pm 5 \mu\text{Gal}$

Einfluss des VSG bei der Nutzung verschiedener Gravimetertypen mit unterschiedlichen Sensorhöhen

Sachverhalt: Der Schwerewert eines SFP wurde ursprünglich mit einem Gravimeter mit niedriger Sensorhöhe (z.B. LCR) i.V.m. dem Normalgradient bestimmt. Der VSG beträgt -350 $\mu\text{Gal/m}$. a) Der Schwerewert des SFP wird mit einem Gravimeter mit größerer Sensorhöhe (z.B. CG-5) mit Nutzung des NG abgeholt. Oder:
b) Gleichzeitige Messung mit beiden o.g. Gravimetern (Abb. 6).

Wirkung: Der Schwerewert wird vom Bezugspunkt bis zur Sensorhöhe des LCR-Gravimeters fehlerfrei abgeholt. Von der Sensorhöhe des LCR bis zur Sensorhöhe des CG-5 Gravimeters ist die Abholung des Schwerewertes aufgrund des stark vom Normalgradient abweichenden VSG fehlerbehaftet.

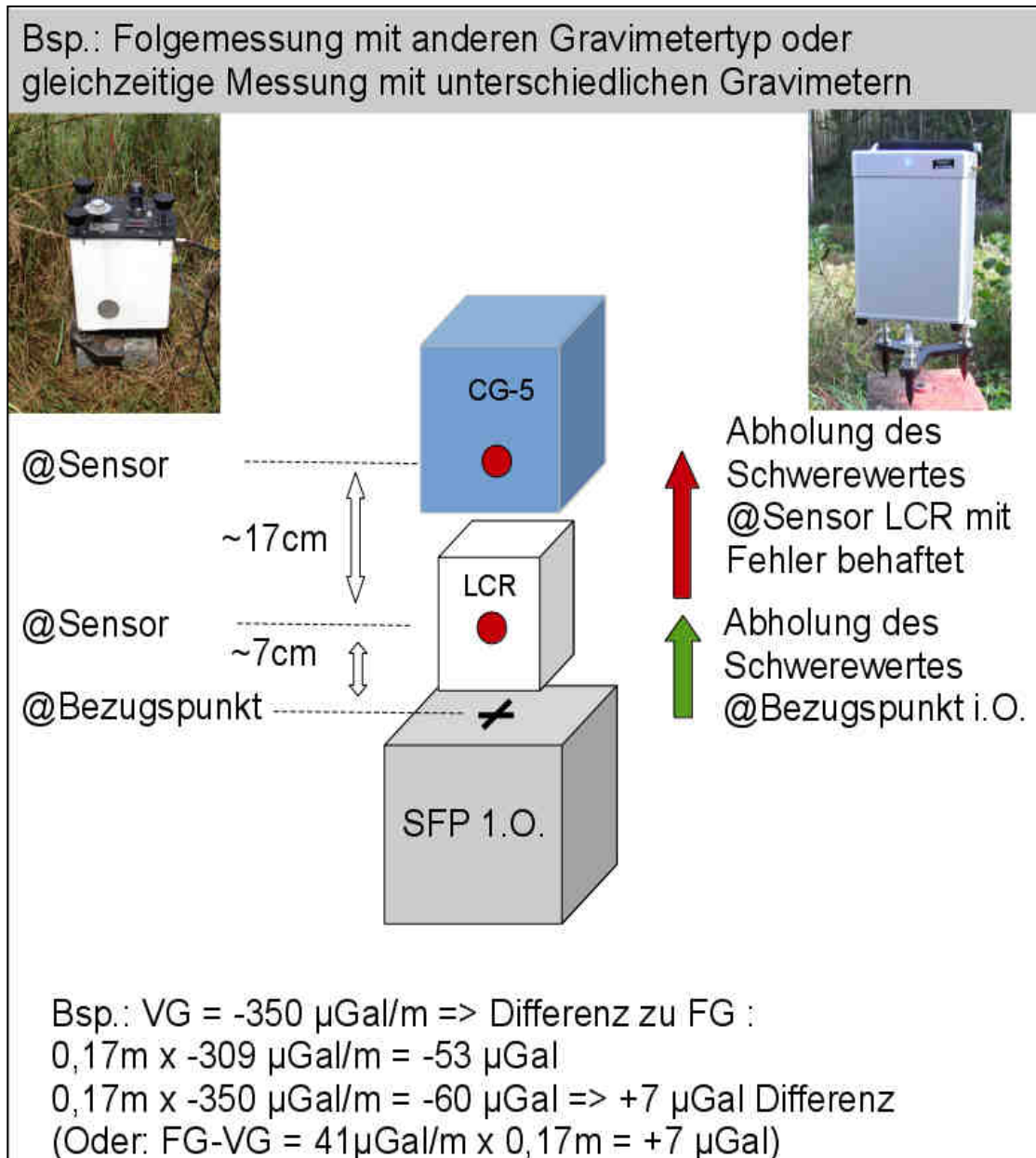


Abb. 6

Fazit: Bereits **vor** dem Beginn der eigentlichen Messungen ergeben sich Differenzen zwischen

a) Ur- und Folgemessung bzw.

b) Messungen von Gravimetern mit unterschiedlicher Sensorhöhe.

Der gemessene VSG ist für die Messung und Auswertung im Netz 1.O. erforderlich.

Einfluss des VSG auf die Relativmessung

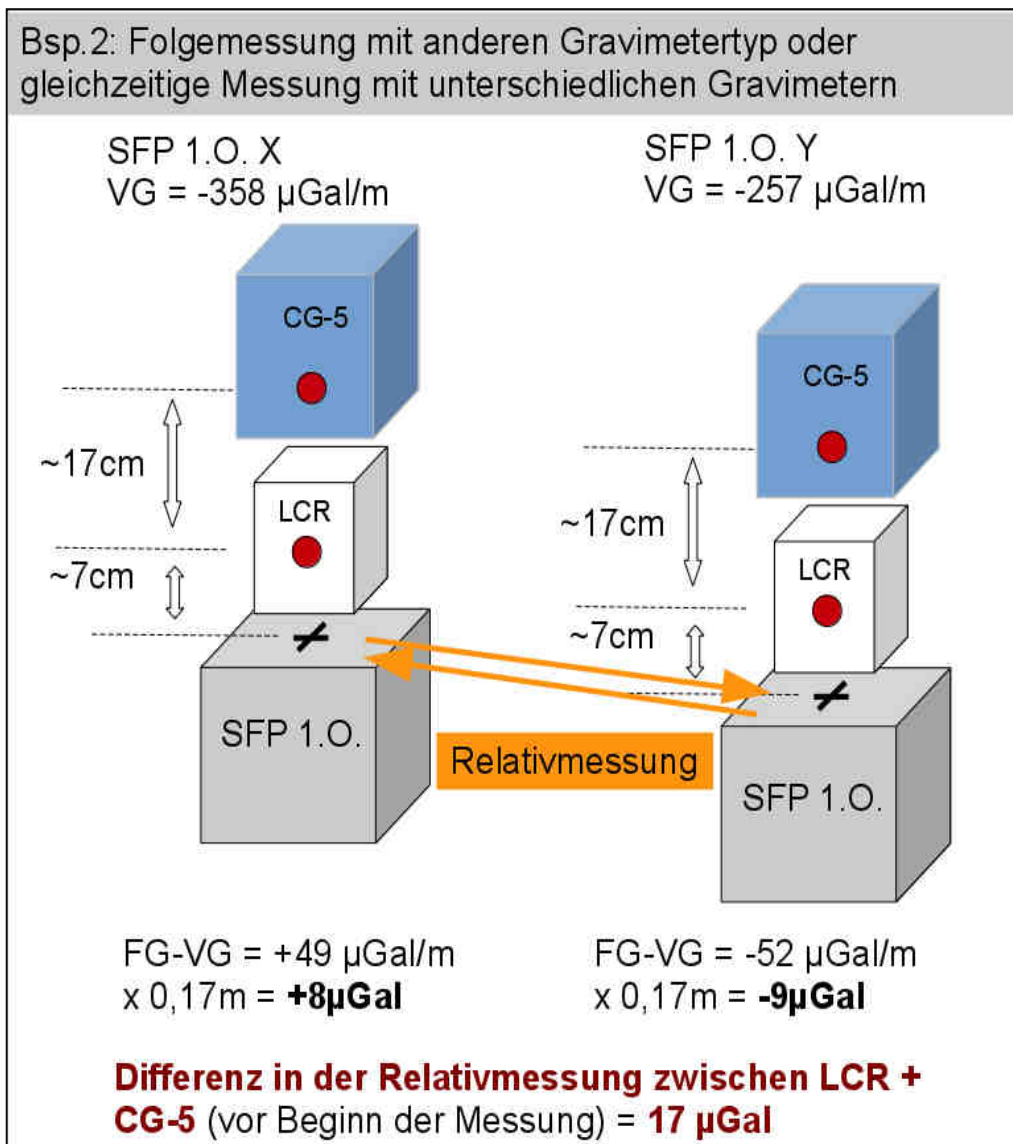


Abb. 7

Sachverhalt: Die SFP 1.O. X und Y wurden ursprünglich mit Gravimetern mit niedriger Sensorhöhe (z.B. LCR) mit Nutzung des Normalgradienten bestimmt. Die VSG wurden mit -358 und -257 $\mu\text{Gal}/\text{m}$ gemessen. a) Es wird eine Relativmessung mit einem Gravimeter mit größerer Sensorhöhe (z.B. CG-5) durchgeführt. Oder: b) Gleichzeitige Messung mit Gravimetern mit unterschiedlicher Sensorhöhe.

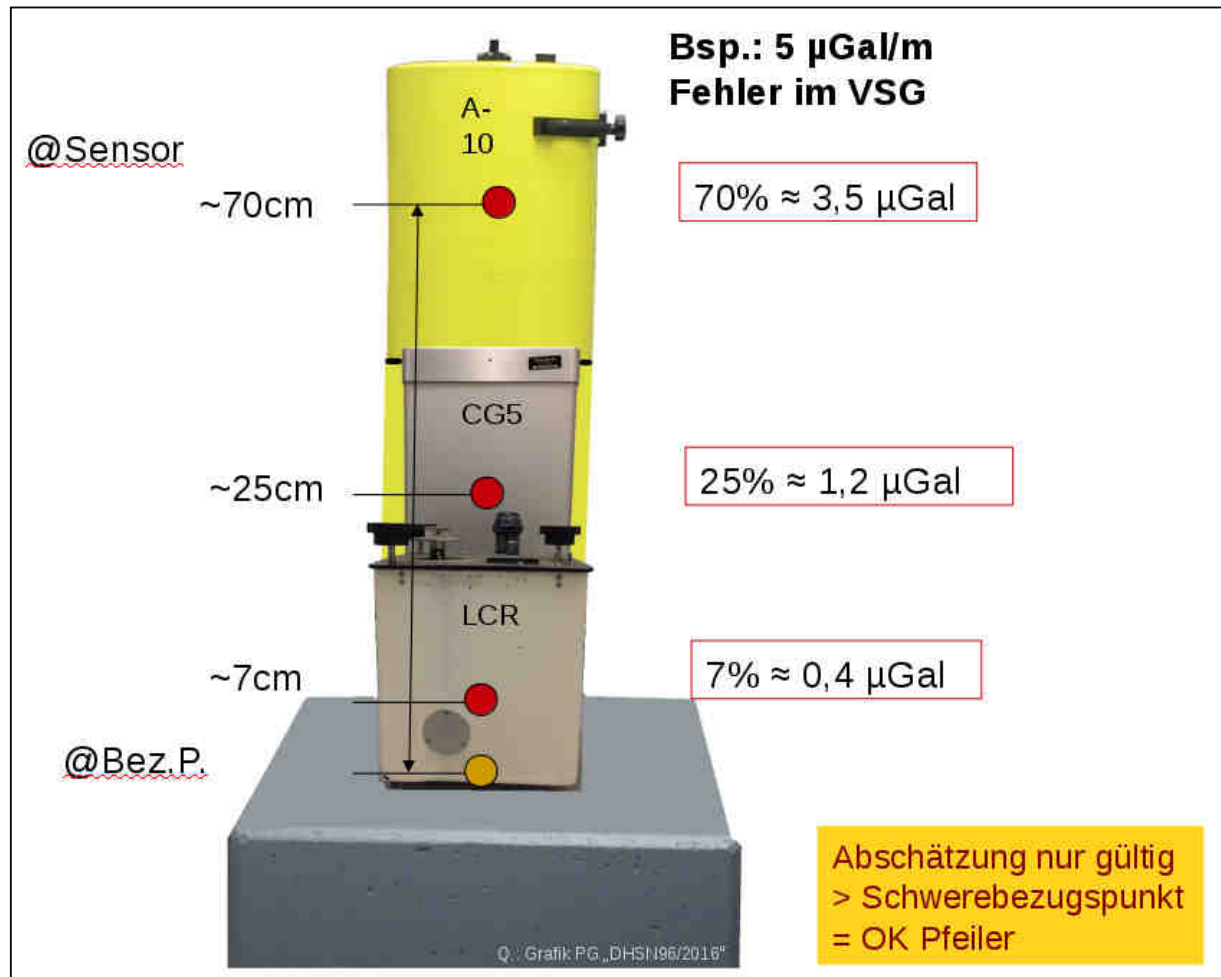
Wirkung: a) In diesem Beispiel ergibt sich bereits **vor** der eigentlichen Messung ein Fehler des relativ gemessenen Schwereunterschiedes zwischen Ur- und Folgemessung von 17 μGal . b) 17 μGal Differenz zwischen den Schwereunterschieden bei der gleichzeitigen Folgemessung mit LCR- und CG-5 Gravimeter.

Fazit: Die dargestellte Problematik im vorhergehenden Beispiel bei der Bestimmung eines relativen Schwereunterschiedes wird verstärkt, wenn der VSG einmal größer und einmal kleiner als der NG ist:

z.B.: SFP X: VSG > Normalgradient und SFP Y: VSG < Normalgradient

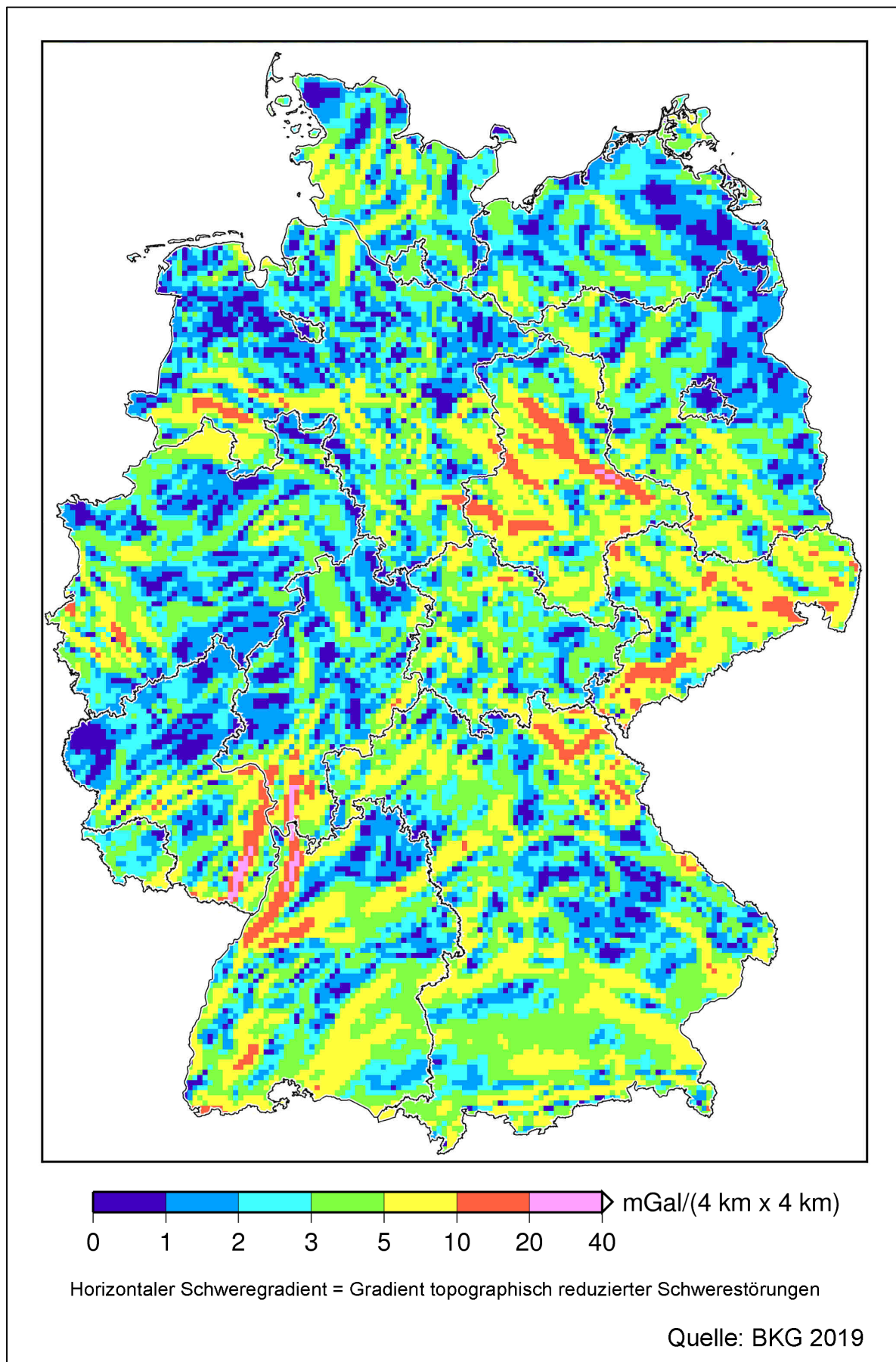
Einfluss des VSG auf die Relativ- und Absolutschweremessung

In Abb. 8 ist dargestellt, wie sich ein um $5 \mu\text{Gal}/\text{m}$ falscher VSG auf die Messung mit einem bestimmten Gravimetertyp auswirkt.



Sobald die Aufstellhöhe zunimmt (z.B.: NivP. mit seitlichen Bolzen unterhalb der OK des Pfeilers oder Niv.P. am Gebäude) nimmt auch der übertragene Fehler auf den Bezugspunkt zu.

Anlage 8: Übersicht der horizontalen Schweregradienten in Deutschland



Anlage 9: Formatbeschreibung der Datenabgabe-Datei für die Übernahme von neuen Schweredaten in die Schwere-Datenbasis des BKG (Version 2.0, Stand 2019)

Bitte verwendete Format-/ Versionsbeschreibung immer in der ersten Headerzeile angeben (Formatbeschreibung Stand vor 2018 = „Version 1.0“)

Version 1.0 ist mit Inkrafttreten dieser Feldanweisung nicht mehr zu benutzen!

Headerzeilen:

```
# Formatbeschreibung Version 2.0 (Stand 2019)
# originäre Höhe [X] h [ ] H
# Realisierung h [ ] ETRS89/DREF91/R2002 [X] ETRS89/DREF91/R2016 [ ] andere: _____
# Realisierung H [ ] DHHN92 [X] DHHN2016 [ ] andere: _____
# (weitere Kommentarzeilen optional)
```

Spalte: Bedeutung:

```
#1-30 Punktnummer/-bezeichnung (A30)
#31 Leerstelle
#32-42 Ellipsoidische Breite [°] Bezugssystem ETRS89 (F11.8)
#43 Leerstelle
#44-54 Ellipsoidische Länge [°] Bezugssystem ETRS89 (F11.8)
#55 Leerstelle
#56-63 Ellipsoidische Höhe h [m] der Festlegung/Vermarkung im Bezugssystem ETRS89 (F8.3)
#64 Leerstelle
#65-72 Physikalische Höhe H [m] der Festlegung/Vermarkung im DHHN (F8.3)
(Höhenangabe wahlweise ETRS89 oder DHHN, je nach originärer Beobachtung)
(Spezifikation der Realisierung im Header, siehe untenstehendes Beispiel)
#73 Leerstelle
#74-83 Schwerewert g [mGal] (F10.3)
(Beachte Hinweis zu Δhi)
#84 Leerstelle
#85-87 Genauigkeit der Lage-, Höhen- und Schwerekomponenten (I3)
#88 Leerstelle
#89-94 Δhi Referenzpunkt der Schweremessung über Festlegung/Vermarkung [m] (F6.3)
(Angabe zwingend! Sofern Schwerewert g bereits auf Vermarkung reduziert ist, bitte „0.000“ angeben!)
#95 Leerstelle
#96-98 Δhp Höhe der Festlegung/Vermarkung über dem Geländenniveau [m] (F5.1)
#99 Leerstelle
#100-105 Messepoche (YEARMM) (I6)
#
#SPALTE BESCHREIBUNG KENNZIFFER KLASSE
#85 Lagegenauigkeit [m] 1 < 1
# 2 = 1 < 20
# 3 = 20 < 100
# 4 = 100 < 1000
# 5 = 1000
# 0 unbekannt
#86 Höhengenaugigkeit [m] 1 < 0.05
# 2 = 0.05 < 0.1
# 3 = 0.1 < 1
# 4 = 1 < 10
# 5 = 10 < 100
# 6 = 100
# 0 unbekannt
#87 Schweregenauigkeit [mGal] 1 < 0.01
# 2 = 0.01 < 0.05
# 3 = 0.05 < 0.1
# 4 = 0.1 < 0.5
# 5 = 0.5 < 1
# 6 = 1 < 3
# 7 = 3 < 5
# 8 = 5 < 10
# 9 = 10
# 0 unbekannt
```

Beispiel:

```
# Formatbeschreibung Version 2.0 (Stand 2019)
# originäre Höhe [X] h [ ] H
# Realisierung h [ ] ETRS89/DREF91/R2002 [X] ETRS89/DREF91/R2016 [ ] andere: _____
# Realisierung H [ ] DHHN92 [X] DHHN2016 [ ] andere: _____
# PKN Lat(°) Lon(°) h (300) H (170) g (130) lhs dh_i dh_p Date
4935821100 51.01342828 11.65466067 335.350 289.711 981092.972 112 0.000 1.5 201810
4936821000 51.04169409 11.78866580 330.161 284.666 981097.532 112 0.000 0.0 201810
4936821000 51.04169409 11.78866580 330.161 284.666 981097.312 111 0.700 0.0 201902
4936821200 51.01234567 11.89012345 123.456 981132.108 112 0.000 -0.5 201902
```