

---

## PROBLEME DER GRAVIMETERKALIBRIERUNG IN DER PRÄZISIONSGRAVIMETRIE

B. Meurers

Universität Wien

---

### Abstract

At precise gravity measurements problems can arise with respect to temporal variations of the instrumental calibration factor function. LaCoste&Romberg (LCR) gravimeters are known to have nonlinear scale factor functions consisting of aperiodical and cyclic components due to imperfections of the mechanical transfer system which is used for compensating the spring length variations caused by changing gravity. By applying electrostatic feedback systems these problems can be reduced but not removed. Therefore the investigation of the calibration accuracy and the long term stability of calibration factor functions both of the LCR and the feedback system is very important in high precise gravity measurements.

A long time observation of the LCR D-9 equipped with a SRW-D feedback system shows irregular time variations both of the linear and the nonlinear component of the feedback calibration factor function superimposing a long term drift. By investigating simultaneously the nonlinearity of the LCR scale factor function they are proved to be relevant and not caused by measuring errors or possible gravity variations at the calibration line. Repeated measurements of the cyclic errors indicate a long term instability of the scale factor function of the LCR D-9. Thus besides a long term control additional detailed calibration procedures are necessary immediately before and after high precise gravity measuring campaigns to determine possible irregular variations of the LCR and feedback calibration factors.

### 1. Einleitung

Obwohl eine wesentliche Steigerung der Meßgenauigkeit in der Präzisionsgravimetrie durch die Ausrüstung von LaCoste&Romberg Gravimetern mit elektrostatischen Feedback-Systemen erzielt wurde (z.B. Casten and Hausmann 1990), zeigen zahlreiche mikrogravimetrische Untersuchungen, daß bei der Vermessung hochpräziser gravimetrischer Netze erst durch den gleichzeitigen Einsatz einer großen Instrumentenanzahl eine Genauigkeit von 1  $\mu\text{Gal}$  erreicht wird, die beispielsweise bei vielen geodynamischen Fragestellungen anzustreben ist. Bei den 1989 in Sevres/Paris durchgeführten Relativmessungen im Rahmen der letzten internationalen Vergleichskampagne für Absolutgravimeter ergab sich trotz fast ausschließlicher Verwendung von mit Feedback-Systemen ausgerüsteten LCR-Geräten keine wesentliche Verbesserung der Netzgenauigkeit (Becker et al. 1990). Die einzelnen Meßgeräte bringen zwar jeweils für sich allein Resultate hoher Konsistenz, an einzelnen Schwerstationen treten aber beim Vergleich verschiedener Gravimeter inakzeptabel hohe Abweichungen auf. Hierin manifestiert sich offenbar die generelle Problematik der Instrumentenkalibrierung, als deren

Folge sich systematische Fehler auswirken können. Da die in der Präzisionsgravimetrie beobachteten Schweredifferenzen den meistens auf einige mGal begrenzten Meßbereich überschreiten, besteht die Kalibrierproblematik nicht nur hinsichtlich der Feedback-Systeme selbst, sondern auch in bezug auf das mechanische Übertragungssystem der LCR-Gravimeter.

## 2. LCR-Gravimeter ohne Feedback-System

Die Skalenfaktorfunktion eines LCR-Gravimeters ist erst dann vollständig bestimmt, wenn neben dem linearen Skalenfaktor auch die aperiodischen nicht-linearen Anteile der Skalenfaktorfunktion (z.B. Götze und Meurers 1983) sowie die periodischen Fehler nach Betrag und Phase angegeben werden können. Die theoretischen Perioden sind ausreichend gut bekannt und hängen von den Übersetzungsverhältnissen im mechanischen Übertragungssystem ab (Becker 1984). Ihre Amplituden sind extrem geräteabhängig und können bis zu 10  $\mu$ Gal betragen (Valliant 1991). Die Bestimmung der Skalenfaktorfunktion erfolgt meistens auf horizontalen oder vertikalen Eichstrecken. Dabei besteht ein prinzipielles Problem darin, daß unterschiedlich große Schwereänderungen an einzelnen Stationen der Eichlinie z.B. durch gravitative Einflüsse von Grundwasser- oder Bodenfeuchteschwankungen nicht auszuschließen sind. Andererseits stellt sich die Frage nach der zeitlichen Konstanz der Skalenfaktorfunktion von LCR-Gravimetern. Hierin zeigt sich ein grundsätzliches Dilemma der relativen Kalibrierverfahren, denn es kann ohne zusätzliche absolute Meßmethoden nicht zwischen Schwereänderungen und Skalenfaktorvariationen unterschieden werden. Darüber hinaus muß vor allem auf Laboreichstrecken in Gebäuden mit Gerätebedingten, systematischen Einflüssen auf das Gravimeter (z.B. künstliche Magnetfelder) gerechnet werden.

Durch die Verwendung von Feedbacksystemen wird das Problem der Nichtlinearität der Skalenfaktorfunktion beseitigt, solange die Beobachtungen im Meßbereich des Feedbacksystems erfolgen. Nichtlinearität und periodische Fehler können mit ihrer Hilfe auf relativ schnellem Wege durch den Vergleich konstanter Meßspindelverstellungen an unterschiedlichen Skalenwertpositionen mit entsprechenden Spannungsdifferenzen am Feedback-Ausgang bestimmt werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Verringerung der Neigungsempfindlichkeit des Gravimeters, da die Geometrie des Federsystems und seiner Aufhängung und somit auch die Astasierungseigenschaften konstant bleiben. Im stationären Einsatz, z.B. bei der Bestimmung der Erdgezeitenparameter, wird außerdem die instrumentell bedingte Phasenverzögerung und Amplitudendepression beseitigt. Die Kalibrierproblematik ist allerdings noch immer vorhanden und besteht in diesem Fall in der Bestimmung der Eichfunktion des Feedback-Systems. Letztere läßt sich im wesentlichen durch eine lineare Beziehung zwischen der Spannung  $U$  am Feedback-Ausgang und dem relativen Schwerewert  $g$  beschreiben, allerdings enthält sie meistens auch einen vergleichsweise kleinen, nichtlinearen Anteil:

$$g = a \cdot U + b \cdot U^2$$

Auch in diesem Fall erhebt sich die Frage nach der zeitlichen Konstanz der Eichfunktion. Die Feedback-Parameter  $a$  und  $b$  können durch folgende Kalibriermethoden bestimmt werden:

- *Messung der Schweredifferenzen auf einer vertikalen oder horizontalen Laboreichstrecke*, wobei wie bei der Kalibrierung der LCR-Skalenwertfunktion das Problem von möglichen Schwereänderungen und systematischen instrumentellen Einflüssen existiert.
- *Anregung künstlicher Vertikalbeschleunigungen (z.B. Van Ruymbeke 1985)*.
- *Vergleich mit Absolutschweremessungen*. Bei dieser Methode stehen allerdings nur kleine Referenzsignale (Erdgezeiten) zur Verfügung. Außerdem wirkt sich die a priori unbekannte Drift des LCR-Gravimeters ungünstig auf die erzielbare Genauigkeit aus.
- *Durchführung des Zylinderringexperiments (Varga et al. 1991)*. Ähnlich wie bei einer Parallelbeobachtung mit einem Absolutgravimeter liegen die Referenzsignale in der Größenordnung von nur etwa 0.2 mGal.

### 3. Zeitliche Änderung der Feedback-Eichfunktion

Das LCR D-9 wurde 1986 mit einem Feedbacksystem SRW-D (Schnüll et al. 1984) ausgerüstet und an der vertikalen Laboreichstrecke in Hannover (Kanngieser et al. 1983) kalibriert. Zur Erfassung möglicher zeitlicher Veränderungen der Feedback-Parameter erfolgte mit der gleichen Gerätekonfiguration unmittelbar anschließend die Einrichtung einer vertikalen Laboreichstrecke in Wien. Sie besteht aus insgesamt 6 Schwerestationen und deckt bei einem maximalen Schwereunterschied von über 5 mGal den kompletten Meßbereich des Feedback-Systems ab. Inzwischen liegt eine mehr als siebenjährige Beobachtungsreihe auf dieser Eichstrecke vor. Fig. 1 zeigt die zeitlichen Veränderungen der gemessenen Feedback-Spannungsdifferenz an den Endpunkten. Sie lassen sich durch einen ausgeprägten linearen Trend beschreiben, von dem allerdings einzelne Resultate stellenweise sehr stark abweichen.

Bezüglich zeitlicher Veränderungen der Feedback-Eichfunktion ist zu klären, inwieweit diese Abweichungen physikalisch relevant sind, oder ob sie als Folge unvermeidlicher Meßfehler einerseits bzw. eventueller Schwereänderungen andererseits auftreten. Dazu wurden die Feedback-Parameter durch nichtlineare Regression für jede Eichmessung getrennt berechnet. Deren zeitlicher Verlauf wird in Fig. 2 dargestellt. Sowohl der lineare als auch der nichtlineare Term zeigen eine signifikante Abnahme mit der Zeit, die durch die Wiederholungsmessungen an der Eichlinie in Hannover (offene Symbole) bestätigt wird. Auch hier zeigen

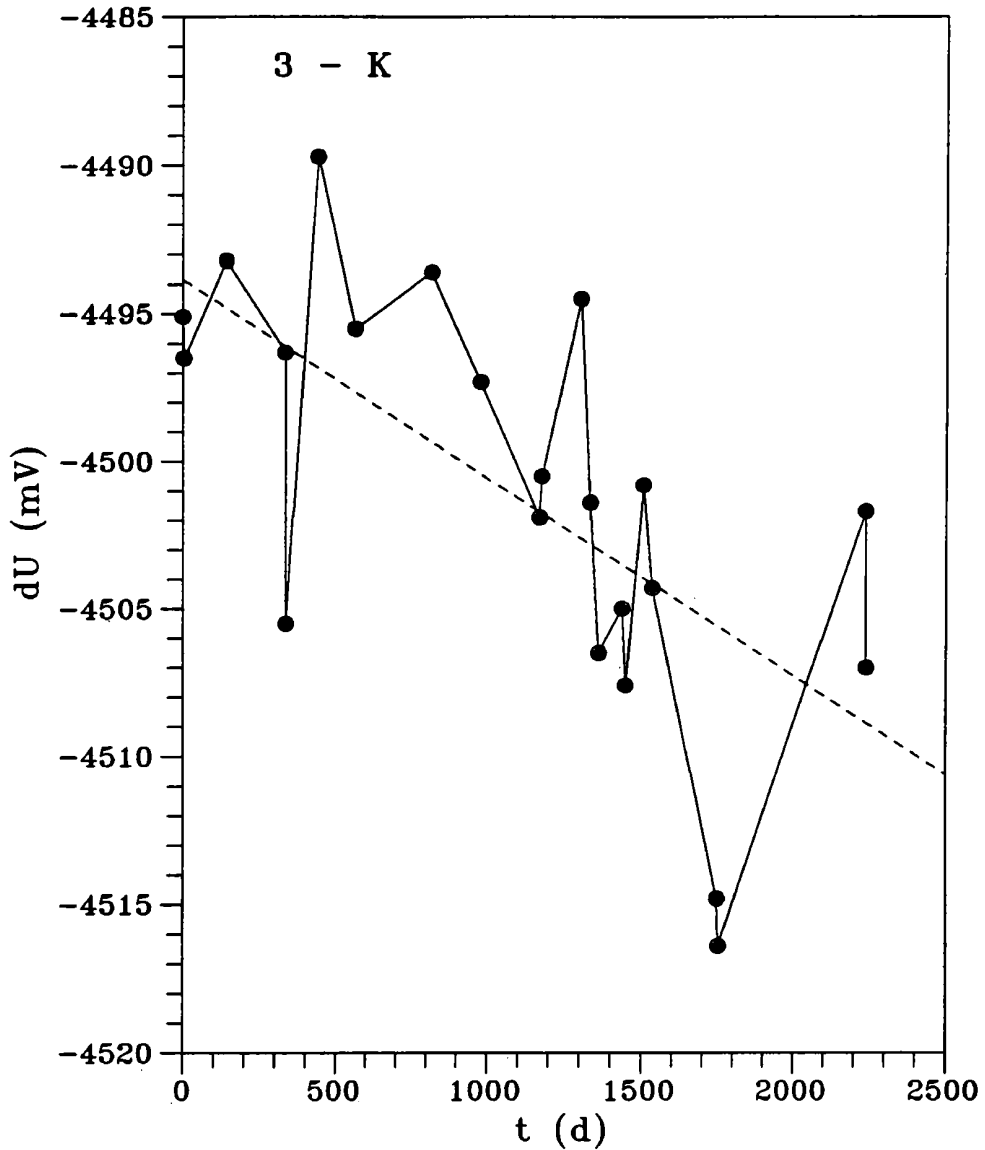


Fig. 1: Zeitlicher Verlauf der Feedback-Ausgangsspannungsdifferenzen des LCR D-9 SRW-D zwischen den Endpunkten der vertikalen Laboreichstrecke in Wien

sich große Abweichungen von den Trendfunktionen und es stellt sich die Frage nach deren physikalischer Interpretation.

Sie kann durch Auswertung gleichzeitiger Messungen zur Bestimmung der Nicht-linearität der Skalenfaktorfunktion des LCR beantwortet werden. Letztere läßt sich bekanntlich durch den Einsatz des Feedbacksystems auf schnelle Weise ermitteln, indem die zu konstanten Meßspindelverstellungen gehörenden Spannungen am Feedback-Ausgang an verschiedenen Skalenwertpositionen beobachtet werden. Benützt man dabei den vollen Meßbereich des Feedback-Systems, so kann

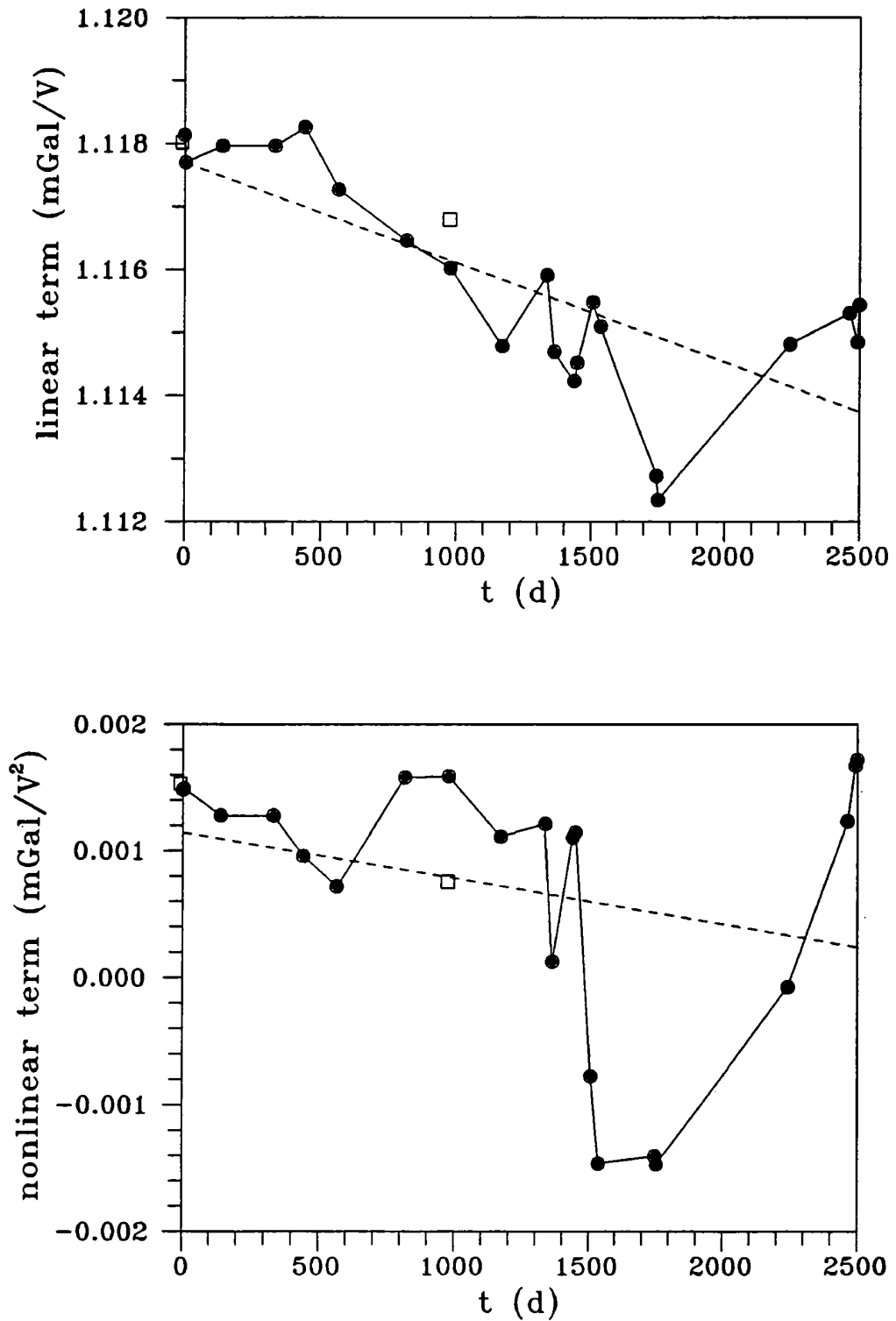


Fig. 2: Zeitlicher Verlauf des linearen (oben) und nichtlinearen (unten) Terms der Feedback-Eichfunktion nach Beobachtungen auf der vertikalen Laboreichstrecke in Wien. Die offenen Symbole markieren die entsprechenden Resultate der Laboreichstrecke in Hannover.

man einerseits die Extremwerte bei maximalen Spannungsbeträgen auswerten, andererseits aber auch die Spannungsdifferenzen zwischen Extremum und der dem Skalenwertmittel entsprechenden Feedback-Spannung, die im allgemeinen nahe bei Null liegt. Die Spannungsextrema unterscheiden sich größenordnungsmäßig nur durch ihr Vorzeichen, so daß der nichtlineare Term bei der Umrechnung von Spannungsdifferenzen in Schwereunterschiede nur sehr geringen Einfluß hat. Im Gegensatz dazu wird er aber im zweiten Fall maximal wirksam.

Fig. 3 stellt das Ergebnis einer diesbezüglichen Messung unmittelbar nach der Implementierung des Feedback-Systems in das LCR D-9 und einer Wiederholungsmessung im Jahre 1991 dar. Letztere erfolgte zu einem Zeitpunkt, an dem extreme Abweichungen von den Trendfunktionen des linearen bzw. nichtlinearen Termes beobachtet werden können (vgl. Fig. 2,  $t = 1750$  d). Bei der Berechnung der in Fig. 3 gezeigten Nichtlinearitätsfunktionen des LCR wurden jene Feedback-Parameter eingesetzt, die sich durch Interpolation gemäß der entsprechenden Trendfunktionen (Ausgleichsgerade in Fig. 2) ergeben. Die auf der Auswertung der Spannungsextrema beruhenden Resultate zeigen zunächst, daß sich jeweils ähnliche mittlere Ausgleichsfunktionen für die Abhängigkeit der mit der Feedback-Eichfunktion berechneten Schwereunterschiede von der mittleren Skalenwertposition ergeben. Allerdings können bezüglich der Einzelergebnisse größere Unterschiede zwischen beiden Meßreihen festgestellt werden. Die Unterschiede an benachbarten Skalenwertpositionen liegen in der Größenordnung von 5 - 10  $\mu\text{Gal}$ .

Wertet man dagegen mit derselben Feedback-Eichfunktion die Differenzen zwischen der mittleren Skalenwertposition und dem dazugehörigen Maximum bzw. Minimum aus, so ergibt sich das in Fig. 4 dargestellte Bild, das im Falle der Wiederholungsmessung extrem große Unterschiede von bis zu 30  $\mu\text{Gal}$  an benachbarten Skalenwertpositionen zeigt. Dies ist ein deutlicher Hinweis dafür, daß die verwendete Feedback-Eichfunktion vor allem hinsichtlich des nichtlinearen Terms inkorrekt ist. Setzt man dagegen die für den Zeitpunkt der Messung berechneten Parameter (Fig. 2) ein, so verringern sich die in Fig. 4 sichtbaren Differenzen erheblich (Fig. 5). Dieses Resultat beweist, daß die in Fig. 2 beobachteten Abweichungen der Feedback-Parameter von ihren Trendfunktionen relevant sind, und ihre Ursache weder auf tatsächliche Schwereänderungen auf der vertikalen Laboreichstrecke in Wien noch auf Meßfehler allein zurückführbar sind.

Daraus folgt, daß der zeitliche Verlauf der Veränderungen in den Feedback-Parametern nicht durch eine einfache Trendfunktion beschrieben werden kann. Unmittelbar vor und nach dem Einsatz eines Meßsystems in der Präzisionsgravimetrie sind daher exakte Kalibrierungen des Feedback-Systems unbedingt erforderlich. Außerdem sollte zur Vermeidung bzw. Reduzierung systematischer Fehler ein Meßbereich gewählt werden, der symmetrisch zum Nullpunkt der Feedback-Ausgangsspannung liegt. Es erscheint fraglich, ob die Ausnutzung des gesamten Meßbereiches sinnvoll ist, solange nicht eine exakte Kalibrierung gesichert ist.

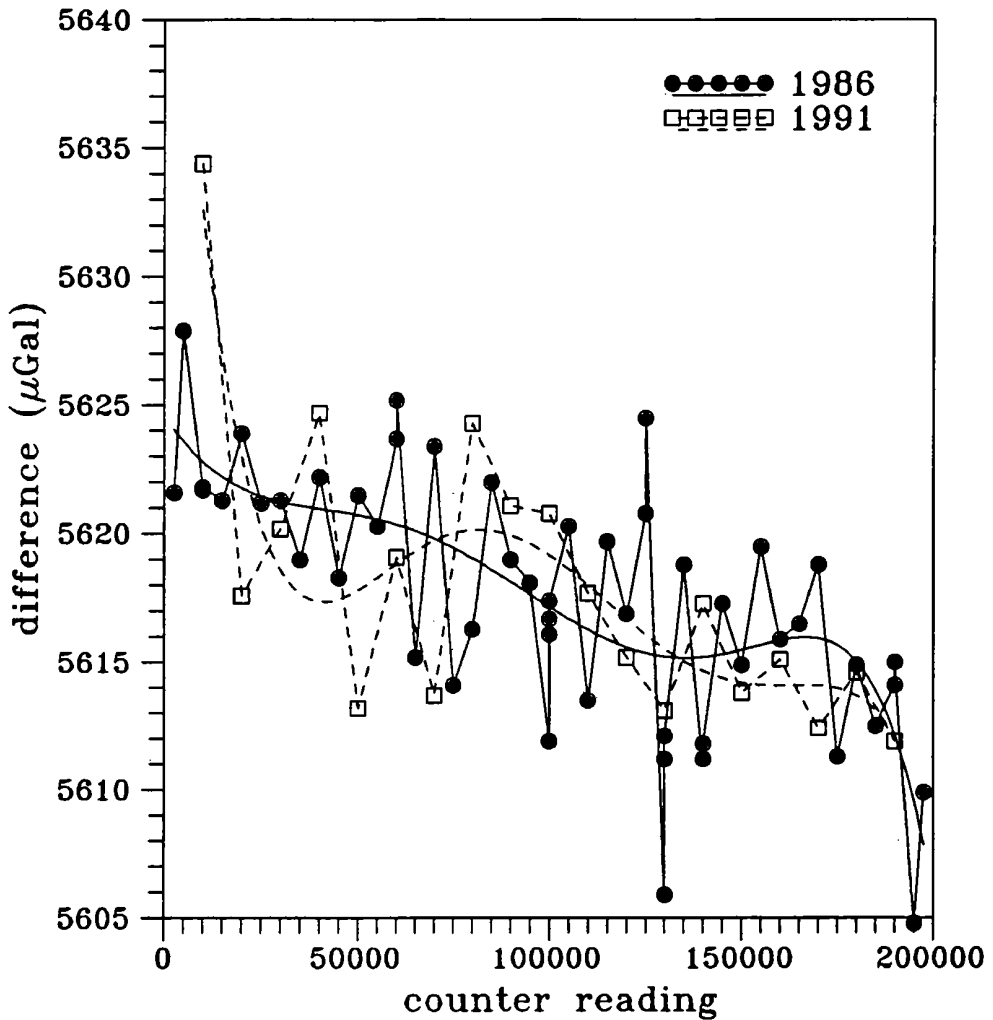


Fig. 3: Schweredifferenzen in Abhängigkeit von der mittleren Skalenwertfunktion bei Meßspindelverstellungen von 5000 Skaleneinheiten (Nichtlinearität des LCR D-9). Feedback-Eichfunktion mit gemäß linearer Trendfunktion interpolierten Parametern (vgl. Fig. 2).

#### 4. Zeitliche Änderungen der Skalenfaktorfunktion

Hinweise auf zeitliche Änderungen der Skalenfaktorfunktion gibt der Vergleich der in Fig. 3 und 5 dargestellten Messungen der Nichtlinearität. Zur Bestimmung möglicher zeitlicher Änderungen der Skalenfaktorfunktion des LCR D-9 wurden außerdem neben den regelmäßig durchgeführten Kalibrierungen auf der Eichstrecke des ÖSGN am Hochkar (Meurers und Ruess 1985) zusätzlich die periodischen Fehler im Bereich zwischen 99800 und 100800 Skaleneinheiten mit Hilfe des Feedback-Systems gemessen.

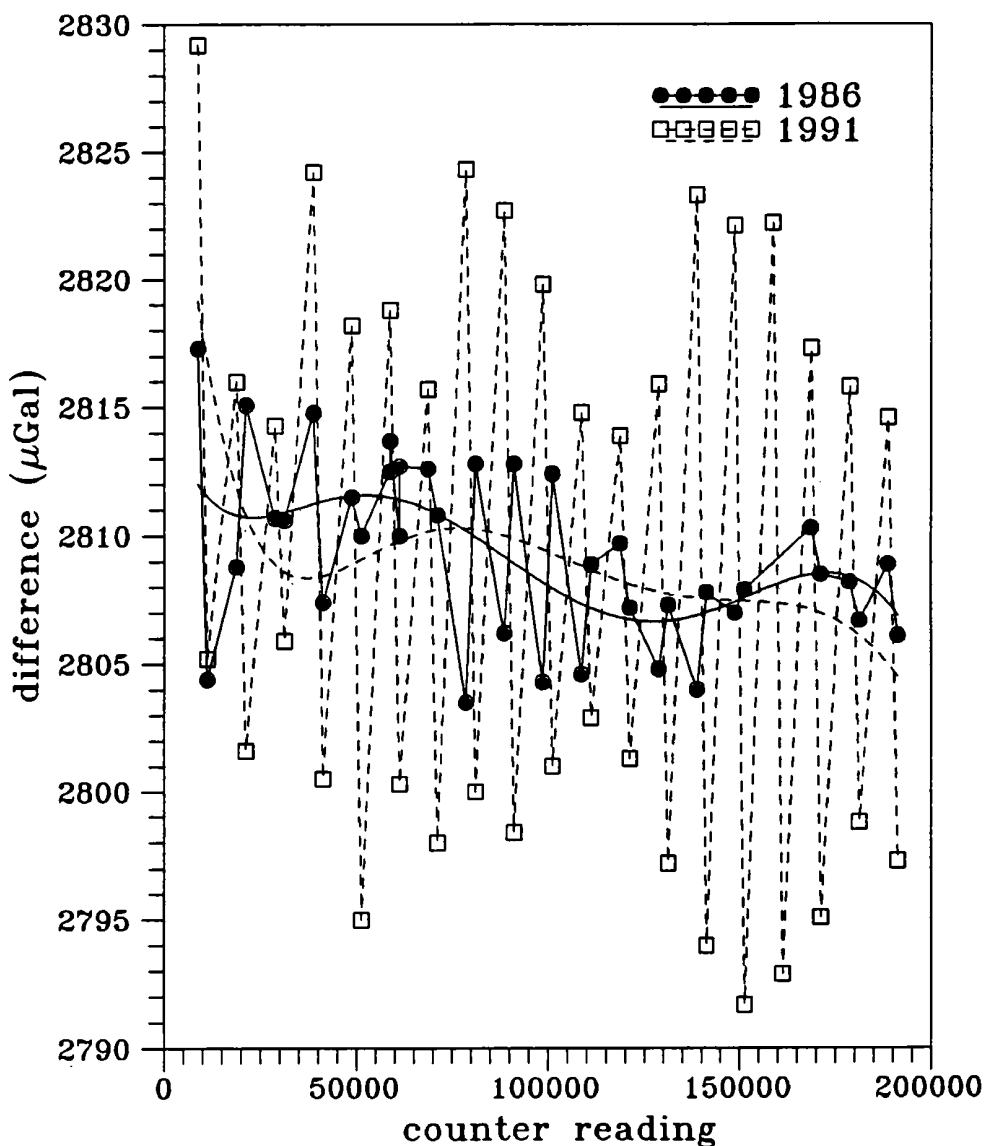


Fig. 4: Schweredifferenzen in Abhängigkeit von der mittleren Skalenwertfunktion bei Meßspindelverstellungen von 2500 Skaleneinheiten (Nichtlinearität des LCR D-9). Feedback-Eichfunktion mit gemäß linearer Trendfunktion interpolierten Parametern (vgl. Fig. 2).

Fig. 6 zeigt die 1987, etwa 1 Jahr nach dem Einbau des Feedback-Systems bestimmten, zyklischen Fehler des LCR D-9 im oben genannten Skalenbereich. Die Wiederholungsmessung weist auf eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in der Größenordnung von 1 - 2  $\mu\text{Gal}$  hin. Die periodischen Fehler übertreffen diesen Wert klar und sind daher als signifikant zu betrachten. Der Verlauf der zyklischen Fehler wird deutlich von der 0.722 CU Periode dominiert.

Der gesamte Meßzyklus wurde im Jahre 1991 und 1992 erneut durchgeführt. Die gemittelten Resultate der teilweise aus mehreren Wiederholungsmessungen



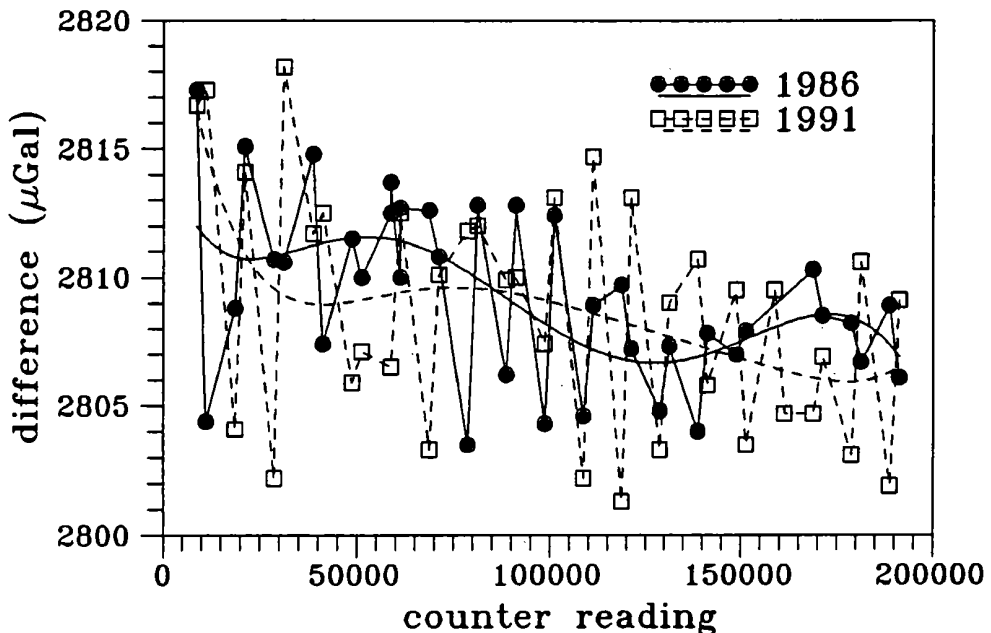


Fig. 5: Schweredifferenzen in Abhängigkeit von der mittleren Skalenwertfunktion bei Meßspindelverstellungen von 2500 Skaleneinheiten (Nichtlinearität des LCR D-9). Feedback-Eichfunktion gemäß berechneten Parametern (vgl. Fig. 2).

bestehenden Meßzyklen werden gemeinsam im oberen Teil von Fig. 7 dargestellt. Während die letzten zwei Ergebnisse im Rahmen der Reproduzierbarkeit sehr gut übereinstimmen, zeigt sich eine deutliche Phasenänderung gegenüber dem Resultat von 1987. Um die Funktionskurven annähernd zur Deckung zu bringen, ist eine Phasenverschiebung von etwa 150 Skaleneinheiten notwendig (Fig. 7, unten). Diese Beobachtung beweist, daß bei LCR-Gravimetern zeitliche Änderungen der Skalenfaktorfunktion nicht auszuschließen sind. Daraus folgt für den Einsatz in der Präzisionsgravimetrie die Notwendigkeit regelmäßiger Überprüfungen der Nichtlinearität der Skalenfaktorfunktionen.

## 5. Zusammenfassung

Die Untersuchung der Kalibrierengenauigkeit sowie der zeitlichen Stabilität der Eichfunktionen von LCR-Gravimeter bzw. Feedback-System ist von großer Bedeutung in der Präzisionsgravimetrie. Am Beispiel des im LCR D-9 implementierten Feedbacksystems SRW-D wird durch eine über fast siebenjährige Beobachtungsreihe gezeigt, daß sowohl der lineare als auch der nichtlineare Term der Feedbackfunktion neben einem langzeitigen Driftverhalten auch unregelmäßige, möglicherweise sprunghafte Veränderungen aufweist, deren Relevanz durch die Resultate bei der Bestimmung der Nichtlinearität der Skalenfunktion des LCR nachgewiesen werden können. Durch Wiederholungsmessungen der periodischen Anteile dieser Skalenfunktion in einem bestimmten Skalenbereich wird

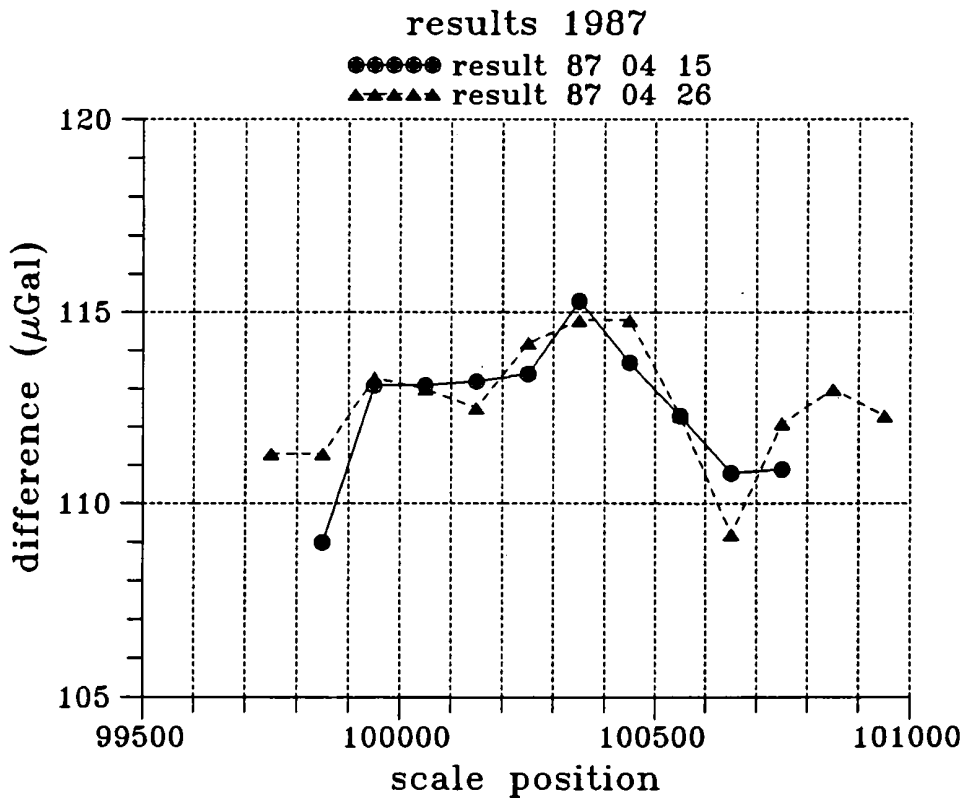


Fig. 6: Periodische Fehler des LCR D-9 im Bereich zwischen 99700 - 100900 Skaleneinheiten

außerdem das Auftreten einer Phasenverschiebung in den zyklischen Fehlern nachgewiesen. Man muß daher davon ausgehen, daß auch die Skalenfunktionsfunktion des LCR zeitlichen Veränderungen unterliegt. Für die Praxis der Präzisionsgravimetrie folgt aus diesen Beobachtungen die Notwendigkeit einer dauernden Kontrolle sowohl der Feedbackfunktion als auch der gesamten Skalenfunktionsfunktion des Gravimeters. Exakte Kalibrierungen des Feedback-Systems sind zusätzlich unmittelbar vor und nach einem Einsatz in der Präzisionsgravimetrie durchzuführen, um Abweichungen der Feedback-Parameter von ihren zeitlichen Trendfunktionen erfassen zu können.

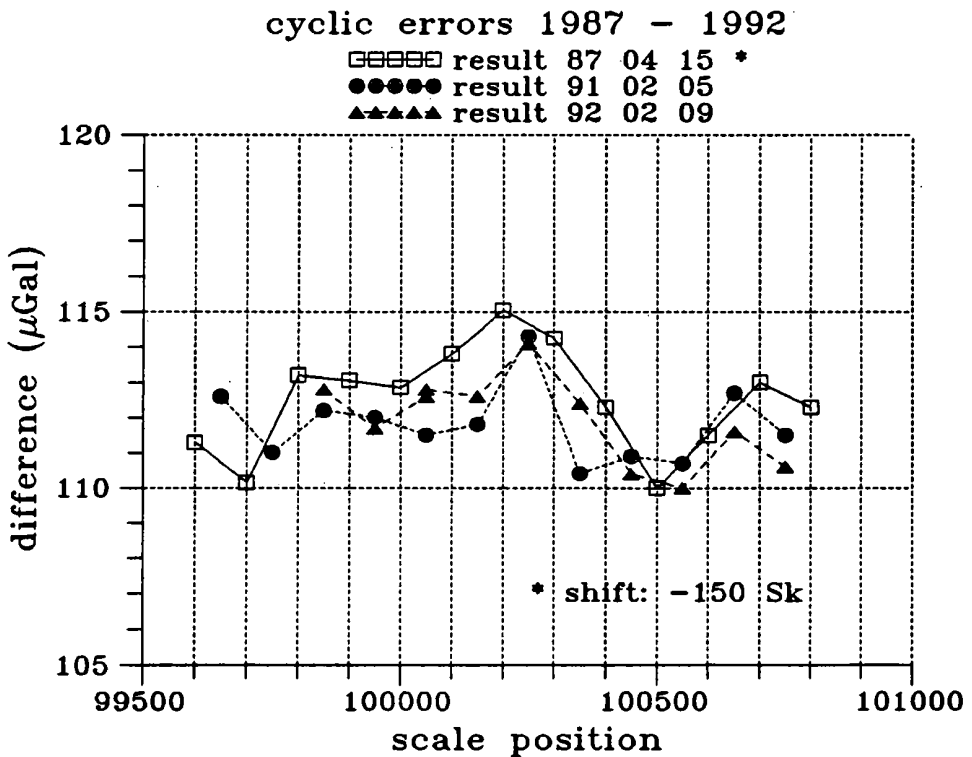
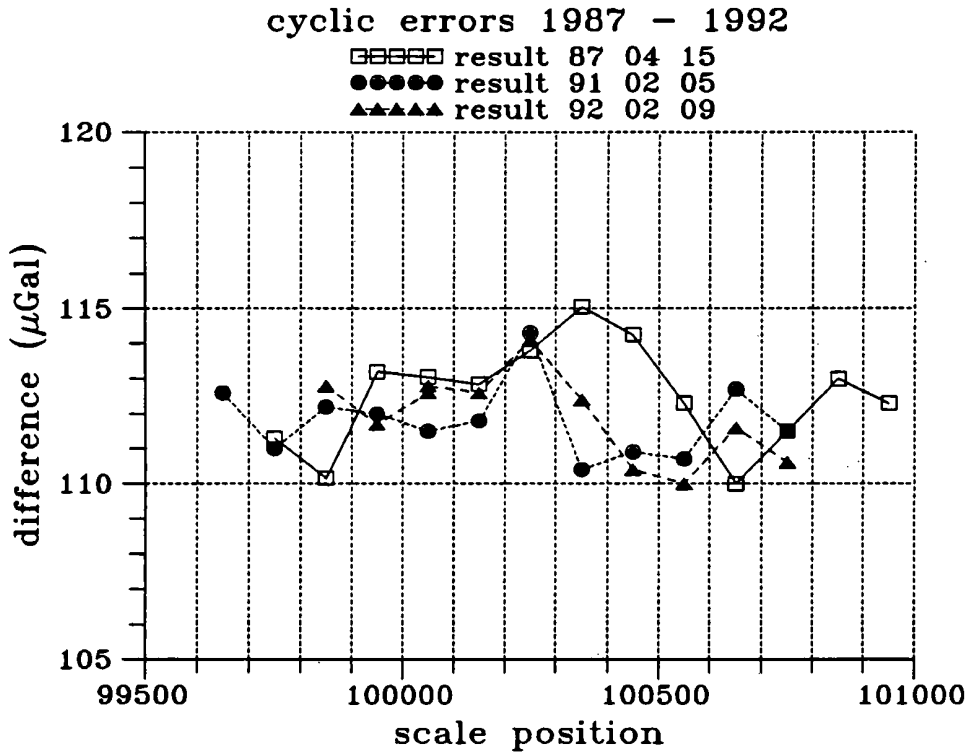


Fig. 7: Periodische Fehler des LCR D-9. Meßergebnisse 1987, 1991 und 1992 (oben). Interpretation der zeitlichen Veränderungen als Phasenverschiebung der zyklischen Fehler zwischen 1987 und 1991 bzw. 1992 (unten).

## 6. Literatur

- Becker, B., Bernard, B., Boulanger, Y., Corrado, C., Faller, J., Fried, J., Groten, E., Hanada, H., Lindner, K., Meurers, B., Peter, C., Röder, R., Ruess, D., Timmen, L., Toro, S., Tsurata, S. and Zürn, W.*, 1990: Relative gravity measurements at the 3<sup>rd</sup> international comparison of absolute gravimeters. B.G.I., Bull. d'Inf., **67**, 152-160.
- Becker M.*, 1984: Analyse von hochpräzisen Schweremessungen. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Nr. **294**.
- Casten, U. and Haussmann, U.*, 1990: Improvement of observation accuracy of the LaCoste-Romberg (Model D) gravity meter by supplementary installation of electronic feedback. Geoph. prosp., **38**, 489-498.
- Götze, H.J. and Meurers, B.*, 1983: Some Results of Calibration Factor Determination of LaCoste and Romberg Gravity Meters Model D. J. Geophys., **52**, 136-139.
- Kanngieser, E., Kummer, K., Torge, W. and Wenzel, H.G.*, 1983: Das Gravimeter-Eichsystem Hannover. Wiss. Arb. Fachrichtung Vermessungswesen, Univ. Hannover, **120**.
- Meurers, B. und Ruess, D.*, 1985: Errichtung einer neuen Gravimeter-Eichlinie am Hochkar. ÖZfVuPh., **73**, 3, 175-183.
- Schnüll, M., Röder, R.H. and Wenzel, H.G.*, 1984: An improved electronic feedback system for LaCoste&Romberg gravity meters. B.G.I., Bull. d'Inf., **55**, 27-36.
- Valliant, H.D.*, 1991: Gravity meter calibration at LaCoste and Romberg. Geophysics, **56**, 705-711.
- Van Ruymbeke, M.*, 1985: Calibration of LaCoste-Romberg gravimeters by the inertial force resulting from a vertical periodic movement. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. Earth Tides, Madrid 1985.
- Varga, P., Csapo, G., Becker, M. and Groten, E.*, 1991: Laboratory calibration of LCR type gravimeters. XX<sup>th</sup> General Assembly IUGG, Wien 1991.