



Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionsnivellierlatten für die Praxis

R. Staiger und
B. Witte

In diesem Beitrag werden die Konsequenzen der aktuell vorliegenden Forschungsergebnisse auf die Messpraxis des Präzisionsnivelements diskutiert. Zur Vermeidung systematischer Höhenabweichungen, hervorgerufen durch die Messausrüstung, werden konkrete Vorschläge unterbreitet.

1 Einleitung

Das Präzisionsnivelement ist eines der genauesten Messverfahren der Geodäsie. Den Nivellierlatten fällt dabei die wichtige Rolle der Maßverkörperung zu. Nur mit einer genauen Kenntnis über den aktuellen Zustand der gesamten Messausrüstung, insbesondere der verwendeten Strich- oder Codeteilung ist eine präzise Höhenübertragung möglich.

Diese Erkenntnis ist nicht neu: Anfangs wurden die Strichteilungen analoger Nivellierlatten mit Normalmetern verglichen. Mit dieser Methode können jedoch nur die Abstände von Strichpaaren in einer festen Entfernung (i.d.R. 1 m) verglichen werden. SCHLEMMER (1975) gelang – mit der bahnbrechenden Entwicklung eines Laserinterferenzkomparators – erstmals der automatisierte Vergleich zwischen beliebigen Strichabständen einer Nivellierteilung. Er wies auch bei verschiedenen Lattentypen periodische Abweichungen (sog. Sägezahnmuster) nach, die durch die traditionelle Prüfmethode unentdeckt bleiben.

Wenige Jahre später verbesserte die Fa. NEDO, in Zusammenarbeit mit SCHLEMMER, die Fertigung von Präzisionsteilungen, indem das Prüfverfahren auf das Herstellungsverfahren übertragen wurde (FISCHER und FISCHER 1999). NEDO ist heute weltweit der einzige Hersteller von Präzisionsnivellierlatten. Mit der Einführung der Digitalnivelliere wurden die Herstell- und Prüfverfahren auf die Codeteilungen erweitert. Der Produktionsprozess für deren Herstellung wurde inzwischen soweit verbessert, dass bei neuen Latten bezüglich der Teilungsgenauigkeit keine Wünsche mehr bestehen.

In den letzten 15 Jahren wurden an verschiedenen Hochschulen und Staatsinstituten Komparatoren zur Kalibrierung von Nivellierlatten gebaut (SCHWARZ 2005). Der aktuelle Ringversuch (SCHAUERTE und HEISTER, 2005) zeigt, dass heute die Abweichungen einzelner Striche bzw. Codeelemente von ihrer Sollposition mit einer Standardabweichung von wenigen μm bestimmt werden. Die Unsicherheit des daraus abgeleiteten mittleren Lattenmeters

beträgt ca. 1–2 ppm. Beide Genauigkeitsmaße sind für präzise Höhenübertragungen völlig ausreichend.

Ungefähr zur selben Zeit entstand an der TU Graz eine Anlage zur Prüfung des gesamten Messsystems (HEISTER u. a. 2005), auf welcher nicht nur systembedingte Schwächen der Digitalnivelliere aufgedeckt wurden, sondern auch Genauigkeiten für das gesamte Messsystem empirisch ermittelt werden können. Dort wird auch gezeigt, dass die direkte Zuordnung eines metrischen Wertes zur Messgröße „Höhe“ nicht möglich ist. Messwerte aus der Kombination von Digitalnivellier und zugehöriger Codelatte einschließlich der dem Anwender nicht bekannten Auswertelgorithmen führen erst zum korrekten Höhenwert. WOSCHITZ (2003) modelliert mit seinem „Nivellier-Simulator“ den Mess- und Auswerteprozess aller Präzisionsnivelliere detailliert nach. Dadurch gelang es – im Rahmen einer sog. Typprüfung – nicht nur weitere Schwachstellen aufzudecken, sondern auch meist eine systembedingte Erklärung für die z.T. erheblichen Abweichungen der Höhenwerte, z.B. aufgrund einer verschmutzten Teilung, zu finden (WOSCHITZ 2005). In Kap. 4 werden die Auswirkungen dieser Ergebnisse auf die Messpraxis diskutiert.

2 Prüfung von Präzisionsnivellierlatten

Bei den folgenden Ausführungen wollen wir uns auf die heute üblicherweise benutzten Code-Latten beschränken, weil die konventionellen Latten nur noch höchst selten eingesetzt werden. Darüber hinaus lassen sich die hier dargestellten Konsequenzen auch ohne Schwierigkeiten auf die herkömmlichen Latten übertragen.

2.1 Prüfgrößen

2.1.1 Qualitative Prüfung

Bekanntlich werden durch den Gebrauch von Instrument und Latten gewisse Abnutzungserscheinungen auftreten, die z.B. zu Beschädigungen an den einzelnen Codestrichen der Teilung führen, oder auf der Teilung Schmutz haften bleibt. Sowohl beschädigte Codestriche als auch nicht peinlich gesäuberte Teilungen führen zu systematischen Verfälschungen der Höhenmesswerte. Es sind daher vor jedem Messeinsatz die Latten genau in Augenschein zu nehmen, um derartige Quellen für systematische Fehler auszuschließen. Keinesfalls dürfen die beschädigten Codestriche mit Filzstift ausgebessert werden, weil sich nur über eine Systemkalibrierung exakt nachweisen lässt, ob eine derartige „provisorische Reparatur“ zu richtigen

Höhenwerten führt. Falls ein derartiges Kalibrierverfahren zu aufwändig oder nicht verfügbar ist, sollte das die Teilung tragende Invarband in jedem Fall ausgetauscht werden. Die Service-Händler der Instrumentenhersteller oder die Prüfinstitutionen können derartige Arbeiten ausführen. Nicht nur die Code-Teilung, sondern auch der Lattenrahmen kann Gebrauchsspuren aufweisen, wie beispielsweise Schmutz in Verbindung mit Fett in den Führungsnuten, der zu einer Verklebung des Bandes führen kann. Das Band wird dann nicht die im Herstellerwerk eingestellte Spannung besitzen und zu verfälschten Messergebnissen führen, weil das Lattenmeter nicht stimmt. Auch ein tordierter Lattenrahmen kann das freie bewegliche Band arretieren und zu ähnlichen Auswirkungen führen. Um diesen Fehlereinfluss zu eliminieren reicht eine Reinigung durch eine Service-Station, die anschließend die korrekte Spannung wieder einstellen muss. Ob das Invarband frei beweglich in der Führungsnut liegt, lässt sich einfach prüfen, indem man mit dem Daumen leicht auf die Teilungsoberfläche drückt und dabei versucht, das Invarband seitlich zu verschieben (FRÖHLICH u.a. 2003), was bis zu 1 Millimeter möglich sein sollte.

2.1.2 Quantitative Prüfung

Nach DIN 18 717 hat

- der Lattenfuß mit der Teilungsachse des Invarbandes in jeder Richtung einen rechten Winkel zu bilden ($\pm 5'$)
- die Aufsatzfläche des Lattenfußes eben zu sein ($\pm 0,02$ mm)
- der Nullpunkt der Teilung mit dem Nullpunkt der Nivellierlatte bis auf eine maximale Abweichung von 0,05 mm überein zustimmen.

Diese Vorgaben müssen in regelmäßigen zeitlichen Abständen – z.B. vor jeder Messkampagne – überprüft werden, wobei die Übereinstimmung der Nullpunkte zweckmäßigerweise im Rahmen der Prüfung der Lattenteilung erfolgen sollte. Die in diesem Heft aufgeführten Prüflaboratorien verfügen über eine entsprechende Ausrüstung. Diese Prüfung ist nur dann notwendig, wenn bei den durchzuführenden Präzisionsnivelllements von der Regel abgewichen wird, die Nivellementsstrecke in eine gerade Anzahl von Instrumentenstandpunkten einzuteilen.

Die Justierung der Dosenlibelle muss in regelmäßigen Abständen auch während der Messkampagne überprüft werden, weil eine dejustierte Dosenlibelle eine schief gehaltene Latte bedingt, die wiederum in Abhängigkeit von der Höhe der Visurlinie (Ablesehöhe) und einem möglichen exzentrischen Aufsetzen der Latte auf dem Lattenuntersatz (Lattenteilung und Aufsetzpunkt müssen in einer Geraden liegen) zu systematischen Abweichungen führen.

Der Überprüfung des Lattenmaßstabs hat die Praxis seit jeher große Beachtung geschenkt, weil bekanntlich Maßstabsabweichungen zu systematisch verfälschten Ergebnissen führen, wenn größere Höhenunterschiede vorliegen. Die Ursachen für diese Maßstabsabweichungen lassen sich auf den Teilungsprozess im Herstellerwerk, eine falsche Zugspannung des Invarbandes oder Temperatureffekte zurückführen, wobei die Temperatur ein geringeres Problem darstellt, weil der Ausdehnungskoeffizient von

Invar nach den umfangreichen Bestimmungen an der TU München (FOPPE u.a. 2004) einen Wert von durchschnittlich 0,6 ppm/K aufweist und linear ist. Eine Reduzierung des Lattenmaßstabs auf die Referenztemperatur von üblicherweise 20 °C lässt sich bei abweichender Temperatur mit bekanntem Koeffizienten (entweder in München bestimmt oder auch genau genug vom Hersteller mitgeteilt) leicht vornehmen.

Der Lattenmaßstab sollte einmal pro Jahr oder nach Reparaturen z.B. bei einem der hier genannten Kalibrierlaboratorien (SCHWARZ 2005) ermittelt werden, weil die Konstanz der Zugspannung nicht über einen längeren Zeitraum gewährleistet werden kann. Eine neue Latte sollte mit Kalibrierschein gekauft werden, um mögliche Veränderungen auf einen Zeitpunkt vor dem ersten praktischen Einsatz beziehen zu können. Die Genauigkeit, mit welcher der Lattenmaßstab in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien ermittelt wird, ist sehr hoch, so beträgt die Messunsicherheit für die Lage eines Codeelements 1–2 µm, woraus sich eine Messunsicherheit für den Lattenmaßstab von < 1 ppm ableiten lässt (SCHAUERTE u. HEISTER 2005).

Wie u.a. in INGENSAND (2001) ausgeführt ist, werden bei einem Digitalnivellier mehrere Codeelemente in den Messprozess einbezogen, so dass sich die Genauigkeit einer einzelnen Codeelement-Lage nicht direkt auf die Genauigkeit eines Höhenmesswertes auswirken kann, weshalb eine Bestimmung der Genauigkeit von Code-Teilungen nur noch der Überprüfung der Fertigungstoleranz des jeweiligen Codes dienen kann. Mithin besitzt ein derartiges Genauigkeitsmaß für die messtechnische Praxis keine Bedeutung.

2.2 Prüfstrategien

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Kalibrieransätze: die Komponenten- und die Systemkalibrierung. Beide Verfahren haben ihre Berechtigung bzw. sind in Abhängigkeit der konkreten Fragestellung zu wählen.

Eine Kalibrierung wird entweder zur Genauigkeitssteigerung (Kalibrierergebnisse werden in Form von Korrekturen bei späteren Messungen berücksichtigt) oder zur Qualitätskontrolle (aufgrund der Kalibrierergebnisse wird entschieden, ob die Messausrüstung den Qualitätsanforderungen entspricht) durchgeführt.

Eine Komponentenkalibrierung bietet sich an, wenn die Abweichung einzelner Codeelemente von ihrem Sollwert (um daraus z.B. den Maßstab der Codeteilung abzuleiten) gesucht wird. Theoretisch ist eine Komponentenkalibrierung nur dann gleichwertig mit einer Systemkalibrierung, wenn der funktionale Zusammenhang zwischen den kalibrierten Größen (Positionen der Codeelemente) und der gesuchten Messgröße (Höhenablesung am Digitalnivellier) bekannt ist. Dazu müssten die Hersteller ihre Auswertelgorithmen im Detail veröffentlichen. Für die Kalibrierung der Komponente Nivellierlatte reicht es jedoch, wenn die Hersteller die Solllage der Codeelemente bekannt geben.

Die Systemkalibrierung sollte dann gewählt werden, wenn der ganzheitliche Einfluss aller Größen auf das gesuchte Endergebnis gefragt ist. Damit lassen sich auch

Schwächen und Fehler im Auswertemodell aufdecken, wie WOSCHITZ (2005) mit seinen Untersuchungen von abgenutzten und beschädigten Lattenabschnitten oder Messungen in den Lattenendbereichen zeigt.

3 Empfehlungen zur regelmäßigen Prüfung von Nivellierlatten

Präzisionsnivellierlatten stellen qualitativ hochwertige Produkte dar. Eine Kalibrierung zur Genauigkeitssteigerung ist heute kaum mehr erforderlich bzw. sinnvoll. Trotzdem ist es – im Sinne einer Qualitätskontrolle – notwendig, die gesamte Messausrüstung und insbesondere die Nivellierlatten regelmäßig zu prüfen.

Es wird daher empfohlen, die vom Hersteller gelieferten Latten mit einem Kalibrier-Zertifikat zu bestellen, um deren Zustand zum Zeitpunkt der Auslieferung, auch gegenüber dem Auftraggeber, eindeutig dokumentieren zu können. Dabei ist eine Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten der Invarteilung nur dann notwendig, wenn für die Messungen Temperaturkorrekturen vorgesehen sind.

Bei fabrikneuen Latten ist eine Systemkalibrierung nicht unabdingbar, weil durch Typkalibrierungen für die Herstellersysteme der Firmen Leica, Topcon und Trimble (WOSCHITZ 2003, WOSCHITZ 2005 und HEISTER u. a. 2005) Kalibrierergebnisse bezogen auf unterschiedliche Zielweiten (zyklische Abweichungen) und für die Lattenendbereiche vorliegen. Die sich hieraus ergebenden Konsequenzen für die praktische Ausführung von Nivellements sind im folgenden Kapitel angegeben.

Im Gebrauch befindliche Nivellierlatten sind regelmäßig zu prüfen (vgl. 2.1 und 2.2). Mindestens einmal pro Jahr sollte das Nivellierinstrument geprüft und der Maßstab der Lattenteilung interferometrisch bestimmt werden. Alternativ kann eine Systemprüfung in Form einer Individualprüfung (im Gegensatz zur Typprüfung) durchgeführt werden.

Andere Größen (Justierung der Dosenlibelle, Schiefe der Aufsatzfläche, usw.) sollten vom Anwender selbst in kürzeren Intervallen überprüft werden.

4 Empfehlungen zum Gebrauch von Präzisionsnivellierlatten

Präzisionsnivellierlatten sind empfindliche Messwerkzeuge, die sorgfältig behandelt sein wollen. Offensichtlich ist dies keine Selbstverständlichkeit; ansonsten würden die Prüfinstitutionen nicht übereinstimmend von Nivellierlatten berichten, die mit verzogenen Lattenkörpern oder verschmutzten und verkratzten Teilungen (z.T. mit Filzstift „nachgebesserten“ Codeelementen) zur Kalibrierung vorgelegt werden.

Grundsätzlich sind die Nivellierlatten in den dafür vorgesehenen Behältern zu lagern und zu transportieren. Die Latten sind sorgsam auf die Höhenpunkte aufzusetzen. Wichtig ist auch eine regelmäßige und sorgfältige Reinigung der Lattenteilung (vgl. Kap. 2).

Die Ergebnisse der Typprüfungen sind wertvoll und wichtig. Sie führen zu konkreten Empfehlungen für die tägliche Messpraxis:

- Wahl der Zielweite. Bei bestimmten Zielweiten zeigen alle Systeme signifikante Abweichungen aufgrund ungünstiger Geometrieverhältnisse (Pixelgröße zu Codeelement). Für Präzisionsmessungen sind deshalb diese Bereiche (± 50 cm) zu meiden. Für Leica-Digitalnivelliere betragen die kritischen Entfernungen: 7,50 m, 15,00 m, 22,50 m, 30,00 m usw. Bei Topcon-Instrumenten ist der Übergangsbereich zwischen Nah- und Fernbereich (zw. 8 und 10 m) zu meiden. Trimble-Instrumente (DiNi) verzeichnen viele ungünstige Bereiche; allerdings liegen die Abweichungen dort nur in der Größenordnung von $\pm 0,05$ mm.
- Die Lattenteilung ist vor Schmutz und Kratzer zu schützen bzw. regelmäßig zu kontrollieren. Der Einfluss von Schmutz (oder Kratzer) auf der Latte kann zu so starken Abweichungen in einzelnen Höhenablesungen führen, dass die Latte nicht mehr für Präzisionsmessungen genutzt werden kann.
- Die Teilung ist stets mittig anzuzielen.
- Optische Hindernisse sind ebenfalls zu vermeiden. Im ungünstigsten Fall entstehen – analog zur verschmutzten Latte – signifikante Abweichungen bei der Höhenmessung.
- Die Lattenendbereiche sollten für Präzisionsmessungen grundsätzlich vermieden werden, da durch den asymmetrischen Codeabschnitt signifikante Abweichungen auftreten können (WOSCHITZ 2003, S. 149 ff).
- Beleuchtung: Bei Nachtmessungen oder untertage wird eine künstliche Beleuchtung notwendig. INGENSAND (2001) fand systematische Höhenabweichungen durch eine einseitige, schräge Anstrahlung der Latte mit einer Halogenlampe. BRUNNER u. WOSCHITZ (2004) schlagen eine selbstleuchtende Nivellierlatte vor.
- Die Systemsoftware sollte grundsätzlich auf dem neuesten Stand sein. Z.B. ist ab der Version V. 3.40 (Trimble) zusätzlich die Kontrolle der maximalen Zielhöhe und der Symmetrie des benutzten Lattenabschnitts möglich (TRIMBLE- Produktinformation). Trimble empfiehlt das Up-Date für bewegtes Gelände und für Messungen im höchsten Genauigkeitsbereich bei erkennbarem Lattenbeschnitt (Industrievermessung).

Für das Dini 11 und 12 (Trimble) sowie das DNA03 (Leica) sind Up-dates technisch möglich. Über das DL 101C von Topcon ist nicht Näheres bekannt. Dini 10 und NA 3000 bzw. 3003 können nicht aktualisiert werden.

5 Literatur

- [1] BRUNNER, F.K.; WOSCHITZ, H. (2004): Die selbstleuchtende Nivellierlatte. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 3, S. 104–109
- [2] FISCHER, T.; FISCHER W. (1999): Manufacturing of High Precision Levelling Rods. In Lilje M. (Ed.) The Importance of Heights. FIG Gävle, Schweden, S. 223–228
- [3] FRÖHLICH, H.; SCHAUFERTE, W.; SCHULER, D. (2003): Praxistipps zum Präzisionsnivellement mit Digitalnivellieren. Selbstverlag Fröhlich, St.-Augustin
- [4] HEISTER, H.; WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F.K. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 6

- [5] INGENSAND, H. (2001): Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier in HEISTER, H. u. STAIGER, R. „Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik“, DVW-Schriftenreihe, Band 42, S. 120–137
- [6] SCHAUERTE, W.; Heister, H. (2005): Der Ringversuch 2003/2004
- [7] SCHLEMMER, H. (1975): Laserinterferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. DGK, Reihe C, Heft 210, München
- [8] SCHWARZ, W. (2005): Die Komparatoren der Prüflabore. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 6
- [9] WOSCHITZ, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facilities Procedures and Results, TU Graz, Shaker-Verlag, Aachen
- [10] TRIMBLE Produktinformation: Up-Date V. 3.40 für Digitalnivellier Dini 11 und 12
- [11] WOSCHITZ H. (2005): Systemkalibrierung: Effekte von Digitalen Nivelliersystemen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 6

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. RUDOLF STAIGER,
 Universität Duisburg-Essen, FB Bauwissenschaften,
 Henri-Dunant-Straße 65, 45131 Essen,
 rudolf.staiger@uni-esen.de

Prof. Dr. em. BERTHOLD WITTE,
 Geodätisches Institut, Universität Bonn,
 Nussallee 17, 53115 Bonn,
 berthold.witte@uni-bonn.de

Kurzfassung

Seit 30 Jahren ist eine präzise und aussagekräftige Prüfung und Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten möglich. In diesem Beitrag werden – im Rahmen dieses Schwerpunktheftes – die Konsequenzen der aktuell vorliegenden Forschungsergebnisse auf die Messpraxis des Präzisionsnivelements diskutiert. Zur Vermeidung systematischer Höhenabweichungen, hervorgerufen durch die Messausrüstung, werden konkrete Vorschläge unterbreitet.

Summary

Since 30 years the accurate and effective calibration of invar levelling rods is possible. We present here the actual results from this field of calibration with respect to the daily measurement practice. In order to avoid systematic height deviations, caused by the levelling equipment, specific proposals are made.