



Komparatoren zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten

W. Schwarz

In diesem Beitrag werden die automatisch arbeitenden Komparatoren der am Runden Tisch „Kalibrierung Geodätischer Messmittel“ beteiligter Prüflabore vorgestellt und die markantesten systembedingten Unterschiede aufgezeigt.

1 Einführung

Bei Präzisionsnivellements werden Nivellierlatten eingesetzt, bei denen in einem Aluminiumrahmen ein Invarband mit der Teilung eingespannt ist. Bei Nivellements mit klassischen Präzisionsnivellieren werden Präzisionsnivellierlatten mit Zentimeter- bzw. Halbzentimeterteilungen (Strichlatten) verwendet; die Strichbreite beträgt dabei 2 mm. Bei Nivellements mit Digitalnivellieren werden Codelatten eingesetzt (INGENSAND 2005). Die Teilung ist angepasst an das jeweilige Bildverarbeitungsverfahren und besteht aus Strichen unterschiedlicher Abstände und Strichbreiten (Codeelemente).

Die Teilung der bei der Firma Nedo hergestellten Nivellierlatten (Strichlatten und Codelatten) wird derzeit mit Hilfe eines laserinterferometrisch gesteuerten Einbrennsystems auf das 25 mm breite Invarband übertragen. Da eine Brennspur systembedingt nur ca. 5 mm breit ist, wird die Teilung durch fünf nebeneinandergelegte einzelne Brennsuren zusammengesetzt. Die Teilung wird danach mit einer transparenten Schutzlackierung versehen (FISCHER und FISCHER 1999), (FASSBENDER und SCHAUERTE 2001).

Um die Genauigkeitsforderungen von Präzisionsnivellements zu erreichen, sind die eingesetzten Präzisionsnivellierlatten zu kalibrieren. Heutzutage besteht die Aufgabe einer Kalibrierung darin, den Abstand eines jeden Teilstrichs vom Nullpunkt bzw. vom ersten Dezimeterstrich der Nivellierlatte zu bestimmen. Dafür werden in der Regel automatisch arbeitende Komparatoren mit einem Laserinterferometer und einem Stricherfassungssystem eingesetzt; automatisch arbeitende Komparatoren wurden erstmals von SCHLEMMER (1975) eingeführt. Aus den Ablagen der Teilstriche vom Sollwert kann dann das *mittlere Lattenmeter (Maßstab)* über eine lineare Regression abgeleitet werden. Nach der DIN 18717 (Stand: November 1996) darf die Grenzabweichung für jeden beliebigen Lattenabschnitt den Wert $\Delta l = \pm(0,02 \text{ mm} + 2l \cdot 10^{-5})$ mit $\Delta l = \text{Grenzabmaß in mm}$ und $l = \text{Länge der Nivellierlatte in mm}$ nicht überschreiten. Unter Anwendung des „Leitfadens zur Angabe der Unsicherheit beim Messen GUM (= Guide to the Expression of Uncer-

tainly Measurement)“ (DIN 13005) und unter Abschätzung nicht erfassbarer systematischer Messabweichungen beim Kalibriervorgang (HEISTER 2001) ergibt sich eine theoretisch zulässige Kalibriergenauigkeit von 9 ppm (HEISTER 2004), die jedoch nicht ausgeschöpft werden sollte. Dafür ist es erforderlich, die Teilstriche mit einer Standardabweichung in der Größenordnung von 5 μm zu bestimmen.

Die Kalibrierung sollte in der Längsachse der Teilung erfolgen. Würde hingegen die Kalibrierung in den Randbereichen der Teilung durchgeführt, so könnten sich systematische Maßstabsabweichungen des mittleren Lattenmeters von bis zu ± 2 ppm ergeben, weil das Invarband in seiner Führung um bis zu $\pm 0,5$ mm seitlich verschoben werden kann (SCHMID und INGENSAND 1995, Seite 50). Außerdem sollten die Bereiche der fertigungsbedingten Stoßstellen der Teilung bei einer Kalibrierung nach Möglichkeit gemieden werden.

Bei Präzisionsnivellierlatten mit Strichteilungen – im Gegensatz zu Codeteilungen – steht im Mittelpunkt der Kalibriertätigkeit die Bestimmung des „mittleren Lattenmeters (Maßstab)“. Man spricht deshalb auch von einer sog. „Strichkalibrierung“. Die Latten können je nach Aufbau des Komparators in Gebrauchslage – also vertikal – oder in horizontaler Lage kalibriert werden. Inwieweit die Kalibrierergebnisse von der Lattenstellung – horizontal oder vertikal – beeinflusst werden, wird in FOPPE u.a. (2005) diskutiert. Instrumentenspezifische Eigenschaften wie z.B. der Ziellinienfehler, etwaige Temperaturabhängigkeiten des Instruments usw. werden hierbei in der Regel durch eine Kalibrierung nicht erfasst. Derartige Einflüsse werden durch eine spezielle Messanordnung bzw. durch eine regelmäßige Justierung minimiert.

Bei Digitalnivellieren hingegen werden spezielle Codelatten verwendet. Neben der Forderung, dass die geometrischen Eigenschaften der Codestruktur vergleichbare Genauigkeiten wie bei den Latten mit Strichteilungen zu erfüllen haben (Strichkalibrierung), sind nun zusätzlich instrumentenspezifische Eigenschaften wie z.B. die des abbildenden Systems (Verzeichnung des Objektivs), des Zeilensensors, der Eigenerwärmung des Instruments usw. zu berücksichtigen. Nivellierlatte und Instrument werden *gemeinsam* kalibriert; es wird also das gesamte Nivellier-System betrachtet. Deshalb spricht man hier auch von einer „Systemkalibrierung“ (HEISTER 1994), (RÜEGGER und BRUNNER 1999), (HENNES und INGENSAND 2000), (BRUNNER und WOSCHITZ 2001), (HEISTER u.a. 2005), (WOSCHITZ 2005).

Weiterhin können in einer Kalibrierung der Nullpunktfehler der Nivellierlatte und der lineare Materialausdehnungskoeffizient des Invarbandes bestimmt werden.



Ebenso wichtig sind Untersuchungen des Lattenfußes auf Ebenheit und Rechtwinkligkeit zur Stehachse der Nivellierlatte. Es können nur Nivellierlatten kalibriert werden, die keine Beschädigungen der Strichteilungen aufweisen, nicht verschmutzt sind und ansonsten den Forderungen der DIN 18717 weitestgehend entsprechen. STAIGER und WITTE (2005) führen weitere Aspekte zur Prüfung der Nivellierausrüstung an und geben Empfehlungen zum praktischen Gebrauch.

Im Folgenden sollen die Komparatoren der am Runden Tisch „Kalibrierung Geodätischer Messmittel“ beteiligten Prüflabore (SCHLEMMER 2005) vorgestellt und es soll auf deren markante Merkmale hingewiesen werden. Im Einzelnen sind es folgende Labore, die in alphabetischer Sortierung ihrer Standorte angesprochen werden:

- Geodätisches Institut der Universität Bonn (Uni Bonn)
- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz (TU Graz)
- Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München (TU München)
- Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor der Universität der Bundeswehr München (UniBw München)
- Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich

2 Aufbau der Komparatoren

Als Prüfnormale werden bei den Komparatoren zumeist *Zweifrequenz He-Ne-Laserinterferometer* eingesetzt, deren Frequenzen nach Zeeman stabilisiert werden. Auf den Einsatz von Laserinterferometern und die Besonderheiten, die bei der Kalibrierung von z.B. Strichmaßstäben mit Laserinterferometern zu beachten sind, wird in HEISTER (1988) ausführlich eingegangen, so dass an dieser Stelle auf diese Literaturstelle verwiesen wird. Bei der Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten mit einem eingelegten Invarband, auf dem die Teilung aufgebracht ist, sind Ebenheitsabweichungen von $\pm 0,5$ mm keine Seltenheit. Diese Ebenheitsabweichungen führen bei nicht senkrechter Ausrichtung der Mikroskopachse zu systematischen Messabweichungen (SCHMID und INGENSAND 1995, Seite 45).

2.1 Kalibriereinrichtungen der Universität Bonn

Das Geodätische Institut der Universität Bonn verfügt über einen *Horizontalkomparator* für die automatische Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten. Für die Strichfassung wurde in den letzten Jahren ein photoelektrisches Mikroskop neu entwickelt (FASSBENDER und SCHAUERTE 2001). Mit diesem Mikroskop können Nivellierlatten sowohl mit Strich- als auch mit Codeteilungen kalibriert werden (Strichkalibrierung). Beim Bonner Mikroskop wird die Teilung über ein Fotoobjektiv zweifach vergrößert auf eine Empfängerphotodiode mit einer aktiven Fläche von ca. $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ abgebildet. Es wird also ein 3 mm breiter Bereich der Lattenteilung für die Kalibrierung benutzt. Der Bereich wird so gewählt, dass er stets innerhalb einer der fünf fertigungsbedingten Brennschichten liegt und negative Einflüsse, hervorgerufen durch etwaige

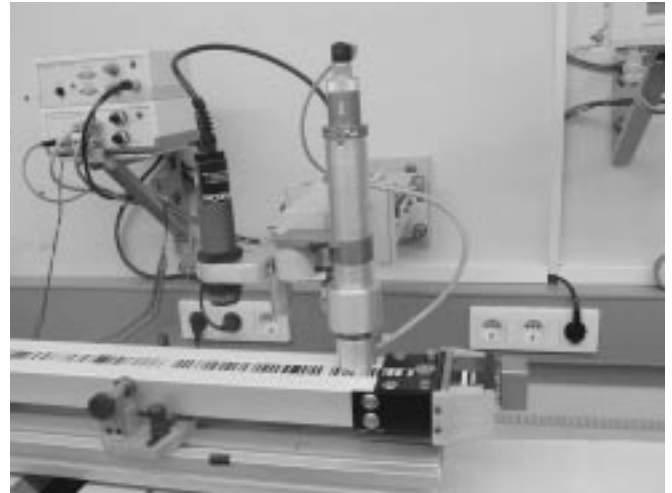


Abb. 1: Komparator der Uni Bonn mit dem photoelektrischen Messmikroskop

Stoßstellen benachbarter Brennschichten, vermieden werden. Durch den verhältnismäßig breiten Bereich von 3 mm der Lattenteilung, der für die Kalibrierung benutzt wird, wirken sich leichte Verschmutzungen und lokal begrenzte Beschädigungen der Teilung bei der Kalibrierung kaum aus.

Das Mikroskop ist fest an einer Wand des Messlabors montiert; unter ihm wird die in den Besselpunkten horizontal gelagerte Präzisionsnivellierlatte mit einer konstanten Verfahrgeschwindigkeit von 4,2 mm/s verschoben. Unter Beachtung des Abbeschen Komparatorprinzips (ABBE 1890) wird die Position der Nivellierlatte mit einem am Lattenfuß montierten Prisma mit einem Laserinterferometer erfasst (Abb. 1).

Beim Bonner Mikroskop wird die auf die Photodiode einfallende Lichtmenge als Spannungswert gemessen und der nahezu zeitsynchron mit einem Laserinterferometer gemessenen Lattenposition zugeordnet. Diese Wertepaare werden kontinuierlich in einer Datei abgespeichert, wobei zur Datenreduktion nur die Bereiche der Kantenübergänge betrachtet werden. Die so reduzierte Datenmenge für eine 3 m lange Präzisionsnivellierlatte beträgt zusammen für den Hin- und Rückweg dann lediglich ca. 250 kByte. Die Messwerterfassung kann in weniger als 30 Minuten (Hin- und Rückweg) abgeschlossen werden.

Nachdem die Kalibrierungsmessungen im Hin- und Rückgang durchgeführt worden sind, werden die aufgezeichneten Wertepaare „Spannung und Position“ einer Auswerteprozedur unterzogen. Die Spannungswerte der einzelnen Kantenübergänge werden mittels einer linearen Regression approximiert. Die Position eines bestimmten Kantenübergangs ergibt sich vorerst aus seiner Regressionsgeraden für die Normspannung von 2,500 Volt.

Am Lattenfuß können unter Einhaltung des Abbeschen Komparatorprinzips in Höhe der Lattenteilung ein 1 mm und ein 10 mm breites Parallelendmaß befestigt werden. Die Farbe des 1 mm breiten Endmaßes ist gelb und des 10 mm breiten ist schwarz. Dadurch haben die Kanten des 1 mm breiten Endmaßes einen definierten Abstand zur Lattenaufsatzfläche, wodurch der Nullpunktfehler der Latte bestimmt werden kann. Zudem wird es ermög-

licht, eine Normierung der Strichbreite vorzunehmen und damit dann alle für den Wert 2,500 Volt ermittelten Strichbreiten zu korrigieren (FASSBENDER und SCHAUERTE 2001). Mit der Bonner Einrichtung können die Kantenstrukturen von einwandfreien Präzisionsnivellierlatten mit einer Standardabweichung von besser als $1\ \mu\text{m}$ reproduziert werden. Die Differenzen zwischen Hin- und Rückmessungen liegen in der Größenordnung von $\pm 2\ \mu\text{m}$. Diese Differenzen werden zum Teil durch den für den Transport der Präzisionsnivellierlatte eingesetzten Zahnriemen hervorgerufen; ein Spindeltrieb würde hier eine Verbesserung mit sich bringen. Das mittlere Lattenmeter kann mit einer Standardabweichung von $< 0,4\ \text{ppm}$ bestimmt werden. Die Bonner Kalibriereinrichtung wird mit einem 2 m-langen Zerodur-Maßstab, der bei der PTB kalibriert worden ist, auf das Messnormal der PTB zurückgeführt. Dadurch ist weiterhin eine Überprüfung der gesamten Messeinrichtung einschließlich des Stricherfassungssystems gegeben. FASSBENDER und SCHAUERTE (2001) berichten, dass die Ergebnisse der Kalibrierung durch die Dicke des Schutzlackes, mit dem die Teilung überzogen wird, beeinträchtigt werden. Der Schutzlack bewirkt wohl durch zusätzlich diffuse Reflexionen, dass die Strichkanten nicht mehr so scharfkantig erkennbar sind. Systemkalibrierungen können derzeit mit dem Bonner Komparator noch nicht vorgenommen werden; derartige Möglichkeiten werden für einen Entfernungsbereich zwischen 6 m und 8 m vorbereitet.

2.2 Der Komparator der TU Graz

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz hat in den letzten Jahren einen *Vertikalkomparator* für Systemkalibrierungen entwickelt (WOSCHITZ 2003). Die Hauptkomponenten des im klimatisierten Messlabor des Instituts (Temperatur: $20,0\ \text{°C} \pm 0,5\ \text{°C}$, Luftfeuchtigkeit: $50\ \% \pm 10\ \%$) aufgebauten Komparators sind der Verfahrensschlitten für das Digitalnivellier (Nivellierwagen), das Rahmengestell für den Verfahrensschlitten mit dem die Nivellierlatte vertikal verschoben werden kann, das Laserinterferometer zur Bestimmung der Position der Nivellierlatte und die Beleuchtungseinrichtungen sowie Sensoren zur Erfassung der meteorologischen Parameter für die Korrektur der Messwerte des Laserinterferometers (Abb. 2). Der Nivellierwagen für das Digitalnivellier kann auf einer 30 m langen Betonbank verschoben werden, so dass der Abstand zwischen Digitalnivellier und Nivellierlatte in einem Bereich zwischen 1,5 m und 30 m verändert werden kann. Damit können für unterschiedliche Zielweiten Systemkalibrierungen durchgeführt werden. Die Anforderungen an die Stabilität des Messaufbaus sind bei Systemkalibrierungen wegen der längeren Messzeiten wesentlich höher als bei Strichkalibrierungen. Daher befinden sich das Interferometer sowie das Nivellier auf demselben, vom Gebäude getrennten, Fundament und es wurden die Adapter (Nivellierwagen, Absenkeinheit des Interferometers) aus Invar gefertigt. Dadurch behalten Nivellier und Interferometer ihre räumliche Lage bei, auch wenn sich die Temperatur im Labor leicht ändert (WOSCHITZ und BRUNNER 2003).

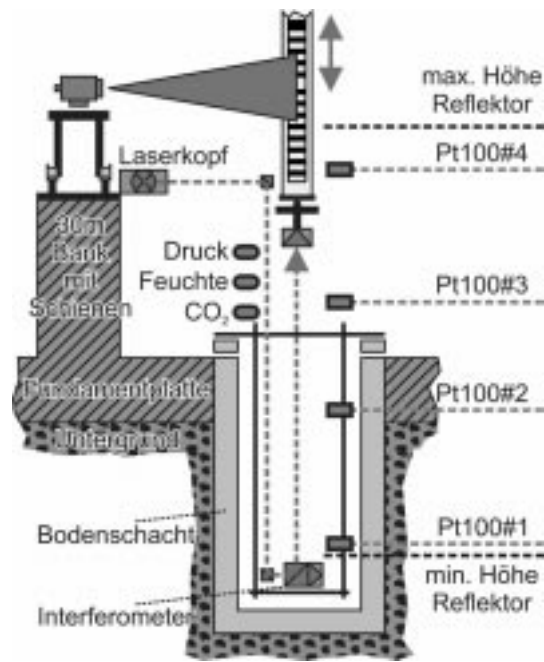


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Vertikalkomparators der TU Graz

Die vertikale Position der Nivellierlatte wird mit dem Laserinterferometer der Firma Hewlett-Packard bestimmt. Das Interferometer befindet sich am unteren Ende des Bodenschachtes, der Laserkopf am Ende der 30 m langen Betonbank (Abb. 3). Über optische Komponenten wird der Laserstrahl zu einem unter dem Lattenfuß befestigten Retroreflektor gelenkt. Laserstrahl und Invarband liegen in einer Ebene, so dass das Abbesche Komparatorprinzip



Abb. 3: Der Vertikalkomparator der TU Graz mit Blick vom Instrumentenstandpunkt

eingehalten wird. Um die Nivellierlatte, ausgehend von der Visurhöhe des Digitalnivelliers, über ihre Gesamtlänge von maximal 3 m verfahren zu können, sind im Fußboden und dem darunter befindlichen Erdreich sowie in der Decke des Messlabors Schächte ausgebrochen worden. Besonders der ins Erdreich eingebrachte Schacht weist über seine Höhe von 1,7 m einen starken Gradienten in der Lufttemperatur von bis zu 6 K auf (WOSCHITZ und BRUNNER 2003). In diesem Bereich sind die meteorologischen Parameter für die Korrektur der Messwerte des Laserinterferometers entsprechend repräsentativ zu erfassen. Weitere Details zum Aufbau des Komparators sind in WOSCHITZ und BRUNNER (2003) enthalten.

Mit dem Komparator der TU Graz wird eine Standardunsicherheit von $\pm 3 \mu\text{m}$ (bestimmt nach GUM mit $k = 2$) erreicht (WOSCHITZ und BRUNNER 2003), wodurch der Systemmaßstab eines Digitalnivelliers mit einer 3 m-Invarlatte mit einer Standardunsicherheit ($k = 2$) von $\pm 1 \text{ ppm}$ bestimmt werden kann. Wenn man den Lattenmaßstab und systematische Effekte bestimmen will, dauert eine Kalibrierung im Hin- und Rückgang z.B. für das DiNi11 genau 2 Stunden mit in Summe 275 ($= 2 \times 138 - 1$) Messpositionen. An jeder Messposition werden 3 Messungen mit dem Nivellier (Messzeit für eine Messung: 4–5 Sekunden) durchgeführt. Das Abtastintervall ist so optimiert, dass der Maßstab mit einer Standardabweichung von 0,3 ppm bestimmt werden kann (WOSCHITZ 2004).

2.3 Komparatoren der TU München

Mit dem *Vertikalkomparator* der TU München (MAURER und SCHNÄDELBACH 1983), (SCHNÄDELBACH und MAURER 1995) werden die Nivellierlatten in Gebrauchslage in einem klimatisierbaren Raum (umgebauter Fahrstuhl-schacht) kalibriert (Strichkalibrierung). Dazu wird die Nivellierlatte auf einer ca. 6 m langen Führungsbahn in einen Lattenhalter eingelegt; sie ist über ihre Länge von maximal 3 m über einen Spindeltrieb (Trapezgewinde, 7 mm/U) verfahrbar (Abb. 4). Fest mit der Führungsbahn verbunden ist eine Konsole, auf der das Mikroskop für die Stricherfassung montiert ist. Das verschiebbare Prisma des Laserinterferometers ist mit dem Lattenhalter fest verbunden und befindet sich in der Achse der Teilung der Nivellierlatte, so dass das Abbesche Komparatorprinzip eingehalten wird. Das Referenzprisma ist unterhalb der Konsole montiert, so dass mechanische bzw. durch Temperaturänderungen hervorgerufene Instabilitäten der Konsole und damit des Mikroskops weitestgehend kompensiert werden (selbstkompensierende Messanordnung). Im Schacht befinden sich Sensoren zur Bestimmung der meteorologischen Parameter wie Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte. Um eine Temperaturschichtung im Schacht zu erfassen, sind mehrere Temperatursensoren vorhanden. Eine ausführliche Beschreibung des Komparators befindet sich in MAURER und SCHNÄDELBACH (1993). Es wird das an der TU Karlsruhe von SCHLEMMER (1975) entwickelte photoelektrische Mikroskop (Schlemmer-Mikroskop) für die Stricherfassung eingesetzt. Die Präzisionsnivellierlatte wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4,2 mm/s unter dem fest aufgebauten Mikroskop

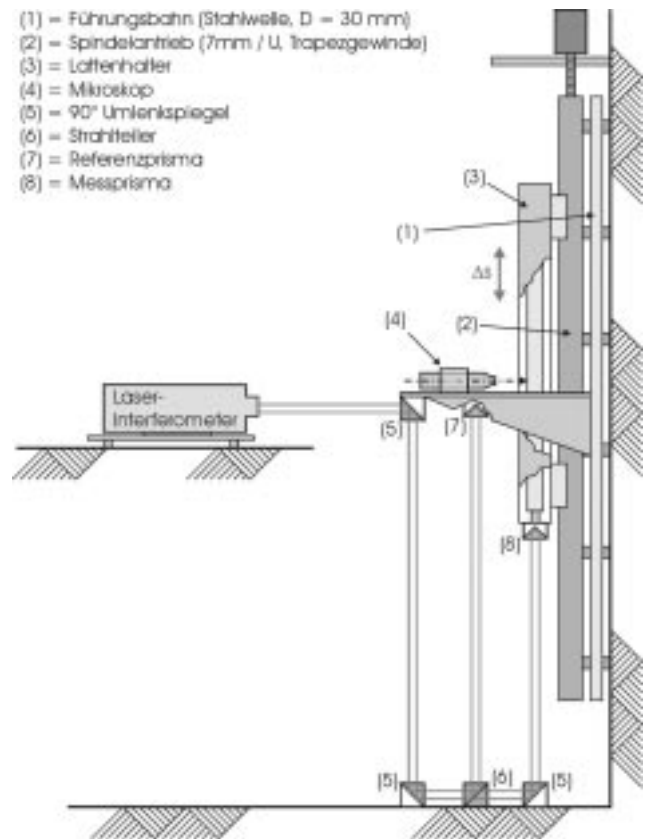


Abb. 4: Schematischer Aufbau des Vertikalkomparators der TU München

verfahren. Die Bilder der Teilungsstriche wandern kontinuierlich über eine in der Brennebene angeordnete Duo-Diode. Eine definierte Position eines Striches wird erhalten, wenn die an den Duo-Dioden anliegenden Spannungen gleich sind. In diesem Fall generiert eine nachgeschaltete Elektronik einen Triggerpuls, über den der aktuelle Verschiebewert der Nivellierlatte am Laserinterferometer ausgelesen wird. Mit diesem Mikroskop können nur Präzisionsnivellierlatten mit einer konstanten Strichbreite zwischen 0,5 mm und 2,5 mm kalibriert werden (MAURER und SCHNÄDELBACH 1993), so dass neben den Strichteilungen analoger Latten auch bei Codelatten die Teilstriche mit einer Standardbreite (Leica = 2,025 mm, Zeiss = 1,0 mm, Topcon = 2,0 mm) erfasst werden können. Bei der Kalibrierung einer 3 m langen Codelatte der Firma Leica werden somit 160 von 350 vorhandenen Codeelementen (46%), bei einer vergleichbaren Zeiss-Latte werden 86 von 186 Codeelementen (47%) und bei einer Topcon-Latte werden 300 von 500 Codeelementen (60%) erfasst (FOPPE 2004). Die Kalibrierung einer Präzisionsnivellierlatte im Hin- und Rückgang kann in etwa 26 Minuten durchgeführt werden.

Durch die Entwicklung der neuen CCD-Technologie und der Digitalnivelliere mit Codelatten sowie die sich einstellenden Alterungseffekte des Diodenmikroskops wurde in den Jahren 2001/2002 der Umbau des Komparators begonnen und im Jahre 2004 abgeschlossen. In dieser Zeit wurde in der Brennebene eines Mikroskops mit telezentrischem Messobjektiv ein hoch auflösender CCD-Sensor (1 MPixel) eingebaut (FRIEDE 2000), mit dessen Hilfe sich Strichkanten analysieren lassen. Wird beim Ver-

fahren der Präzisionsnivellierlatte auf dem CCD-Sensor eine Strichkante erkannt, sendet die Steuersoftware einen Impuls an das Laserinterferometer zur Ausgabe des Messwertes. Dieser Messwert wird zusammen mit dem relevanten Bildausschnitt abgespeichert. In einem nachgeschalteten Auswerteschritt werden dann die beachtlichen Datenmengen aufbereitet und einem Bildverarbeitungsprozess unterworfen. Hier wird jeder Strichkante ein Positionswert zugeordnet. Bei einer Pixelgröße von $12\ \mu\text{m}$ sind Subpixelmessungen mit einer Standardabweichung von $1,2\ \mu\text{m}$ möglich. Mit dieser Methode können jetzt nicht nur die Teilstriche analoger Nivellierlatten, sondern auch die Teilungen von Codelatten vollständig erfasst werden. Die Kantendetektion erfolgt mit einem DERICHE-Kantenfilter. Detektierte Kanten werden mittels Regressionsfunktionen dargestellt. Die Kamera wird vor den Messungen mit einem Réseau-Gitter (Linienbreite $2\ \mu\text{m}$) geometrisch kalibriert. Eine radiometrische Kalibrierung erfolgte bereits durch den Hersteller. Es wurde ferner der analog angesteuerte Antrieb mit einem 2-Phasen-Motor durch einen frei programmierbaren Digitalantrieb mit einem 3-Phasen-Servomotor ersetzt. Auf einem *Horizontalkomparator*, der ebenfalls an der TU München entwickelt wurde (MAURER und SCHNÄDELBACH 1983), wird der lineare Ausdehnungskoeffizient des Invarbandes bestimmt. Die Stricherfassung erfolgte bis zur Mitte des Jahres 2004 noch mit dem Schlemmer-Mikroskop. Nach einem Umbau kommt eine neuere CCD-Kamera mit einer Pixelgröße von $7,4\ \mu\text{m} \times 7,4\ \mu\text{m}$ zum Einsatz (FOPPE 2004). Der Komparator befindet sich in einer abgeschlossenen Klimakammer, in der die Temperatur in einem Bereich von $-10\ ^\circ\text{C}$ bis $50\ ^\circ\text{C}$ regelbar ist. Nach einer Akklimatisierungszeit von mindestens 3 Stunden werden die in den Besselpunkten auf Rolle und Schneide gelagerten Präzisionsnivellierlatten bei 5 verschiedenen Temperaturen jeweils im Hin- und Rückgang ausgemessen. Die Latten werden bei folgenden Temperaturen kalibriert: $30\ ^\circ\text{C} \rightarrow 0\ ^\circ\text{C} \rightarrow 20\ ^\circ\text{C} \rightarrow 40\ ^\circ\text{C} \rightarrow 10\ ^\circ\text{C}$ (MAURER 1999). Die großen Temperatursprünge zwischen den Messungen gewährleisten, dass auch Fehlfunktionen des Spannmehanismus für das Invarband oder eine zu große Reibung zwischen Invarband und Lattenkörper aufgedeckt werden können (MAURER 2000).

Mit den Komparatoren der TU München können die Teilungen von Präzisionsnivellierlatten mit einer Standardabweichung von $< 2\ \mu\text{m}$ erfasst, das mittlere Lattenmeter mit einer Standardabweichung von $1-2\ \text{ppm}$ und der thermische Ausdehnungskoeffizient des Invarbandes mit einer Standardabweichung von $0,05-0,1\ \text{ppm}$ bestimmt werden.

Im Labor der TU München können der Nullpunktfehler, die Zugspannung des Invarbandes und der Lattenfuß auf Ebenheit und Rechtwinkligkeit zur Lattenachse untersucht werden. Systemkalibrierungen sind an der TU München prinzipiell möglich; bei vorhandener Hardware müsste noch die Software angepasst werden. Angedacht sind Systemkalibrierungen für einen Entfernungsbereich von ca. 5 m. Diese Arbeiten werden aber zur Zeit nicht forciert betrieben (FOPPE 2004). Das für die Kalibrierung benutzte Laserinterferometer wird einmal jährlich beim Hersteller kalibriert, um den Ansprüchen des Qualitäts-

managements bezüglich der Rückführbarkeit des Längennormals zu genügen.

2.4 Die Kalibriereinrichtungen des Geodätischen Labors der UniBw München

Das Geodätische Labor der Universität der Bundeswehr (UniBw München) führt Strichkalibrierungen von Präzisionsnivellierlatten mit Strich- und Codeteilungen auf einem 30 m langen *Longitudinalkomparator* (Abb. 5) in horizontaler Lage durch (HEISTER 1994). Die Position der auf zwei Messschlitten verfahrbar gelagerten Nivellierlatte wird mit einem Laserinterferometer bestimmt, wobei die interferometrische Messachse um 10 cm aus der idealen Abbeschen Messanordnung abweicht. Die unten angegebene Standardabweichung berücksichtigt diesen Umstand. Die Messschlitten werden auf Luftlager über fein polierte Granitflächen geführt. Dabei wird eine Führungsgenauigkeit von $\pm 20\ \mu\text{m}$ erreicht. Wurde die Nivellierlatte früher in den Besselpunkten bzw. in den Punkten minimaler Längenverkürzung (HEISTER 1988) gelagert, so hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Nivellierlatte mehr oder weniger ganzflächig auf einem massiven Träger, der die beiden Messschlitten miteinander koppelt, aufzulegen. Dadurch konnten die ansonsten unvermeidbaren Durchbiegungen bei den früheren Lagerungsarten minimiert werden. Die Lagerung wird vor Beginn der Kalibrierung durch ein mit einem Triangulationssensor gemessenes Längsprofil kontrolliert. Dieses ist Bestandteil der Kalibrierung, um zusätzlich den Lattenzustand zu dokumentieren. Die Ansteuerung erfolgt über einen zentralen Controller und Schrittmotor. Die Temperatur (ca. $22\ ^\circ\text{C}$) und die Luftfeuchtigkeit (ca. 45 %) werden im Labor über einen Zeitraum von 2–3 Stunden auf $0,2\ ^\circ\text{C}$ bzw. auf 5 % konstant gehalten. Die Stricherfassung erfolgt mit dem photoelektrischen Mikroskop Leitz MPV-Compact, das fest auf dem Komparator montiert ist. Es zeichnet sich durch variable Messmöglichkeiten zur automatisierten Stricherfassung aus, wie 5- bis 20fache Vergrößerung, variable Spaltblende, Auflicht- und Dunkelfeldbeleuchtung, unterschiedliche Verfahren der Kantendetektion. Durch die variable Spaltblende können auch Teilungen mit unterschiedlichen Strichbreiten gemessen werden.



Abb. 5: *Horizontalkomparator: Mikroskop und Nivellierlatte*



Abb. 6: Umlenkspiegel

Die Standardabweichung der Kantendetektion beträgt $0,7 \mu\text{m} + 0,4 L_{[m]} \mu\text{m}$. Eine Strichkalibrierung im Hin- und Rückgang dauert für eine 3 m-Latte 20 Minuten. Ein Kalibriervorgang umfasst mindestens zwei Hin- und Rückmessungen, wobei die Latte nach einer Hin- und Rückmessung ausgebaut wird, um sie für einige Zeit praxisgerecht aufrecht aufzustellen. Danach wird sie für die zweite Messreihe wieder im Komparator eingelegt. Das mittlere Lattenmeter kann mit einer Standardabweichung von 0,2 ppm bestimmt werden.

Mit dem Komparator der Universität der Bundeswehr können auch *Systemkalibrierungen* digitaler Nivelliersysteme (HEISTER u.a. 2005) durchgeführt werden. Die Nivellierlatte wird hierbei wie bei der Strichkalibrierung horizontal gelagert. Unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen wird zusätzlich ein Planspiegel aus Zerodur (50 cm lang, 10 cm breit und 5 cm hoch) mit einer Ebenheitsqualität von $\lambda/8$ an einer Messbrücke am Komparator befestigt (Abb. 6). Das Digitalnivellier wird auf einer höhenverstellbaren Endkonsole über der interferometrischen Messachse befestigt, so dass bei horizontaler Visur über den Zerodurspiegel für den gesamten Bereich der Präzisionsnivellierlatte ein Vergleich von interferometrisch gemessenen Fahrwegdifferenzen (horizontale Lattenverschiebung) und digital gemessenen Lattenabschnitten (mit dem Digitalnivellier) herbeigeführt werden kann (HEISTER 2002). Eine Systemkalibrierung dauert im Hin- und Rückgang für eine 3 m-Latte mit 2 Nivelliermessungen pro Position ca. 50 Minuten. Die Messintervalle werden nach WOSCHITZ (2003) bestimmt und betragen je nach Messanordnung und Lattentyp 2–3 cm.

Im Gegensatz zur Strichkalibrierung ist bei einer Systemkalibrierung wegen längerer Messzeiten von einigen Stunden eine wesentlich höhere Stabilität der Prüfeinrichtungen unabdingbar. Systematische Messabweichungen durch Instabilitäten der Messeinrichtung und durch temperaturbedingte Änderungen des Brechungsindex im Bereich des Visurstrahls des Digitalnivelliers können durch Einbeziehung einer Referenzlatte erreicht werden (HEISTER 2002). Die Referenzlatte, die entfernungs-gleich neben dem Komparator aufgebaut ist, wird quasi zeitgleich zu den Ablesungen am Prüfling erfasst. Die Auto-



Abb. 7: Drehtisch für das Digitalnivellier mit der Referenzlatte

omatisierung dieser Messprozedur, bei der das Digitalnivellier zwischen den Ablesungen leicht zu verdrehen ist, wird über einen ansteuerbaren Drehtisch, auf dem das Digitalnivellier aufgebaut ist, erreicht (Abb. 7). Der Gewinn an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung rechtfertigt voll die Verlängerung der Messzeit (HEISTER 2002). Unter Einbeziehung der Referenzlatte verlängert sich bei vergleichbaren Bedingungen die Kalibrierdauer auf ca. 105 Minuten. Das mittlere Lattenmeter kann bei dem Verfahren der Systemkalibrierung mit einer Standardabweichung von 1–2 ppm bestimmt werden. Das Längsprofil – also die Ebenheitsabweichungen – des Invarbandes werden, wie oben bereits erwähnt, während der Kalibriermessung mit einem Abstandssensor, der am Messmikroskop befestigt ist, berührungslos gemessen. Mit einer speziellen Zieleinrichtung (Endmaß), die am Lattenfuß magnetisch adaptiert wird, kann der absolute Nullpunkt der Nivellierlatte im Vergleich zur Aufsatzfläche bestimmt werden.

2.5 Komparator der ETH Zürich

Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich verfügt über einen *Horizontalkomparator* (Abb. 8) für die automatische Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatte mit Strich- und Codeteilungen (SCHMID und INGENSAND 1995). Die Nivellierlatte können in den Punkten minimaler Durchbiegung (Besselpunkte) oder in den Punkten minimaler Verkürzung (HEISTER 1988, Seite 36ff) gelagert werden. Die beiden starr miteinander gekoppelten Schlitten, auf denen die Präzisionsnivellierlatte gelagert ist, werden mit einem Gleichstrommotor mit Encoder (500 Striche) über ein Motor-Zahnriemen-Reibrad angetrieben. Der Motor ist mit einer Regelelektronik verbunden, die mit ASCII-Befehlen über die serielle Schnittstelle angesteuert werden kann. Die Schlitten können entweder um eine bestimmte Anzahl von Schritten weiterbewegt oder aber mit einer Geschwindigkeit von 3 m/min kontinuierlich verfahren werden. Jeder Strich wird in einem Regelkreis angefahren, damit sich die Strichkante im verzeichnungsarmen Bereich der Optik befindet. An dieser Position wird die Lattenverschiebung für den Zeit-

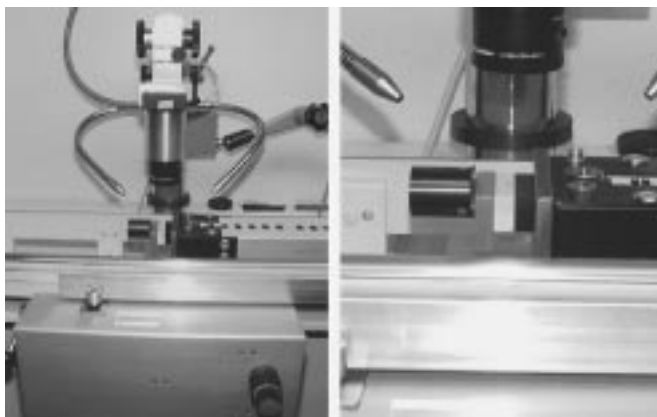


Abb. 8: Horizontalkomparator der ETH Zürich

punkt der Bildaufnahme kurz gestoppt. Die Position der Schlitten wird mit einem Laserinterferometer unter Beachtung des Abbeschen Komparatorprinzips bestimmt. Für die Stricherfassung wird eine CCD-Zeilenkamera eingesetzt. Die Kamera bildet über das Objektiv WA-Componon ($f = 40 \text{ mm}$) der Firma Schneider/Kreuznach die Lattenteilung im Abbildungsverhältnis 1:1 auf einen Zeilensensor mit 3684 Pixel ab; die Pixelgröße beträgt $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ (SCHMID und INGENSAND 1995). Eine nachgeschaltete Auswerteelektronik erkennt, wann sich ein Teilstrich der verfahrenen Latte auf dem CCD-Sensor abbildet. Zu diesem Zeitpunkt wird der Verschiebevorgang der Präzisionsnivellierlatte gestoppt, um die Intensitätswerte des CCD-Sensors auszulesen und sie der interferometrisch bestimmten Lattenposition zuzuordnen. Bei breiten Teilstrichen von Codelatten, die nicht vollständig auf dem Zeilensensor abgebildet werden können, werden die beiden Kanten jeweils getrennt angefahren. Die Daten werden gespeichert, um sie nach Abschluss der Kalibrierung einer weiteren Auswertung zuzuführen.

Um die Nivellierlatte innerhalb des gesamten Verschiebereichs parallel zur Achse der Messbahn auszurichten, kann die Kamera um 90° gedreht werden. Bei einer Pixelgröße der CCD-Zeile von $8 \mu\text{m}$ und beim Abbildungsverhältnis von 1:1 kann eine 3 m-Latte seitlich auf etwa $0,5 \text{ mgon}$ genau ausgerichtet werden. Ist die Kamera wieder zurückgedreht, so ist sie jetzt hinsichtlich der Scharfeinstellung und der senkrechten Ausrichtung der CCD-Zeile zu den Kanten der Lattenteilung justiert.

Da die inneren und äußeren Orientierungsparameter der CCD-Zeilenkamera nicht direkt bekannt sind, sind sie über eine geometrische Kalibrierung zu bestimmen (SCHMID und INGENSAND 1995, Seite 21ff). Dazu wird eine Kante der Lattenteilung in kleinen Schritten unter der Kamera durchgefahren. Die Abstände zwischen den Kantenpositionen können mit dem Interferometer sehr genau gemessen werden. Zusammen mit den detektierten Kantenpositionen des CCD-Sensors können jetzt die Parameter zur Transformation vom Bildraum in den Objektraum berechnet werden. Einflüsse aufgrund der Verzerrung des Objektivs sind in dieser Transformation mit enthalten. Die geometrische Kalibrierung ist vor jeder Lattenkalibrierung vorzunehmen.

Es hat sich als notwendig erwiesen, die CCD-Zeilenkamera auch radiometrisch zu kalibrieren, da bei der verwen-

deten Kamera größere radiometrische Defekte des Sensors aufgetreten sind (SCHMID und INGENSAND 1995, Seite 23). Ohne eine solche Kalibrierung werden die erhaltenen Kantenpositionen merklich verfälscht. Bei einer radiometrischen Kalibrierung werden zwei Aufnahmen vorgenommen und zwar eine bei totaler Dunkelheit (Kamera ist verschlossen) und eine andere bei uniformer Helligkeit. Aus diesen beiden Aufnahmen werden sodann Parameter berechnet, um die Intensitätswerte eines jeden Pixels korrigieren zu können. Diese Kalibrierung ist nicht unbedingt vor jeder Lattenkalibrierung vorzunehmen.

In der nachfolgenden Auswerteprozedur werden die Kanten mit dem Canny-Kantenoperator berechnet. Der Abstand eines jeden Teilstrichs bzw. seiner Kanten von einem Bezugspunkt setzt sich zusammen aus der interferometrisch gemessenen Lattenposition und aus der über den Zeilensensor bestimmten Position.

Bei diesem Komparator werden die Teilstriche nur in einer Breite von $8 \mu\text{m}$ erfasst. Dies hat zur Folge, dass sich z.B. Staubpartikel oder Gebrauchsspuren wie kleinste Kratzer bei der Kalibrierung störend bemerkbar machen und die Ergebnisse der Kantendetektion mitunter stark beeinträchtigen können.

Ebenheitsabweichungen des Invarbandes bedingen systematische Messabweichungen in der Kantendetektion. Bei einer angenommenen Ebenheitsabweichung von $0,4 \text{ mm}$, die sich aus praktischen Messungen an der ETH Zürich ergeben hat, und einem angenommenen maximal tolerierbaren Fehler von $2 \mu\text{m}$ in der Kantendetektion, darf die zu detektierende Kante nur maximal $0,4 \text{ mm}$ bzw. 50 Pixel von der Kameraachse entfernt sein (SCHMID und INGENSAND 1995, Seite 45). Das bedeutet, dass man wegen der beschränkten Tiefenschärfe der Kamera nur in diesem relativ engen Bereich eine Kantendetektion vornehmen kann.

Mit dem Komparator der ETH Zürich können die Teilungen von Präzisionsnivellierlatten mit einer Standardabweichung von $2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ kalibriert werden, während das mittlere Lattenmeter mit einer Standardabweichung von $0,2 \text{ ppm}$ bis $0,6 \text{ ppm}$ bestimmbar ist. Die Kalibrierung einer 3 m langen Nivellierlatte dauert ca. eine Stunde. Das Längsprofil des Invarbandes wird mit einer Messuhr abgetastet, aber nicht registriert. Werden Abweichungen von größer als $\pm 0,3 \text{ mm}$ gemessen, wird die Latte eingehender untersucht.

Zusammenfassung

Der Aufbau von Komparatoren zur Strichkalibrierung von Präzisionsnivellierlatten bzw. zur Systemkalibrierung von Nivelliersystemen ist ein äußerst komplexer Vorgang. Um Standardabweichungen im Bereich weniger Mikrometer bei der Stricherfassung zu erreichen, sind Erfahrungen und Kenntnisse über das Verhalten der unterschiedlichen Materialien sowie über den gesamten Messprozess erforderlich. Der „Teufel steckt im wahrsten Sinne des Wortes oftmals im Detail“. Erst die seit einigen Jahren systematisch durchgeführten Ringversuche zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten (SCHAUERTE und HEISTER 2005) haben bei den Komparatoren Effekte aufgedeckt, die ansonsten unentdeckt geblieben wären. Durch

ständiges Weiterentwickeln haben die hier betrachteten Komparatoren ein hohes Leistungsniveau in der Richtigkeit und Zuverlässigkeit der von ihnen erzielten Kalibrierergebnisse erreicht, obwohl die ihnen zugrunde liegenden Konstruktionsprinzipien vielfach sehr unterschiedlich sind.

Danksagungen

Besonderer Dank gilt den Mitgliedern des Runden Tisches „Kalibrierung geodätischer Messmittel“ (SCHLEMMER 2005) für die Anregungen sowie wertvollen Hinweise zu diesem Artikel und insbesondere den Leitern der Prüflabore der vorgestellten Komparatoren (*Uni Bonn*: Prof. Kuhlmann, Dr. Schauerte und Prof. Witte, *TU Graz*: Prof. Brunner und Dr. Woschitz, *TU München*: Dr. Foppe und Prof. Wunderlich, *UniBw München*: Prof. Heister, *ETH Zürich*: Prof. Ingensand) für die Bereitstellung von Abbildungen, weiterer Informationen und für die Durchsicht des Manuskriptes.

Literatur

- [1] ABBE, E. (1890) Messapparate für Physiker. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 10 (1890), Seite 446–447
- [2] BRUNNER, F. K.; WOSCHITZ, H. (2001) Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In: HEISTER, H.; STAIGER, R. (Redaktion): Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Schriftenreihe des Deutschen Verein für Vermessungswesen Heft 42/2001, Seite 70–90, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2001
- [3] DIN 13005 (1999) Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (ENV 13005: 1999), Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 1999
- [4] DIN 18717 (1996) Präzisions-Nivellierlatten. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 1996
- [5] FASSBENDER, H.; SCHAUERTE, W. (2001) Ein geeignetes Messverfahren für die Kalibrierung von beliebig codierten Strichteilungen. In: Flächenmanagement und Bodenordnung 63 (2001) 3, Seite 129–140
- [6] FISCHER, T.; FISCHER, W. (1999) Manufacturing of High Precision Levelling Rods. In: LILJE, M. (Ed.): The importance of heights. FIG, Gävle, Sweden, page 223–228
- [7] FOPPE, K. (2005) Angaben zu den Komparatoren der TU München. Persönliche Mitteilungen vom 11.04.2004 (unveröffentlicht)
- [8] FOPPE, K. u.a. (2005) Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfungen an der TUM. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [9] FRIEDE, O. (2000) Ein hybrides Meßsystem zur Kalibrierung von Strichteilungen. DGK Reihe C, Nr. 521, München 2000
- [10] HEISTER, H. (1988) Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 27, Neubiberg 1988
- [11] HEISTER, H. (1994) Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. In: BRUNNER; PEIPE (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 46, Seite 95–101
- [12] HEISTER, H. (2001) Zur Angabe der Meßunsicherheit in der geodätischen Meßtechnik. In: Schriftenreihe des DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement Heft 42, Seite 108–119, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart 2001
- [13] HEISTER, H. (2002) Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 109 (2002) 11/12, Seite 380–385
- [14] HEISTER, H. (2004) Gedanken zur Genauigkeit bei der Nivellierlatten-Kalibrierung. Persönliche Mitteilungen vom 20.07.2004 (unveröffentlicht)
- [15] HEISTER, H. u.a. (2005) Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung? In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [16] HENNES, M.; INGENSAND, H. (2000) Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In: SCHNÄDELBACH, SCHILCHER (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000 – XIII. International Course on Engineering Surveying in München, Seite 166–177, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2000
- [17] INGENSAND, H. (2005) Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [18] MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. (1980) Kalibrierung geodätischer Präzisionsmeßinstrumente mit dem Laser-Interferometer HP 5526A. In: CONZETT, MATTHIAS, SCHMID (Hrsg.): Ingenieurvermessung 80 – Beiträge zum VIII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung vom 24.09. bis zum 01.10.1980 in Zürich, Beitrag A12, Dümmler Verlag Bonn 1980
- [19] MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. (1983) First Experiences with a vertical Comparator for the Calibration of Invar Rods. In: PELZER, NIEMEIER (Editors): 38 Contributions to the Workshop on Precise Levelling, held in Hannover, March 16–18, 1983, page 155–163, Dümmler Verlag, Bonn 1983
- [20] MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. (1993) Bestimmung der Systemgenauigkeit der digitalen Nivelliere NA 2000/NA 3000. In: Mitteilungen des Geodätischen Instituts der Technischen Universität Graz (Festschrift zum 70. Geburtstag von Günther Schelling), Folge 78, Seite 139–147, Graz 1993
- [21] MAURER, W. (1999) Kalibrierung von Nivellierlatten: In: HEGER (Hrsg.): Tagungsband zum Meßtechnik-Seminar an der Fachhochschule Neubrandenburg „Überprüfung und Kalibrierung von Meßgeräten mit Anwendung“ am 26. März 1999, Neubrandenburg 1999
- [22] MAURER, W. (2000) Kalibrierung von Nivellierlatten. Vortragsfolien Ingenieurvermessung 2000, München 2000
- [23] RÜEGER, J. M.; BRUNNER, F. K. (1999) On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV) 125(1999), Seite 120–130
- [24] SCHAUERTE, W.; HEISTER, H. (2005) Der Ringversuch 2003/2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [25] SCHLEMMER, H. (1975) Laser-Interferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 210, München 1975
- [26] SCHLEMMER, H. (2005) 30 Jahre Laser-Interferenzkomparatoren für Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6

- [27] SCHMID, CHR.; INGENSAND, H. (1995) Automatisierte Nivellierlattenkalibrierung für Strich- und Codeteilungen. Schriftenreihe „Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie“, Bericht 244, Zürich 1995
- [28] SCHNÄDELBACH, K.; MAURER, W. (1995) Laserinterferometry – Ten Years of Experience in Calibrating Invar Levelling Staffs. In: 1st International Symposium on Application of Laser Technique in Geodesy and Mine Surveying. Ljubljana, 14./15. September 1995
- [29] STAIGER, R.; WITTE, B. (2005) Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionsnivellierlatten für die Praxis. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [30] WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K. (2003) Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 81 (2003), Seite 68–76
- [31] WOSCHITZ, H. (2003) System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Erschienen in der Reihe Ingenieurgeodäsie – TU Graz (Hrsg. BRUNNER, F.), Dissertation, Shaker Verlag, Aachen 2003
- [32] WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K.; HEISTER, H. (2003) Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 128 (2003) 1, Seite 11–17
- [33] WOSCHITZ, H. (2004) Persönliche Mitteilungen vom 01.07.2004 (unveröffentlicht)
- [34] WOSCHITZ, H. (2005) Systemkalibrierung: Effekte von Digitalen Nivelliersystemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) (2005), Heft 6
- [35] WUNDERLICH, TH. (2003) Kalibrierung von Nivellierlatten – Ringversuch 2003. Präsentation zur 11. Sitzung des Runden Tisches „Kalibrierung Geodätischer Messmittel“ am 16.10.2003 an der Bauhaus-Universität Weimar (unveröffentlicht)

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. WILLFRIED SCHWARZ,
Professur Geodäsie und Photogrammetrie,
Bauhaus-Universität Weimar,
Marienstraße 9, D-99423 Weimar,
willfried.schwarz@bauing.uni-weimar.de

Kurzfassung

Für die Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten werden automatisch arbeitende Komparatoren eingesetzt. In diesem Beitrag werden die Komparatoren der am Runden Tisch „Kalibrierung Geodätischer Messmittel“ beteiligten Prüflabore vorgestellt und es werden markante systembedingte Unterschiede herausgearbeitet.

Abstract

For the calibration of precision levelling staffs self-acting comparators will be used. In this paper the comparators of the laboratories of the working group “Calibration of geodetical measurement devices” will be described and characteristic differences in the constructions will be pointed out.

Resume

Pour l'étalonnage des mires de précision, l'utilisation de comparateur automatique s'est établie. Dans cet ouvrage, les comparateurs des laboratoires participant au groupe de travail „étalonnage du matériel géodésique“ ainsi que les différences des systèmes sont présentés.