



Der Ringversuch 2003/2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten

W. Schauerte und H. Heister

Im Jahre 2003/2004 haben fünf der am Runden Tisch „Kalibrieren Geodätischer Messmittel“ beteiligten Institutionen einen Ringversuch „Nivellierlattenkalibrierung“ durchgeführt. Dabei wurden Prüflinge in einer kurzen Zeitspanne auf allen fünf Komparatoren untersucht, um Kenndaten für die Richtigkeit und die Zuverlässigkeit der unterschiedlichen Kalibrierverfahren zu gewinnen.

1. Einführung und Zielsetzung

Ringversuche dienen dem objektiven Nachweis der messtechnischen Leistungsfähigkeit von Prüflaboratorien und haben bei deren Qualitätsüberwachung eine zentrale Bedeutung. Diese wird insbesondere für die Kalibrierung geodätischer Messmittel noch zusätzlich hervorgehoben, da die amtlichen Prüfstellen der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) sowie die damit verbundenen Prüfstellen des DKD (Deutscher Kalibrierdienst) hierfür keine speziellen Prüfeinrichtungen vorhalten und somit die bei Kalibrierungen nachzuweisende Rückführung auf amtliche Normale auf Schwierigkeiten stößt.

Aus diesem Grunde haben sich die auf Nivellierlattenkalibrierung spezialisierten Prüflabore im deutschsprachigen Raum entschlossen, einen Ringversuch mit ausgesuchten Prüflingen – Präzisionsnivellierlatten (Invar-Codelatten) verschiedener Hersteller – durchzuführen, um numerische Kenndaten über die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der unterschiedlichen Kalibrierverfahren und -einrichtungen zu gewinnen. Folgende Institutionen haben sich an dem Ringversuch „Nivellierlattenkalibrierung“ 2003/2004 beteiligt:

- Geodätisches Institut der Universität Bonn (UniBN)
Nussallee 17, D-53115 Bonn
- Institut für Ingenieurgeodäsie (TUG)
und Messsysteme
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, A-8010 Graz
- Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (ETH)
Geotische Messtechnik
ETH Hoenggerberg, CH-8044 Zürich
- Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor (UniBw)
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39,
D-85579 Neubiberg
- Institut für Geodäsie, (TUM)
GIS und Landmanagement der Techn.
Universität München – Lehrstuhl für Geodäsie
Arcisstr. 21, D-80290 München

Die Prüflabore, die sich seit nunmehr 8 Jahren zum intensiven Gedankenaustausch auf dem Spezialgebiet der Prüftechnik geodätischer Instrumente im „Runden Tisch“ zusammengeschlossen haben (SCHLEMMER, 2005) sowie die dort entwickelten Komparatoren sind ausführlich in SCHWARZ, 2005 beschrieben.

Eine weitere besondere Motivation zur Durchführung dieses Experiments war neben den vorgenannten Gründen der zunehmende Einsatz von Digitalnivellieren zusammen mit den dazugehörigen codierten Nivellierlatten. Beides führte gegenüber der klassischen Vorgehensweise bei analogen Nivellieren zu prinzipiell unterschiedlichen Kalibrierverfahren, nämlich der bisher praktizierten Maßstabskalibrierung der Lattenteilung – der *Lattenkalibrierung*- und der *Systemkalibrierung* (HEISTER et al., 2005), bei der Nivellierlatte und Nivelliergerät als eine instrumentelle Einheit aufgefasst werden. Somit konnte der Ringversuch zusätzlich auch über diese Kalibrierverfahren quantitative Aussagen machen.

2. Planung und Organisation des Ringversuchs

2.1 Prüflinge

Die Federführung zur Planung, Realisierung und Auswertung aller Kalibriermessungen wurde dem Geodätischen Institut der Universität Bonn übertragen, das auch die entsprechenden Prüflinge zur Verfügung stellte. Zum Einsatz kamen je ein Präzisions-Digitalnivellier Trimble/Zeiss DiNi 12 (vgl. Abb.2-1) und Leica DNA 03 (vgl. Abb.2-2) aus den Fertigungsreihen der Jahre 2002 bzw. 2003.

Daneben standen jeweils zwei aus unterschiedlichen Serien stammende Nivellierlatten zur Verfügung, die von der Fa. NEDO/Dornstetten zwischen 1994 und 2002 produziert wurden:

- Bei den beiden Zeiss Invar-Code-Latten LD 13 (SN 14821, SN 15017) sowie der Leica Invar-Code-Latten GPCL 3 (SN 9113) handelt es sich um Gebrauchslatten, die regelmäßig im Rahmen verschiedener geodätischer Lehrveranstaltungen oder sonstiger Messaufgaben zum Einsatz kommen.
- Bei einer weiteren Leica-Nivellierlatte des Typs GPCL 3 (SN 121002) konnte auf eine von der Fa. NEDO gefertigte Musterlatte zurückgegriffen werden, die eine spezielle systematische Verfälschung auf einer Kantenflanke enthält, um Effekte des Abtastvorgangs im Zusammenhang mit dem Auswertekonzept für die Kantenerkennung oder auch andere Einflussfaktoren aus der Komparatoranlage zu erkennen.



Abb. 2-1: Trimble/Zeiss DiNi 12 (SN 700118)



Abb. 2-2: Leica DNA 03 (SN 330218)

Bei Präzisionsnivellierlatten wird ein in einen Aluminium-Lattenkörper eingelegtes Invarband als Teilungsträger (Querschnittmaße: 25 mm × 1 mm) verwendet. Aufgrund der mechanischen Kopplung von Lattenkörper und Teilungsträger vergrößert sich der für Invar typische Temperaturausdehnungskoeffizient von ca. 0,3 ppm/°C. Daher wurde im Rahmen dieses Ringversuchs für jede Invarbandlatte der individuelle thermische Ausdehnungskoeffizient α_L bestimmt. Die Messungen hierfür erfolgten am Geodätischen Institut der TUM. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt. Sie bestätigen grundsätzlich den seit längerem bekannten Erfahrungswert von $\alpha_L = 0,75$ ppm/°C (FOPPE et al., 2004).

Tab. 2-1: Zusammenstellung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu den eingesetzten Präzisionsnivellierlatten

Invarbandlatte		thermischer Ausdehnungskoeff. α_L [10 ⁻⁶ · K ⁻¹]
Typ	Ser. Nr.	
Latte LD 13 mit Zeiss-Code	9113	0.64
	121002	0.77
Latte GPCL 3 mit Leica-Code	15017	0.77
	14821	0.81

Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen, erfolgte dann mit diesen Werten die Rückrechnung aller Kalibriermessungen auf die Referenztemperatur von 20 °C:

$$L_T = L + k_T$$

mit

$$k_T = \alpha_L \cdot (20^\circ - T) \cdot L,$$

wobei k_T : anzubringender Korrektionswert in [mm],
 α_L : Temperaturausdehnungskoeffizient
in [10⁻⁶ · K⁻¹],
T: Prüflingstemperatur in [°C],
L: Strichposition in [mm]

bedeutet.

2.2 Prüfkriterien und Ziele des Ringversuchs

Die DIN 18717 „Präzisions-Nivellierlatten“ nennt eine Reihe von Einzelkriterien, die vorrangig die Herstellungsgüte einer Präzisions-Nivellierlatte festlegen. Dazu zählen:

- **Teilungsgenauigkeit,**
- **thermischer Längenausdehnungskoeffizient,**
- Nullpunktfehler,
- Ebenheit der Aufsatzfläche,
- Grenzabweichung der Aufsatzfläche relativ zur Längensachse und
- Angabe und Justierzustand der Dosenlibelle.

Bei diesem Ringversuch sollten lediglich die beiden erstgenannten Kriterien näher untersucht werden, wobei sich dann die Ergebnisse der Teilungsgenauigkeit bzw. der Lattenmaßstab (mittleres Lattenmeter) unter den beteiligten Prüflaboren vergleichen lassen. Der Teilungsmaßstab hat insbesondere im Zusammenhang mit der Rückführung der Messgröße „Länge“ (Höhe) eine herausragende Bedeutung. Hier zeigt sich eindeutig ein Mangel in der DIN 18717, in der nur Grenzabweichungen der Skalenstriche bzw. Code-„Teilung“ für die Fertigung festgelegt werden, die aber ausschließlich bei konventionellen Nivellierlatten die Genauigkeit der Höhenablesung bestimmen. Wegen des teilweise integrierenden Charakters des digitalen Messverfahrens beeinflusst die Lageabweichung eines *einzelnen* Codeelementes bzw. einer *einzelnen* Strichkante nicht alleine die Genauigkeit der Höhenbestimmung; vielmehr ist hierbei das Gesamtsystem Nivellier und Latte zu analysieren (HEISTER 1994, BRUNNER, WOSCHITZ 2001, WOSCHITZ, 2003).

Somit wurde folgender Ablauf des Ringversuchs festgelegt:

- a) Um eine *Vergleichbarkeit der Messergebnisse* herstellen zu können, wurde zunächst an der TU München (TUM) für jede der eingesetzten Invarbandnivellierlatten der thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestimmt (s.o.).
- b) In vier der fünf beteiligten Prüflabore wurden für jede Nivellierlatte der Maßstab (mittleres Lattenmeter) und die Verbesserungswerte für die Strichmitten ermittelt. An der TUM geschieht dieses mit dem dortigen Vertikalkomparator in Gebrauchslage.
- c) In zwei Prüflaboren, der TU Graz (TUG) und der Universität der Bundeswehr München (UniBw) bestand die Möglichkeit, eine *Systemkalibrierung* durchzuführen, für die jeweiligen Gerätekombinationen

Tab. 3-1: Zeitlicher Ablauf des Ringversuchs

Prüflabor	Zeitraum
Universität Bonn (Uni BN)	02.07.–06.07.2003
TU Graz (TUG)	13.07.–16.07.2003
UniBw München (Uni Bw)	16.07.–18.07.2003
	24.07.–29.07.2003
TU München (TUM)	18.07.–23.07.2003
ETH Zürich (ETH)	23.07.–24.07.2003
Uni Bonn (Uni BN)	07.08.–08.08.2003
Uni BN	03.08.–04.08.2004
TUM	09.08.–17.08.2004
Uni BN	08.09.–16.09.2004

- Trimble DiNi 12 mit den Latten der SN 15017 bzw. SN 14821 und
 - Leica DNA 03 mit den Latten SN 9113 bzw. SN 121002,
- wobei die TUG über einen Vertikalkomparator (Nivellierlatte ebenfalls in Gebrauchslage montiert) verfügt, während die Anlage in der UniBw als Horizontalkomparator konzipiert wurde.

Somit kann als *wesentliches* Ziel die **Vergleichbarkeit des Maßstabsfaktors (mittleres Lattenmeter)** definiert werden, der in den fünf beteiligten Prüflaboren mit ganz unterschiedlichen Prüfeinrichtungen und -konzepten bestimmt wurde. Zusätzlich sollte noch die Frage beantwortet werden, ob über die Zeit oder durch Transporteinflüsse *Maßstabsänderungen der Invarbandlatten* (= materialspezifische Alterungseffekte) nachzuweisen sind.

3. Durchführung des Ringversuchs und Ergebnisse

Der zeitliche Ablauf der Prüfmessungen ist in Tabelle 3-1 wiedergegeben. Man erkennt, dass der Ringversuch in 2003 an der UniBN begann und dort auch jeweils die Abschlussmessungen stattfanden, um zeitliche Veränderungen detektieren zu können. Die Prüfmessungen aller anderen Labore waren innerhalb dieser Zeitschranken angesiedelt. Aufgrund technischer Probleme beim Umbau des TUM-Vertikalkomparators wurden in einem Nachgang im August 2004 mit denselben Latten erneute Maßstabsüberprüfungen vorgenommen, wobei wieder vor und nach den Kalibriermessungen entsprechende Vergleichsmessungen auf dem Bonner Nivellierlattenkomparator erfolgten. Tab. 3-1 zeigt zudem auf, dass in den meisten Prüflabors jede Latte mehrfach kalibriert wurde, was die beiden untereinander stehenden Werte für mLabor wiedergeben. Vor Aufnahme von Prüfmessungen fand eine ausreichende, mehrstündige Temperaturangleichung an die im Prüflabor vorherrschenden meteorologischen Bedingungen statt. Will man die Untersuchungsergebnisse verschiedener Prüflabore miteinander vergleichen, müssen Kriterien existieren, die eine qualitative Beurteilung der ermittelten Messdaten zulassen. So sollten sowohl die benutzten Prüfstandards, z.B. Erfassung der meteorologischen Parameter, Temperaturstabilität, Erfassung der Strichkanten durch die jeweilig eingesetzte elektrooptische Sensorik (photoelektrische Messmikroskops oder CCD) ähnlich hoch und gleichwertig sein als auch die Prüfziele koinzidieren.

Tab. 3-2: Ergebnisse des Ringversuchs zur Maßstabsbestimmung von Präzisionsnivellierlatten (H = Horizontalkomparator, V = Vertikalkomparator)

Ringversuch 2003/2004 – Zusammenstellung der Einzelergebnisse –						
Prüfinstitute	Prüflinge	Trimble LD13 (mit DiNi 12)		Leica GPCL3 (mit DNA03)		
		SN 15017 m _{Labor} [ppm]	SN 14821 m _{Labor} [ppm]	SN 9113 m _{Labor} [ppm]	SN 121002 m _{Labor} [ppm]	
UniBN	Lattenkalibrierung (H)	1. Messg.	5,5	– 8,1	6,4	1,4
		2. Messg.	6,1	– 7,7	5,9	1,5
TUG	Systemkalibrierung (V)	1. Messg.	3,6	– 11,1	5,7	1,1
		2. Messg.	3,3	– 10,7	5,5	– 0,1
UniBw	Systemkalibrierung (H)	1. Messg.	8,0	– 6,5	9,0	6,2
		2. Messg.	7,2	– 7,7	7,4	3,4
	Lattenkalibrierung (H)	1. Messg.	6,0	– 5,8	5,5	1,7
		2. Messg.	5,9	– 5,7	6,1	1,6
TUM	Lattenkalibrierung (V)	4,0	– 14,3	4,3	1,2	
ETH	Lattenkalibrierung (H)	3,8	– 8,4	6,4	0,7	
UniBN	Lattenkalibrierung (H)	1. Messg.	5,5	– 7,3	6,6	1,2
		2. Messg.	5,9	– 7,4	6,1	1,7
UniBN	Lattenkalibrierung (H)	1. Messg.	6,6	– 7,0	5,7	1,4
		2. Messg.	6,8	– 6,9	5,8	1,6
TUM	Lattenkalibrierung (V)	1. Messg.	3,4	– 11,3	1,2	– 2,1
		2. Messg.	3,0	– 11,6	0,8	– 1,7
UniBN	Lattenkalibrierung (H)	1. Messg.	6,1	– 6,8	6,3	2,4
		2. Messg.	5,9	– 6,5	6,5	2,9

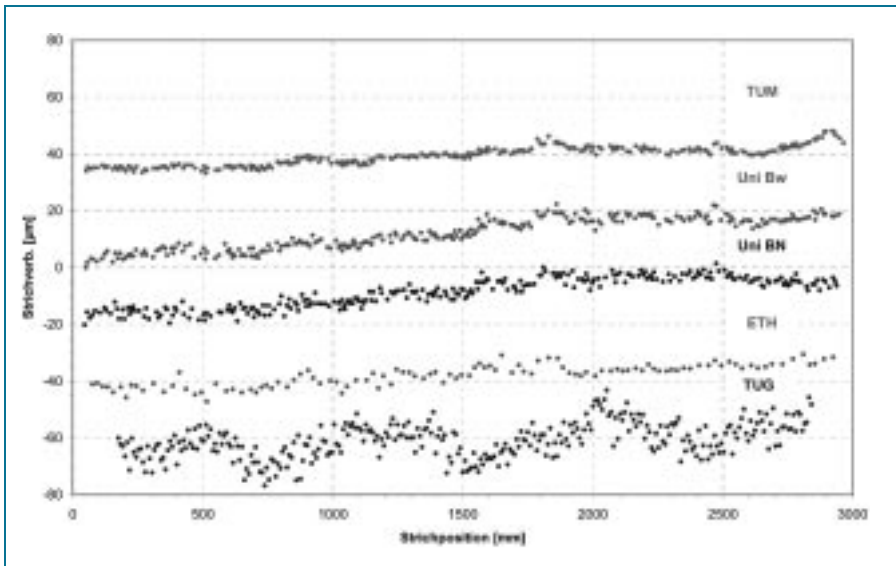


Abb. 3-1: Prüfergebnisse für die Nivellierlatte LD 13 (SN 15017)

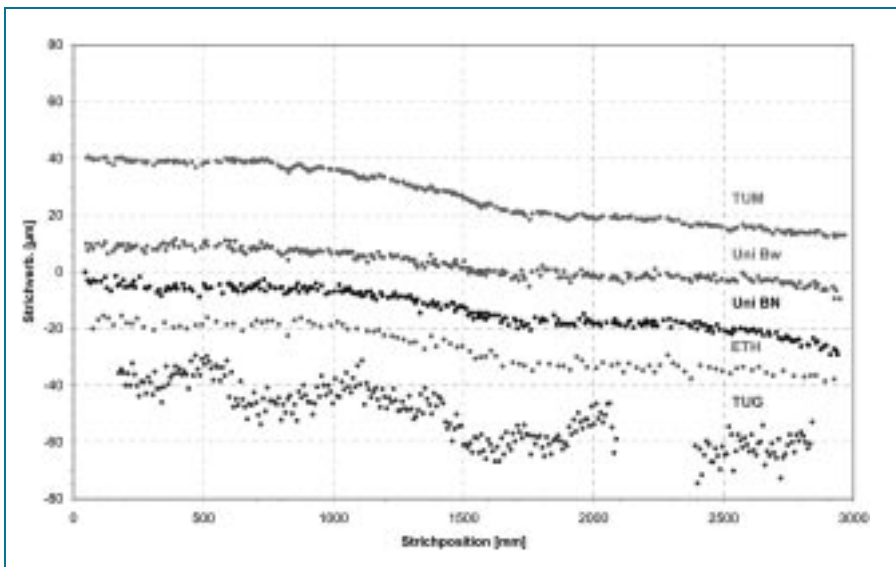


Abb. 3-2: Prüfergebnisse für die Nivellierlatte LD 13 (SN 14821)

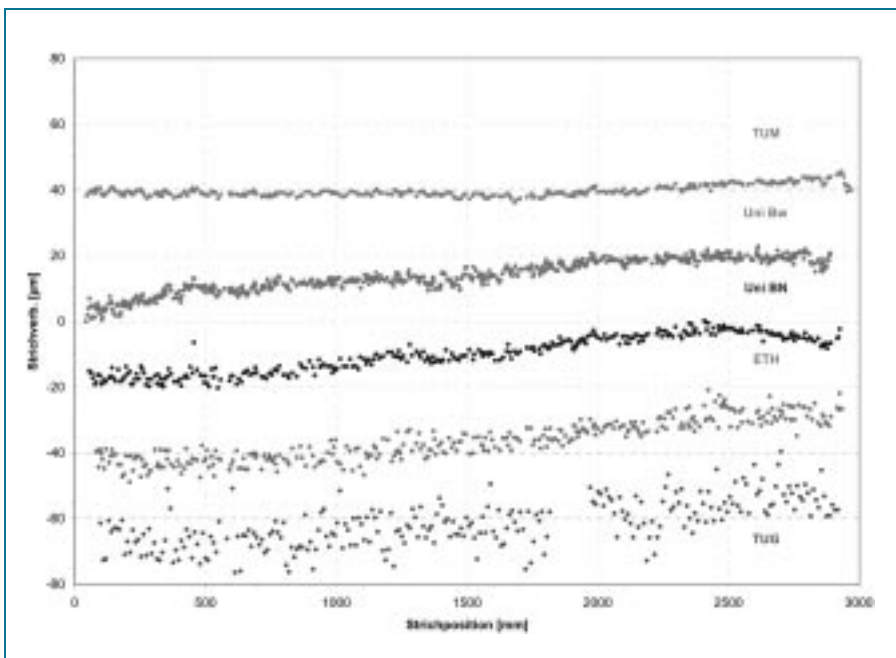


Abb. 3-3: Prüfergebnisse für die Nivellierlatte GPCL 3 (SN 9113)

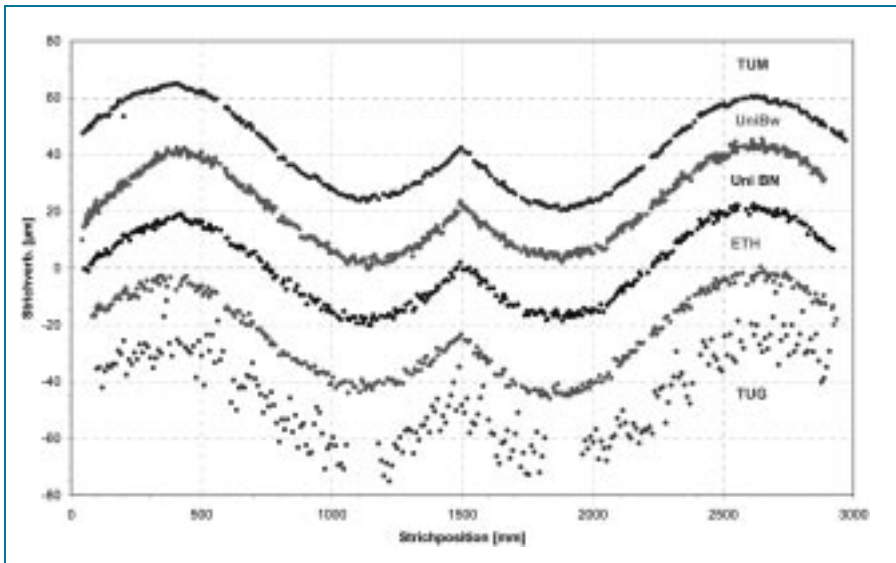


Abb. 3-4: Prüfergebnisse für die Nivellierlatte GPCL 3 (SN 121002)

Gilt dies in einer gewissen Bandbreite für die Komparatoren, so gibt es jedoch Unterschiede beim Prüfziel: Bei der *Systemkalibrierung* und der *Lattenkalibrierung* müssen die Ergebnisse der Maßstabsbestimmung nicht zwingend vergleichbar sein (HEISTER ET AL., 2005). Im Prüfergebnis einer Systemüberprüfung interferieren Einflüsse, die einerseits von der vorhandenen Teilungsstruktur der Codelatte geprägt und andererseits von der Messeigenschaften des benutzten Nivellierinstruments überlagert werden, während bei der reinen *Lattenkalibrierung* ausschließlich Aussagen über die Teilungsqualität der Nivellierlatte im Vordergrund stehen (WOSCHITZ 2003).

In diesem Zusammenhang sind die Ergebnisse des Ringversuchs zu interpretieren, wenn man die in der Tabelle 3-2 zusammengestellten Kalibrierergebnisse vergleicht. Alle von den Prüflaboren übergebenen Messwerte wurden nach o.a. Formel auf die Referenztemperatur von 20 °C reduziert. Durch direkten Vergleich mit der Soll-Lage eines jeden Codeelementes konnte dann bei der *Lattenkalibrierung* durch lineare Regression der Maßstabsfaktor (Lattenmaßstab) bestimmt werden. Bei der *Systemkalibrierung* wurde der Soll-Ist-Vergleich durch eine direkte Gegenüberstellung interferometrischer „Soll“-Ablesungen und der unmittelbar am Digitalnivellier ermittelten Höhe vorgenommen. Die Auswertung liefert dann den *Systemmaßstab*. Alle Messergebnisse sind für die jeweiligen Prüflinge und Prüflabore in den nachfolgenden Grafiken (Abb. 3-1 bis 3-4) zusammengestellt. Um eine ausreichende Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurden

die einzelnen „Kurven“ auf der Ordinatenachse verschoben auftragen. Eine Interpretation erfolgt im Abschnitt 4. In Abbildung 3-4 ist das typische Muster, hervorgerufen durch die von der Fa. NEDO provozierte Verfälschung der Lage der Codeelemente, deutlich zu erkennen. Dieser Versuch sollte in besonderem Maße veranschaulichen, wie deutlich durch die verschiedenen Kalibrierverfahren Systematiken in den Positionen der Codeelemente detektierbar sind.

Gleichermaßen verursachte eine ca. 1.5 mm große Beschädigung auf der LD 13-Nivellierlatte mit der Seriennummer SN 14821, die nicht im Bereich einer Strichkante angesiedelt ist (vgl. Abb. 3-5), erhebliche Fehlmessungen. Lediglich die Systemkalibrierung deckte diese innerhalb eines begrenzten Höhenmessbereichs signifikant auf. Dieser Bereich zwischen 2,1 m und 2,4 m blieb deshalb bei der TUG-Kurve (vgl. deren Darstellung in Abb. 3-2) ausgespart, um eine systematische Verfälschung des mittleren Lattenmeters zu vermeiden; die Höhenablesungen zeigten in diesem Bereich Differenzen zu ihren „Sollwerten“ von bis zu 1,5 mm.

4. Bewertung der Ergebnisse

Es ist davon auszugehen, dass sowohl die in den fünf Prüflaboratorien aufgebauten Komparatoren mit ihren horizontalen oder vertikalen Messanordnungen für die Prüflinge als auch die nicht vergleichbaren Techniken zur Stricherfassungen unterschiedliche Auswirkungen auf den Prüfprozess haben. Des Weiteren lassen sich eine Reihe systematischer Einflüsse nicht ausschließen, wie durch

- die Erfassung der meteorologischen Parameter,
- mechanischen Störungen bei den Führungen,
- nicht konsequente Einhaltung des Abbéschen Komparatorprinzips (Folge: Cosinus-Fehler),
- variierende Verfahrensgeschwindigkeit während des Scanprozesses,
- Unzulänglichkeiten des photoelektrischen Messmikroskops oder der CCD-Kamera (z.B. nicht lotrechte Ausrichtung, Abstandsschwankungen des Teilungsträgers, Tiefenschärfe),



Abb. 3-5: Beschädigung auf der Latte LD 13 (SN 14821)

- mechanische Mängel der Nivellierlatte (z.B. durchgebogenes oder tordiertes Lattengehäuse, Führungsfehler des Invarbandes, ungleichmäßige Zugspannung usw.) sowie
- die Auswirkungen der durch die Herstellung bedingte „Zerlegung“ der Teilung in mehrere Brennpuren (s.u.).

Dennoch können die Ergebnisse als hervorragend zu bezeichnet werden. Allen Laboren muss ein hoher Standard in dieser speziellen Kalibriertechnik bescheinigt werden. Der durch den Herstellungsprozess maßgeblich bestimmte „Kurvenverlauf“ wird durch alle Prüfverfahren, insbesondere natürlich durch die Verfahren der *Lattenkalibrierung*, eindeutig erkannt (vgl. Abb. 3-4). Die geringe Streuung der Messwerte spiegelt die hohe Messauflösung und -qualität der verschiedenen Komparatoren wieder. Die *Wiederholpräzision* des durch die Regression bestimmten Maßstabes, die man z.B. aus den in einem Prüflabor durchgeführten Mehrfachmessungen ableiten kann, unterschreitet bei *allen Laboren und Verfahren* für die relative Standardabweichung s_m den Wert von 0,5 ppm.

Ein wichtiges Ziel des Ringversuchs ist es, die *Vergleichbarkeit der ermittelten Maßstabsfaktoren* zu untersuchen, die insbesondere für die bei Kalibriermessungen notwendige Rückführung von Bedeutung sind. Der direkte numerische Vergleich der in Tab. 3-1 zusammengestellten Ergebnisse lässt erkennen, dass die bei den Lattenkalibrierungen aufgetretenen Abweichungen von 3–4 ppm ein Vielfaches der Präzisionsstandardabweichung überschreiten und zunächst nur durch die o.a. systematischen Einflüsse begründbar sind. Selbst wenn nicht generell *Systemkalibrierung* und *Lattenkalibrierung* zu den gleichen Ergebnissen führen müssen (WOSCHITZ, 2005, HEISTER et al., 2005), so soll hier versucht werden, aus *allen* Kalibriermessungen des Ringversuchs *eine Vergleichspräzision* für den Maßstabsfaktor abzuleiten. Hierzu können speziell für die Analyse von Ringversuchen die in der ISO 5725 „Precision of test methods – Determination of repeatability and reproducibility by interlaboratory tests“ dargelegten statistischen Verfahren herangezogen werden. Der einfachste Test, ob Messergebnisse und deren Messunsicherheiten der einzelnen Labore mit dem Gesamtmittel übereinstimmen, ist die Überlappung der Unsicherheitsbereiche zu überprüfen. Diese als Q-Scores Methode bekannte Methode wird algebraisch durch nachfolgende Gleichung beschrieben:

$$Q = \frac{|M - m_{\text{Labor}}|}{u_M + u_m} \leq 1$$

Hierin bedeuten

m_{Labor} der Mittelwert des Maßstabs des einzelnen Labors,

M der Mittelwert des Maßstabmittels aller Labore,

u_M die Standardunsicherheit des Mittels m_{Labor} ,

u_m die Standardunsicherheit des Mittelwertes M , sowie

Q die Prüfgröße.

Fällt die Prüfgröße > 1 aus, ist der Test nicht bestanden und das Laborergebnis muss als „unverträglich“ eingestuft werden.

Ein zweiter Test, angelehnt an den Student-Test, überprüft die Zugehörigkeit aller Laborergebnisse zu *einem* Kollektiv durch die Bestimmung der Prüfgröße

$$PG(t) = \frac{|M - m_{\text{Labor}}|}{u_M} \leq \gamma_{(1-\alpha/2, (n-1))}$$

worin

γ die Vertrauensgrenzen der Studentverteilung,

α das Signifikanzniveau und

n die Anzahl der beteiligten Labore bedeutet.

Mit einem Signifikanzniveau von 99 %, $\alpha = 1\%$, und $n = 6$ wird $\gamma_{(0,995, 5)} = 4,03$.

Die Ergebnisse für beide Tests sind in der nachfolgenden Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Aus dieser Gegenüberstellung kann mit den o.a. Einschränkungen bis auf eine Ausnahme festgestellt werden, dass die Maßstabsbestimmungen der einzelnen Labore im Rahmen des vorgegebenen Signifikanzniveaus nicht im Widerspruch stehen. Man erkennt eine gute Übereinstimmung in der *Lattenkalibrierung* zwischen den drei Prüflaboren UniBN, UniBw und ETH. Die Differenzen in der Systemkalibrierung zwischen TUG und UniBw sind ebenfalls im Rahmen der Messunsicherheit kaum signifikant.

Vergleicht man nochmals die Maßstabsfaktoren getrennt nach dem jeweiligen Kalibrierverfahren, dann sind durchaus gewisse Systematiken erkennbar. Deshalb wurden diese Mittelwerte nochmals in der Tabelle 4-2 zusammengestellt.

Hieraus ist ersichtlich, dass

- es einen signifikanten Unterschied von 3.2 ppm zwischen den Ergebnissen aus *horizontaler* und *vertikaler* Kalibrierung gibt. – Eine Modellrechnung belegt, dass bei horizontaler Lage der Nivellierlatte der Maßstabsfaktor nur um ca. 1,2 ppm zu lang bestimmt wird bzw. eine 3 m lange Nivellierlatte verkürzt sich in vertikaler Stellung um 3,7 μm (FISCHER, 2004).
- die *Systemkalibrierung* bei den Nivellierlatten von Trimble/Zeiss uneinheitliche, nur partiell signifikante Differenzen zur *Lattenkalibrierung* aufweist. Dies kann mit großer Wahrscheinlichkeit auf Systematiken im Digitalisierungsprozess zurückgeführt werden, was unverkennbar die periodischen Anteile in den Soll-Ist-Abweichungen der TUG-Prüfmessungen in den Abb. 3-1 und 3-2 deutlich machen (WOSCHITZ 2003, HEISTER et al. 2005).
- für die Leica Codelatte die *System-* und *Lattenkalibrierung* eine gute Übereinstimmung aufweist. Die Soll-Ist-Abweichungen in der Abb. 3-3 zeigen keine vergleichbaren Systematiken.

Aus diesen Gegenüberstellungen und Analysen lässt sich somit eine **Vergleichspräzision** (Standardunsicherheit) für die **Maßstabsbestimmung** bei der Kalibrierung von Nivellierlatten von **$u_m = 1.6$ ppm** angeben (vgl. Tab. 4-1). Diese Quantifizierung der Messunsicherheit gilt für alle beteiligten Labore, wobei der nicht zum Kollektiv detektierte Maßstabswert sowie die nicht maßstabstaugliche Latte SN 121002 unberücksichtigt blieben.

Abschießend sollen noch weitere wichtige Erkenntnisse aus dem Ringversuch erwähnt werden:

- Beschädigungen, wie sie bei der Latte SN 14821 aufgetreten sind (s. Abb. 3-5), können in ihren Auswirkungen auf die Höhenmessung nur bei der *Systemkalibrierung* präzise aufgedeckt und quantifiziert werden (vgl.

Tab. 4-1: Zusammenstellung aller Labormittelwerte des Maßstabs und der Prüfgrößen, sowie Bestimmung der Vergleichspräzision (alle Maßangaben in ppm)

Prüfling	UniBN (L,H)	UniBw (L,H)	TUM (L,V)	ETH (L,H)	TUG (S,V)	UniBw (S,H)	M	u_m	u_M
SN 15017: m	6,0	6,0	3,5	3,8	3,4	7,6	5,0	1,73	0,71
d = M – m	– 1,0	– 0,9	1,6	1,2	1,6	– 2,6	-	-	-
Q ≤ 1	0,4	0,4	0,6	0,5	0,7	1,0	-	-	-
PG(t) ≤ 4,03	1,4	1,3	2,2	1,7	2,2	3,7	-	-	-
SN 14821: m	– 7,2	– 5,8	– 12,4	– 8,4	– 10,9	– 7,1	– 8,6	2,52	1,03
d = M – m	– 1,4	– 3,0	3,8	– 0,2	2,3	– 1,5	-	-	-
Q ≤ 1	0,4	0,8	1,1	0,0	0,6	0,4	-	-	-
PG(t) ≤ 4,03	1,4	2,9	3,7	0,2	2,2	0,4	-	-	-
SN 9113: m	6,2	5,8	2,1	6,4	5,6	8,2	5,7	2,00	0,82
d = M – m	– 0,5	– 0,1	3,6	– 0,7	0,1	– 2,5	-	-	-
Q ≤ 1	0,2	0,0	1,3	0,5	0,0	0,9	-	-	-
PG(t) ≤ 4,03	0,6	0,1	4,4	0,8	0,1	3,0	-	-	-
Akzeptanz/ Vgl.Präzision	in Ordn.	in Ordn.	in Ordn. <i>m. Einschr.</i>	in Ordn.	in Ordn.	in Ordn.	-	2,1 (1,6)	

dazu auch WOSCHITZ, 2005). Bei der *Lattenkalibrierung* wirken sie sich allenfalls auf die Kantendetektion aus und werden eventuell als Ausreißer erkannt.

- Aufgrund der hier wiedergegebenen Ergebnisse kann man schließen, dass sich durch den Lattentransport über die Zeit von ca. einem Jahr die Länge des Teilungsträgers (Invarband) weder kontinuierlich noch sprunghaft verändert hat. Alle Latten mussten im Rahmen des Ringversuchs Transportwege von mehr als 3500 km mit dem PKW zurücklegen.
- Die Code-Teilung überdeckt die gesamte Breite des Invarbandes von 25 mm. Um eine hohe Teilungsgüte zu gewährleisten, wird ein Strich bei der Herstellung durch fünf überlappende Brennsuren von ca. 6 mm Breite sequentiell zusammengesetzt. Detailuntersuchungen einzelner Labore haben aufgedeckt, dass sich durch den vorgenannten Fertigungsprozess eventuell systematische Einflüsse aufzeigen lassen, die u.U. einen Teil der noch nicht verifizierten Maßstabsdifferenzen erklären könnten. (vgl. hierzu SCHAUERTE/FASSBENDER, 2005 in Vorbereitung).

5. Resümée

Der Ringversuch hat eindeutig gezeigt, dass die beteiligten Prüflaboratorien in der Lage sind, sowohl Maßstabsbestim-

mungen für die Verbesserung des digitalen Nivellements als auch Überprüfungen der Teilungsgenauigkeit von Code-latten mit einer Messunsicherheit (Vergleichbarkeit) von besser als 2 ppm (entspricht einem Wert von 0.2 mm bei einem Höhenunterschied von 100 m) durchzuführen. Weiterhin kann die gute Übereinstimmung der durch die unterschiedlichen Kalibrierverfahren gewonnenen Messergebnisse dazu dienen, die fehlende Kalibrier-Hierarchie für geodätische Messmittel zur Rückführung der Messgröße „Länge“ durch diesen Ringversuch zu ersetzen. Es wurde auch deutlich, dass im o.a. Messunsicherheitenintervall keine eindeutigen Aussagen über Unterschiede in der Maßstabsbestimmung bei horizontaler oder vertikaler Prüflingslage abzuleiten sind. Dies gilt grundsätzlich ebenfalls für den Vergleich der System- und Lattenkalibrierung. Hierbei ist jedoch einzuschränken, dass typen- und entfernungsabhängige Einflüsse durchaus zu signifikanten Differenzen führen können.

Zusammenfassend muss betont werden, dass dieser Ringversuch bei *allen* Laboratorien wichtige Detailkenntnisse für diese spezielle Aufgabe der Kalibrierung von Code-Latten hervorgebracht hat, die sowohl zur Verbesserung der Kalibriereinrichtungen als auch zur Zuverlässigkeit der Prüfmessungen wesentlich beigetragen haben. Deshalb wird es auch zukünftig, sowohl zum Erhalt der Prüfstandards der einzelnen Labore als auch für die Weiterent-

Tab. 4-2: Mittelwerte der Maßstabsfaktoren, getrennt nach Kalibrierverfahren (H) Horizontal- und (V) Vertikalkomparator, (L) Latten- und (S) Systemkalibrierung, alle Angaben in ppm

Prüfling	Methode	(H)	(V)	(L)	(S)	M	(H)-(V)	(L)-(S)	
Trimble/Zeiss	SN 15017	5,8	3,4	4,8	8,4	5,0	+ 2,4	– 3,6	
	SN 14821	– 7,1	– 11,6	– 7,1	– 9,0	– 8,6	+ 4,5	+ 1,9	
Leica	SN 9113	6,6	3,8	6,1	6,9	5,7	+ 2,8	– 0,8	
Mittel:								+ 3,2	– 0,8

wicklung von Prüfverfahren für neue Typen geodätischer Instrumente, unverzichtbar sein, ähnliche Experimente zu wiederholen.

5.1. Danksagung

An dieser Stelle ist ausdrücklich allen Institutionen und Personen die mit zum Gelingen dieses fachlich und logistisch aufwendigen Versuchs beigetragen haben herzlich zu danken. Besonderer Dank gilt den Laboringenieuren, die auch zu unbequemen Zeiten mit großem Engagement die Prüfmessungen durchgeführt haben, aber auch allen Beteiligten des „Runden Tisches“ für die offenen und vielfältigen fachlichen Diskussionen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] BRUNNER, F. K.; WOSCHITZ, H. (2001): Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In HEISTER, H. UND STAIGER, R. (eds.): Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Konrad Wittwer Verlag, DVW Schriftenreihe 42: 70–90
- [2] FISCHER, T. (2004): Betrachtung der Bandspannung in horizontaler und vertikaler Lage. Persönliche Kommunikation
- [3] FOPPE, K.; WASMEIER, P.; WUNDERLICH, TH. (2005): Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfungen an der TUM. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [4] HEISTER, H. (1994): Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. In: BRUNNER, K. und PEIPE, J. (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 46, S. 95–101
- [5] HEISTER, H.; WOSCHITZ; BRUNNER, F. K. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [6] SCHAUERTE, W.; FASSBENDER, H. (2005): Mögliche Auswirkungen des Strichherstellungsprozess auf die Prüfmessungen von Invarbandnivellierlatten. In Vorbereitung
- [7] SCHLEMMER, H. (2005): 30 Jahre Laser-Interferenzkomparatoren für Präzisionsnivellierlatten, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [8] SCHWARZ, W. (2004): Komparatoren zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten. In diesem Heft
- [9] WOSCHITZ, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker-Verlag, Aachen, 2003
- [10] WOSCHITZ, H. (2005): Systemkalibrierung: Effekte von Digitalen Nivelliersystemen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 2005, Heft 6

Anschriften der Verfasser
Dr.-Ing. WOLFGANG SCHAUERTE,
Geodätisches Institut der Universität Bonn,
Nussallee 17, 53115 Bonn,
schauerte@uni-bonn.de

apl. Prof. Dr.-Ing.habil. HANS HEISTER,
Institut für Geodäsie,
Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39,
85577 Neubiberg,
h.heister@unibw-muenchen.de

Zusammenfassung

Im Jahre 2003/2004 hatten fünf, im deutschsprachigen Bereich angesiedelte Prüflaboratorien den Ringversuch „Nivellierlattenkalibrierung“ durchgeführt. Anhand ausgesuchter Prüflinge (Präzisionsnivellierlatten in Form von Invar-Codelatten der Hersteller Leica und Trimble/Zeiss) erfolgten Untersuchungen, um numerische Kenndaten über die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der unterschiedlichen Kalibrierverfahren (Lattenkalibrierung, Systemkalibrierung) und -einrichtungen (Horizontal- und Vertikalkomparator) zu gewinnen.

Die erzielten Ergebnisse machen deutlich, dass die beteiligten Prüflaboratorien in der Lage sind, sowohl Maßstabsbestimmungen als auch Überprüfungen der Teilungsgenauigkeit von Codelatten mit der geforderten hohen Genauigkeit durchzuführen. Die erreichte Messunsicherheit liegt bei ≤ 2 ppm. Es wurde auch deutlich, dass dieses unter Berücksichtigung dieses Genauigkeitsmaßes keine eindeutigen Aussagen über Unterschiede in der Maßstabsbestimmung bei horizontaler oder vertikaler Prüflingslage zulässt. Dies gilt grundsätzlich ebenfalls für den Vergleich der System- und Lattenkalibrierung. Hierbei ist jedoch einzuschränken, dass typen- und entfernungsabhängige Einflüsse durchaus zu signifikanten Differenzen führen können.

Abstract

During the years 2003/2004 five geodetic laboratories in three German-speaking European countries performed interlaboratory tests concerning calibration of levelling staffs. Four well selected test items, coded invar staffs of the manufacturers Leica and Trimble/Zeiss, were investigated, to determine numerical characteristics like correctness and reliability of different calibration procedures (staff calibration, system calibration) and varying calibration facilities (vertical and horizontal comparators).

The analysis and valuation of the test results yielded a high precision in determining the scale value and in reviewing the graduation specifications of coded staffs. The trial afforded an uncertainty of measurement (reproducibility) better than 2 ppm. It is obvious that in consideration of this measure of accuracy no conspicuous differences neither in the both methods of scale determination – staff calibration or system calibration – nor in respect of the staffs position – horizontal or vertical – could be detected. In this connection it must be considered, that instrument and distance dependent influences can of course produce significant differences in both calibration procedures.

Keywords

Ringversuch, Präzisionsnivellierlatten, Digitalnivelliere, Codelatten, Kalibrierung, Maßstabsbestimmung, Systemkalibrierung, systematische Einflüsse