

Hans Heister

Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen

1 Einführung

Die Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten, insbesondere ihres Maßstabs, war schon immer eine Aufgabe, die mit besonderer Sorgfalt durchzuführen war, galt es doch den hohen Genauigkeitsanforderungen des Präzisionsnivelements mit einer relativen Messunsicherheit von 1×10^{-5} gerecht zu werden. Dabei war es lange Zeit vorrangiges Ziel, die systematischen Abweichungen zu bestimmen, die auf unzureichende Kenntnis der Lattenteilung zurückzuführen sind. Hierbei sind insbesondere zu Beginn der 70er Jahre – also nunmehr vor 30 Jahren – die Arbeiten des Jubilars, dem dieser Beitrag gewidmet wurde, Prof. Dr.-Ing. habil. HARALD SCHLEMMER, zu erwähnen. Das von ihm entwickelte Kalibrierverfahren für Präzisions-Nivellierlatten eröffnete zum ersten Male die Möglichkeit, automatisiert die Verbesserung jedes Teilstriches der Lattenteilung mit einer Messunsicherheit von $7 \mu\text{m}$ zu bestimmen und als Korrektur bei der Bestimmung des endgültigen Messergebnisses zu berücksichtigen (SCHLEMMER, 1974).

Mit der Einführung digitaler Nivelliere (INGENSAND, 1990) wurden die herkömmlichen Präzisions-Invarlatten mit äquidistanten, metrischen Teilungen durch Invar-Codelatten ersetzt. Verbunden damit waren neue Prüfverfahren, die diesen innovativen Schritt in der geodätischen Instrumententechnik berücksichtigen mussten. Obwohl unterschiedliche Kalibriermethoden und -einrichtungen (HEISTER, 1994, MAURER/SCHNÄDELBACH, 1995, TAKALO, 1999, FASSBENDER/SCHAUERTE, 2001, WOSCHITZ ET AL., 2002) bereits anwendungsreif entwickelt sind, verbleiben doch noch – unterschiedlich wirksam für jede Kalibrieranlage –

Systematiken, die zu unerwünschten Messabweichungen führen und somit das Kalibrierergebnis verfälschen können. Zusätzlich kann dann noch die grundsätzliche Frage diskutiert werden, ob vorrangig eine *System-* oder *Latten-Kalibrierung* durchzuführen ist (RÜEGER/BRUNNER, 1999).

Im nachfolgenden Beitrag werden vor allem systematische Messabweichungen diskutiert, wie sie besonders bei der *System-Kalibrierung* auftreten können; darauf aufbauend wird ein Verbesserungsvorschlag vorgestellt, der zu einer weitgehenden Eliminierung dieser Fehlereinflüsse führt.

2 Die Einrichtung zur System-Kalibrierung der UniBwM

Der Messaufbau zur Kalibrierung des Messsystems *Digitalnivellier* – *Codelatte* im Geodätischen Labor der UniBw München wurde bereits in HEISTER, 1994 vorgestellt und ist in der Prinzipsskizze (s. Abb. 1) er-

sichtlich: Die auf zwei Messschlitten horizontal gelagerte Codelatte kann über eine motorische Steuerung in frei wählbaren Messintervallen verfahren werden. Das Digitalnivellier wird in der Regel auf der höhenverstellbaren Endkonsole über der interferometrischen Messachse befestigt. Der horizontale Zielstrahl des Nivelliers wird nach 8,20 m um 90° nach unten auf die horizontale Latte umgelenkt, so dass die Zielweite 8,40 m beträgt. Hierzu wurde an der Messbrücke ein Zerodur-Planspiegel ($10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ [L $\times$ B $\times$ H], ($\lambda/8$) unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen angebracht. Der Soll-Ist-Verleich von interferometrisch gemessenen Fahrwegdifferenzen (horizontale Lattenverschiebungen) und digital gemessenen Lattenabschnitten (mit dem Digitalnivellier) ist somit über den gesamten Messbereich der Codelatte möglich. Die Analyse der Prüfmessungen führt zu Aussagen über die Messunsicherheit des digitalen Nivellier-Systems und den Maßstab der Code-Nivellierlatte.

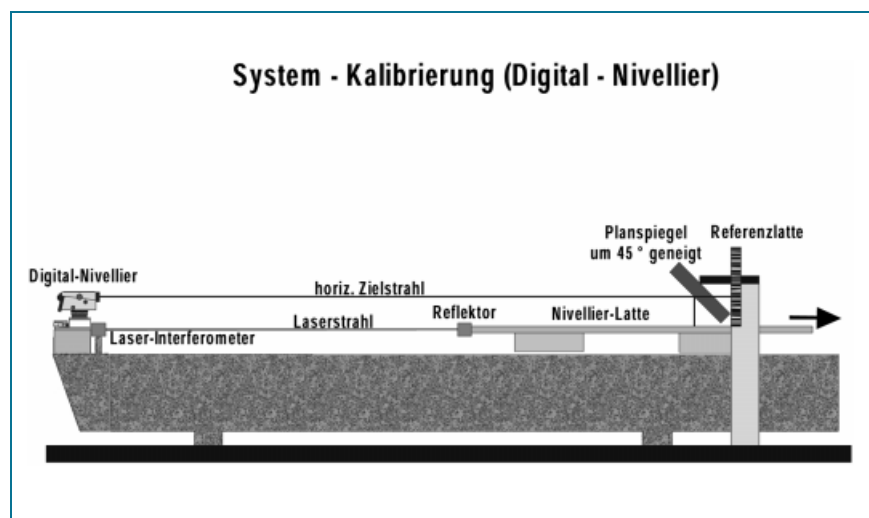


Abb. 1: System-Kalibrierung auf dem Präzisionslängenkomparator der UniBwM (schematische Darstellung)

3 Systematische Fehlereinflüsse

Vorrangig werden Einflüsse, die bei der Kalibrierung zu systematischen Abweichungen und damit fehlerhaften Ergebnissen führen können, einerseits von der Kalibrieranlage und der damit verbundenen Messanordnung, andererseits vom Verhalten des Prüflings und dem Messumfeld bestimmt. Es gibt jedoch typische Phänomene und Faktoren, die nahezu bei allen Komparatoren auftreten und somit grundsätzliche Bedeutung haben: Dies sind bei der *System-Kalibrierung* insbesondere

- Einlaufverhalten des Laser-Interferometers,
- Temperaturänderungen im/am Nivellier,
- Positioniergenauigkeit/-stabilität der Codelatte,
- Lagerung der Codelatte.

Beispielhaft werden hierzu reale Messabweichungen, die auf diese Einflussgrößen zurückzuführen sind, messtechnisch an der oben beschriebenen Kalibriereinrichtung nachgewiesen und in den nachfolgenden Abbildungen graphisch dargestellt.

Abbildung 2 zeigt die scheinbare Längenänderung des Laser-Interferometers HP 5507b, gemessen auf einen festen Reflektor über die typische Zeit eines Kalibriervorganges, getrennt nach Hin- und Rückmessung, von ca. 45 Minuten. Erst im letzten Drittel des Rückgangs, also nach ca. 38 min ist Stabilität erreicht. Die Schwankungen sind dann nur noch zufällig und durch Luftturbulenzen verursacht. Zur Anfangsposition hat sich jedoch eine systematische Abweichung von 4,5 µm aufgebaut. Wäre in dieser Zeit eine Lattenkalibrierung durchgeführt worden, hätte dieser kaum merkbare systematische Einfluss bei einer 3 m Latte eine systematische Maßstabsabweichung von 1,5 ppm bewirkt.

Temperaturveränderungen am/im Nivellier führen zu einer systematischen Verfälschung der digitalen Lattenablesung, hauptsächlich durch die Temperatursensitivität des Kompensators hervorgerufen. Dieser Einfluss wurde bereits von STAIGER, 2000 beschrieben. Der in Abbildung

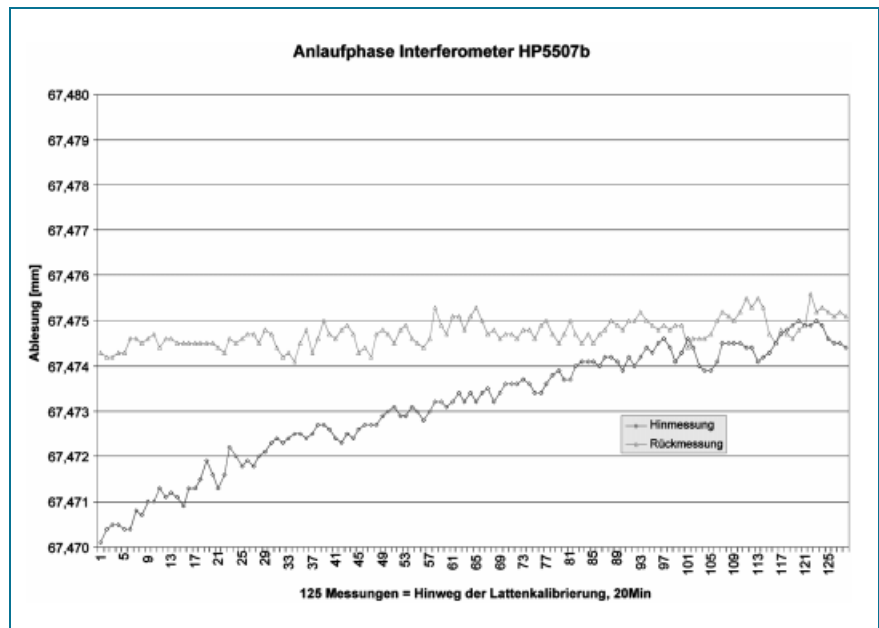


Abb. 2: Typisches Einlaufverhalten eines Laser-Interferometers

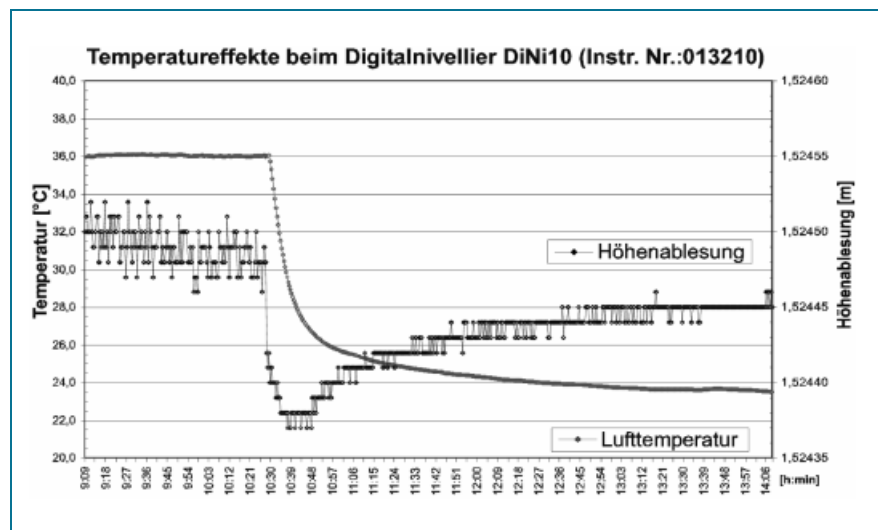


Abb. 3: Auswirkung von Temperaturveränderungen beim Digital-Nivellier

3 dargestellte Verlauf der Änderung einer Höhenablesung beim ZEISS DiNi 10 (Instr. Nr. 013210) zeigt, dass nach einer Aufwärmung auf 36 °C und stabiler Ablesung beim Abkühlvorgang (Akklimationisierung auf Raumtemperatur von 23,5 °C) ein Überspringen des Kompensators zu einer maximalen Änderung der Höhenablesung um 0,13 mm festzustellen ist. Erst nach weiteren 120 Min (!) stabilisiert sich dann die Höhenablesung, aber doch noch um 0,05 mm zur Anfangsablesung systematisch verändert. Wäre dieser Akklimationisierungsprozess

nicht so gewollt konstruiert abgelaufen, sondern im Bereich weniger °C (s. Abschnitt 5.), dann hätte dies bei der *System-Kalibrierung* zu unerwünschten Maßstabsabweichungen führen können. Erfahrungen haben gezeigt, dass gerade bei der *System-Kalibrierung* durch die Wiederholungsmessungen über einen längeren Zeitraum von ca. 1,5 h zusätzlich eine interne Aufwärmung des Nivelliers um einige °C auftreten kann, was bei einigen Gerätetypen zu ähnlichen systematischen Abweichungen führt.

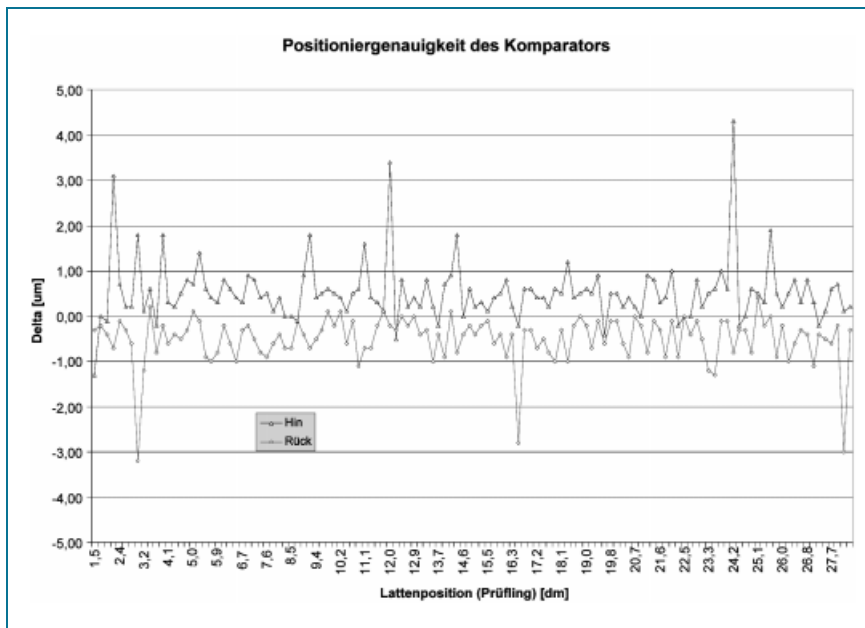


Abb. 4: Positioniergenauigkeit/-stabilität des Messschlittens (Schwellenwert $\pm 5 \mu\text{m}$)

Im Gegensatz zu den Kalibrierverfahren, wo nur die Latte untersucht wird und die Messung bei automatisierten Verfahren in der Regel dynamisch (kinematisch) abläuft, ist bei der *System-Kalibrierung* eine hohe Stabilität an die Positioniereinrichtung unabdingbar; die Latte muss über die Zeit der Wiederholungsmessungen des Digital-Nivelliers für eine bestimmte „Höhenablesung“ in ihrer Position unveränderlich sein. Dies verlangt eine präzise Steuerung des Messschlittens mit hoher Kurz- und Langzeitstabilität. Abbildung 4 zeigt den Stabilitätsverlauf der Positioniereinrichtung des Präzisionslängenkomparators des Geodätischen Labors der UniBw M über die Zeitachse von Hin- und Rückmessung; wobei die Schwelle maximaler Abweichungen der Positionierung auf $5 \mu\text{m}$ gesetzt wurde. Aber auch bei diesen Regelungsprozessen kann ein driftähnliches Verhalten von Antrieb und Steuerungselektronik in der Bandbreite der Schwellenwerte zu einem systematisch verfälschten „Soll-Wert“ (Laser-Interferometer) führen, der dann wieder eine scheinbare Maßstabsänderung der Nivellierlatte hervorruft.

Die horizontale oder vertikale Positionierung der Latte während des Kalibrierprozesses dürfte in Bezug auf mechanische Längenänderun-

gen, hervorgerufen nur durch die Durchbiegung, keinen signifikanten Einfluss haben. Mit einer Größenordnung des Durchhangs von ca. $0,4 \text{ mm}$ bei Lagerung in den Bessel-Punkten kann aber bei der *Latte-Kalibrierung* durch Unschärfe und Fehlausrichtung der (elektronischen) Abtasteinrichtung eine systematische Verfälschung der Strichmittenlage entstehen. An dieser Stelle soll jedoch auf diese Problemstellung nicht weiter eingegangen werden, da sie auf die Maßstabsbestimmung bei der *System-Kalibrierung* von nachgeordneter Bedeutung ist. Es gibt jedoch andere Einflussfaktoren, die unter Umständen eventuell unterschiedliche Kalibrierergebnisse bei horizontaler oder vertikaler Latteposition bewirken können (MAUER, SCHNÄDELBACH, 1995). WOSCHITZ et al. (2001) haben jedoch gute Übereinstimmung in den Maßstabsfaktoren bei horizontaler *Latte-* und vertikaler *System-Kalibrierung* experimentell nachgewiesen.

4 Verbesserte System-Kalibrierung

Während Unzulänglichkeiten an der Prüfeinrichtung über die Zeit und dadurch verbunden mit hohen Erfahrungswerten meist beseitigt oder

durch das Kalibrierverfahren selbst vermieden werden können, gestaltet sich hingegen beim Kalibriervorgang die Beseitigung von systematischen Messabweichungen des Prüflings oft sehr aufwendig. Vom Hersteller ist das Messinstrument konstruktiv auf den anwendungsbezogenen, typischen Messprozess optimiert. Dieser lässt sich im Labor unter Berücksichtigung des Komparators leider nur unvollständig reproduzieren. Ein Beispiel hierzu ist die Latteposition – horizontal oder vertikal? Wenn möglich sollte die Gebrauchslage angestrebt werden, d.h. vertikal; dagegen spricht aber der vertikale Temperaturgradient, der insbesondere die interferometrische Referenzmessung systematisch verfälschen kann. Die Abwägung der Vor- und Nachteile sollte in der Gesamtbilanz *aller* Messunsicherheiten zur besten Messanordnung führen, die aber *immer* einen Kompromiss darstellt und von den lokalen Möglichkeiten geprägt ist. So können z.B. die bereits besprochenen Einflussfaktoren, wie das Einlaufverhalten des Laser-Interferometers und die Positioniergenauigkeit/-stabilität, durch entsprechende Messabläufe beherrscht werden. Hingegen bleiben Auswirkungen von Temperaturänderungen am/im Prüfling auf das Messergebnis meist unbekannt. Um hier im speziellen Fall der Kalibrierung von *Nivellier-Systemen* dem Grundsatz der *Kompensationsmessanordnung* treu zu bleiben, wurde am Komparator der UniBw M eine zusätzliche Codelatte angebracht (s. Abb. 1), die als feste Referenz eine Differenzmessung ermöglicht:

$$dh^i = h_{\text{Ref}}^i - h_{\text{Prüfling}}^i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Hierzu korrespondiert bei der Kalibrierung der Sollwert s^i , die Längenmessung des Laser-Interferometers. Zeit- und temperaturabhängige Änderungen der Ziellinie werden somit vollständig kompensiert, da sowohl Ablesungen zur Referenzlatte als auch zum Prüfling sehr zeitnah durchgeführt werden. Die weitere Auswertung vergleicht, analysiert dann nur noch die Differenzen dh^i mit den Interferometermessungen s^i . Diese Verbesserung des Verfah-

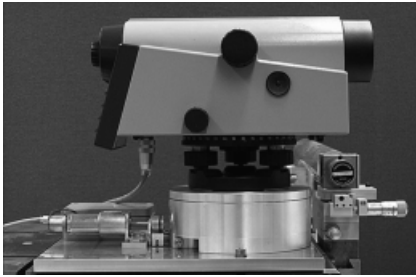


Abb. 5: Nivellier mit Drehtisch

rens zur System-Kalibrierung wurde deshalb notwendig, da die Ablesungen am Digitalnivellier während der Prüfmessung – anders als beim Einsatz in der Praxis – in hoher Frequenz und kontinuierlich über einen längeren Zeitraum von ca. 60–90 min durchgeführt werden müssen. Dies verursacht eine unvermeidbare Eigenerwärmung des Instruments. Zusammen mit Temperaturänderungen im Umfeld kann dies – abhängig vom Instrumententyp – zu den systematischen Abweichungen bei der Maßstabsbestimmung führen. Zur praktischen Realisierung dieses Kalibrierkonzeptes musste eine präzise Dreheinrichtung gefertigt werden, die eine „weiche“ Verdrehung des Digitalnivelliers zwischen Referenzlatte und Umlenkspiegel zum Prüfling ohne Höhenänderung ermöglicht. Über ein selbstzentrierendes Kegelrollenlager in Verbindung mit einer Adapterplatte zur Aufnahme des Nivelliers kann mit Hilfe eines Servomotors, der über eine Schnittstelle RS232 vom Controller des Komparators angesteuert wird, die gewünschte Verdrehung von ca. 4 gon automatisiert durchgeführt werden (s. Abb. 5 und 6). Die durch diese Drehbewegung eventuell hervorgerufene leichte Auslenkung des Kompensators hat durch eine kurze Wartezeit bis zur nächsten Ablesung keine messbare Auswirkung.

5 Ergebnisse zur verbesserten System-Kalibrierung

Mit der eben beschriebenen Modifizierung der vorhandenen Kalibrier-einrichtung konnte dann erstmals mit dem digitalen Nivellier-System



Abb. 6: Prüfling, Umlenkspiegel und Referenzlatte

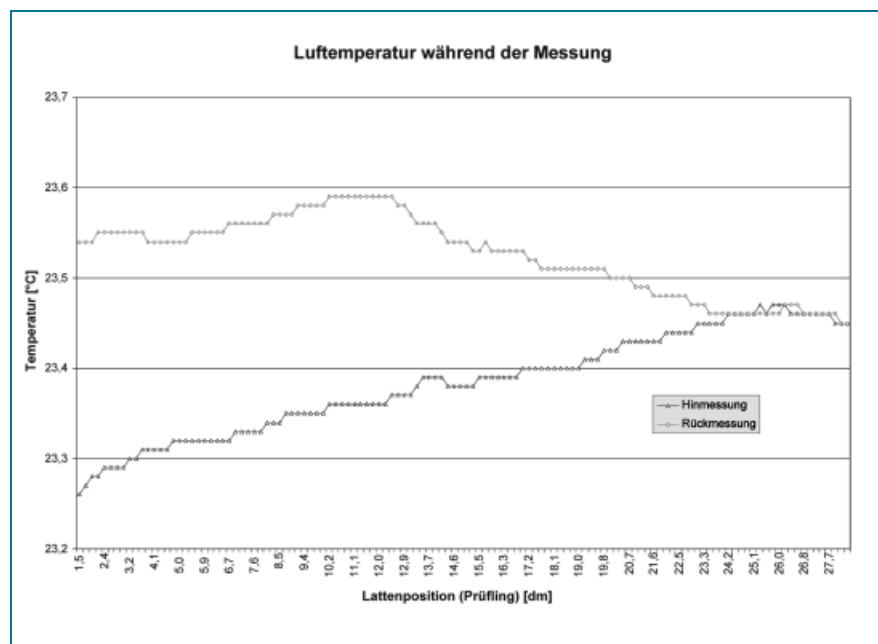


Abb. 7: Lufttemperatur im Umfeld des Nivelliers

ZEISS DiNi 10 (Instr. Nr. 013210) eine Kalibrierung durchgeführt werden. Es wurden insgesamt 128 Messungen zur Codelatte, jeweils im Hin- und Rückgang, sowie die entsprechenden Ablesungen zur Referenzlatte durchgeführt. Zusätzlich wurden die Änderungen der Lufttemperatur in Instrumentennähe registriert. Die Ergebnisse dieser Prüfmessung sind in den nachfolgenden Abbildungen 7,8,9, und 10 dargestellt.

Vergleicht man die Änderungen der Lufttemperatur im Umfeld des Nivelliers (s. Abb. 7) mit den Änderungen der Ablesungen zur Referenzlatte (s. Abb. 8), dann stellt man sofort eine starke Korrelation

($r = 0,87$) dieser Messreihen fest. Bei einer, über nahezu 80% der Messzeit, linearen Änderung um $\sim +0,3^\circ\text{C}$ ist eine Änderung der Ablesungen zur Referenzlatte um 0,055 mm zu beobachten. Selbst in den verbleibenden 20% wird bei fast stabiler Temperatur ebenfalls eine stabile Lattenablesung sichtbar. Die relative starke Veränderung der Ziellinie um $1,4 \text{ mgon}/^\circ\text{C}$ dürfte nicht nur auf die Erwärmung des Umfeldes zurückzuführen sein, sondern auch auf eine Überlagerung durch die Eigenerwärmung des Gerätes.

Bei den Messungen zur Codelatte (Prüfling) (s. Abb. 9) tritt – wie zu erwarten war – ein ähnlicher Effekt

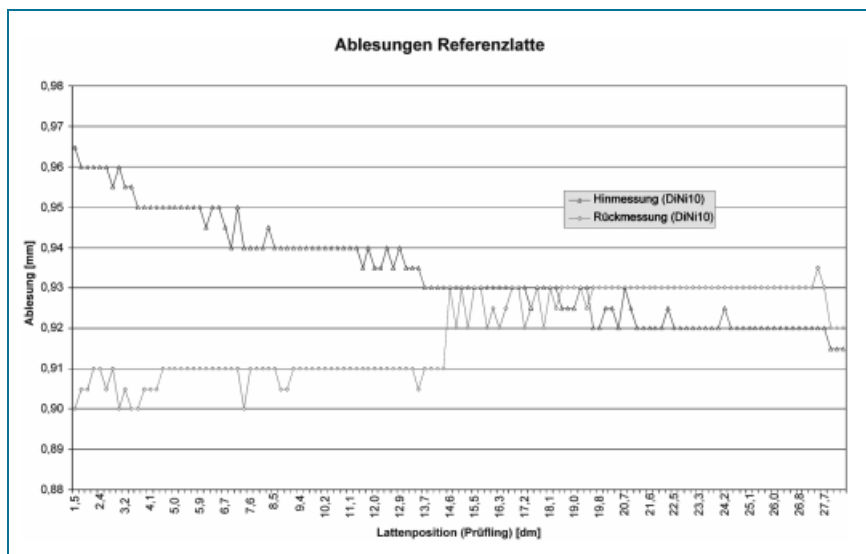


Abb. 8: Messungen zur Referenzlatte

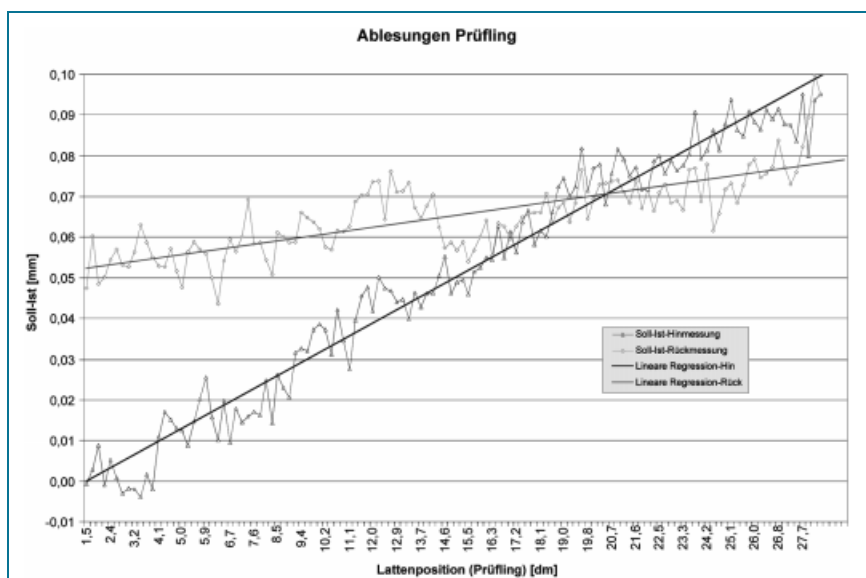


Abb. 9: Messungen zur Codelatte (Prüfling)

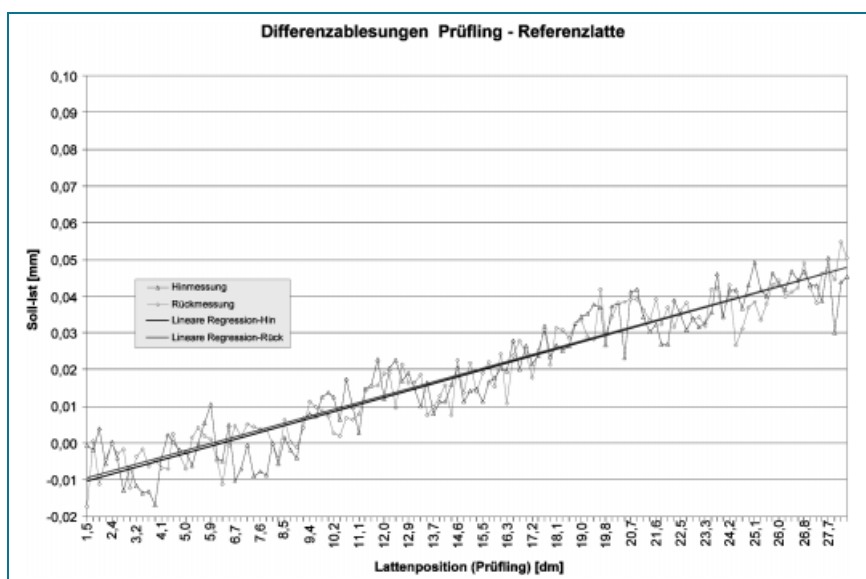


Abb. 10: Kalibrierergebnis bei Differenzmessungen mit der Referenzlattenmethode

auf. Aus den Regressionsgeraden, getrennt für Hin- und Rückmessung bestimmt, ist sofort abzulesen, dass eine alleinige Messung nur zum Prüfling keine brauchbaren Ergebnisse zur Maßstabsbestimmung gebracht hätte. Mit einer Differenz zwischen Hin- und Rückmessung von ~ 27 ppm ergibt sich ein „mittlerer“ Maßstab von 23 ppm. Erst die Auswertung über die Differenzmessungen (Prüfling – Referenz) führt zu brauchbaren Ergebnissen (s. Abb. 10), da die signifikanten Temperatureinflüsse vollständig eliminiert werden. Die lineare Regression, getrennt für Hin- und Rückmessung, liefert mit einer Differenz von 0,3 ppm nahezu identische Ergebnisse (Hin: 19,4 ppm, Rück: 19,1 ppm).

6 Zusammenfassende Bewertung

Die *System-Kalibrierung* von Digitalnivellier und Codelatte konnte durch eine Modifikation der Kalibriereinrichtung dadurch verbessert werden, dass neben der zu überprüfenden Codelatte nahezu zeit- und entfernungs-gleich eine feste Referenzlatte abgelesen wird. Die Automatisierung dieser Messprozedur ist relativ einfach über einen ansteuerbaren Drehtisch erreichbar. Die gesamte zusätzliche Apparatur kann sowohl bei Kalibriereinrichtungen mit horizontaler als auch vertikaler Lattenposition problemlos nachgerüstet werden. Durch das Differenzmessverfahren wird der Temperatureinfluss durch Eigenerwärmung des Gerätes und auch der des Messumfeldes wirksam eliminiert werden; d.h. an die Klimatisierung des Messlabors können weniger hohe Anforderungen gestellt werden. Der Gewinn an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung rechtfertigt voll die Verlängerung der Messzeit auf ca. 90 min. Zusätzlich entspricht diese Messanordnung weitgehend der für das Nivellieren üblichen Kompensationsmessanordnung. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass auf diese Weise repräsentative Werte für den Maßstab der Codelatte und die Messunsicher-

heit des digitalen *Nivellier-Systems* bestimmt werden können.

Abschließend möchte ich noch meinen Dank an alle Mitglieder des „Runden Tisch“^{*)} aussprechen, von denen zahlreiche Anregungen zur Verbesserung von Kalibriereinrichtungen, auch der der UniBw M, ausgingen. Dies gilt insbesondere für die Überprüfung von digitalen Nivellieren und Codelatten. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing.(FH) G. KESTEL, Geodätisches Labor der UniBw M, für die Durchführung dieses Experiments und für die Bearbeitung der Abbildungen.

7 Literatur

- FASSBENDER, H.; SCHAUERTE, W. (2001): Ein geeignetes Messverfahren für die Kalibrierung beliebig codierter Strichteilungen. Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, 63. Jahrg., S. 129–140
- HEISTER, H. (1994): Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. In: Brunner K., Peipe J. (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 46, p. 95–101
- INGENSAND, H. (1990): Das Wild NA 2000, das erste Digitalnivellier der Welt. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 97. Jahrg., S. 201–210
- MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. (1995): Laserinterferometry – Ten Years Experience in Calibrating Invar Leve-

ling Staffs. Proceedings: First International Symposium Applied Laser Techniques in Geodesy and Mine Surveying, Ljubeljana

- RÜEGER, J. M., BRUNNER F. K. (1999): On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 125. Jahrg., S. 120–130
- SCHLEMMER, H. (1975): Laser-Interferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. DGK Reihe C, Heft 210, München
- STAIGER, R. (2000): Calibration Methods for modern Survey Equipment. In: Mediterranean Surveyor in the new Millenium - September 18–21, Malta, Proceedings auf CD
- TAKALO, MIKKO (1999): Verification of Automated Calibration of Precise Levelling Rods in Finland. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 99:7, Kirkkonummi
- WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K.; HEISTER, H. (2002): Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator. Zeitschrift für Vermessungswesen, 127. Jahrg., im Druck

Anschrift des Verfassers:

HANS HEISTER,
Institut für Geodäsie – UniBwM
D-85577 Neubiberg
h.heister@unibw-muenchen.de

Zusammenfassung

Systematische Einflüsse insbesondere von Temperaturänderungen auf Prüfling und

Kalibriereinrichtung können das Kalibrierergebnis erheblich verfälschen. Bei der Kalibrierung digitaler *Nivellier-Systeme* überlagern sich diese Einflussgrößen einmal durch die Eigenerwärmung des Nivelliers, hervorgerufen durch fortlaufende Messungen zur Codelatte, sowie durch unzureichende Temperaturstabilität im Umfeld. Zur Eliminierung dieser Temperatureffekte auf das Kalibrierergebnis wird eine Modifikation der Kalibriereinrichtung und des -verfahrens vorgeschlagen: Über einen Drehtisch kann durch eine geringe horizontale Drehung des Nivelliers neben der üblichen digitalen Ableseung zur Codelatte (Prüfling) eine weitere Ablesung zu einer festen Referenzlatte erzeugt werden. Die Differenz beider Ablesungen ist nahezu frei von diesen systematischen Temperatureinflüssen. Praktische Messungen belegen die Wirksamkeit dieser Kompensationsmessanordnung bei der Überprüfung des *digitalen Nivellier-Systems* ZEISS DiNi 10.

^{*)} Der „Runde Tisch zur Kalibrierung geodätischer Messmittel“ pflegt seit nunmehr 6 Jahren intensiven Erfahrungsaustausch über Probleme bei der Kalibrierung von geodätischen Instrumenten. Er besteht aus Prof. F.K. BRUNNER (Uni Graz), Prof. H. HEISTER (UniBw München), Prof. H. INGESAND (ETH Zürich), Prof. H. SCHLEMMER (TU Darmstadt), Prof. K. SCHNÄDELBACH und Dr. W. MAURER (TU München), Prof. W. SCHWARZ (Bauhaus-Univers. Weimar), Prof. R. STAIGER (Uni GesHS Essen), Prof. B. WITTE und Dr. W. SCHAUERTE (UniBonn), Dipl.-Ing. K. ZEISKE (Fa. Leica Heerbrugg und ISO TC172- SC6).