



H. Heister, H. Woschitz  
und F.K. Brunner

# Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung?

Der Beitrag weist auf die Unterschiede zwischen der Komponenten- und der Systemkalibrierung im Zusammenhang mit Präzisionsnivellierlatten hin und bewertet beide Verfahren hinsichtlich der Praxistauglichkeit.

## 1 Einführung

Die Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten, vorrangig ihres Maßstabs, war schon immer eine Aufgabe, die mit besonderer Sorgfalt durchzuführen war, galt es doch den hohen Genauigkeitsanforderungen des Präzisionsnivelements mit einer relativen Messunsicherheit von  $1 \times 10^{-5}$  gerecht zu werden. Dabei war es lange Zeit ein wesentliches Ziel, jene systematischen Abweichungen zu bestimmen, die auf *unzureichende Kenntnis der Lattenteilung* zurückzuführen waren. Hierbei sind insbesondere zu Beginn der 70er Jahre die Arbeiten von SCHLEMMER (Uni Karlsruhe) sowie LEBOWSKY und GRABE (PTB Braunschweig) anzuführen. Das von SCHLEMMER, 1975 entwickelte Kalibrierverfahren für Präzisionsnivellierlatten eröffnete erstmals die Möglichkeit, *automatisiert die Abweichung jedes Teilstriches* der Lattenteilung von der Solllage mit einer Messunsicherheit von  $7 \mu\text{m}$  zu bestimmen und diese bei der Berechnung der endgültigen Messergebnisse als Verbesserungen zu berücksichtigen.

Mit der Einführung digitaler Nivelliere (INGENSAND, 1990) und deren Weiterentwicklung zu Präzisions-Digitalnivellieren wurden die herkömmlichen Präzisions-Invarlatten mit metrischer Teilung durch Invar-Code-Latten ersetzt. Die Herstellung dieser Latten ist im Detail in FISCHER/FISCHER, 1999 beschrieben und lehnt sich an das von SCHLEMMER entwickelte Kalibrierverfahren an. Verbunden mit dem geänderten Messprozess sind auch neue Prüfverfahren, die diesen innovativen Schritt in der geodätischen Instrumententechnik berücksichtigen mussten. Wie ein weiterer Beitrag in diesem Heft darlegt (SCHWARZ, 2005), wurden hierfür unterschiedliche Kalibriermethoden und -einrichtungen (HEISTER, 1994; MAURER/SCHNÄDELBACH, 1995; SCHMID/INGENSAND, 1995; TAKALO, 1999; FASSBENDER/SCHAUERTE, 2001; WOSCHITZ/BRUNNER, 2003) entwickelt, wobei die grundsätzliche Frage zu erörtern ist, ob vorrangig die *Komponente Code-Latte (Lattenkalibrierung)* oder das System Digitalnivellier und Latte (*Systemkalibrierung*) zu kalibrieren ist.

Der Begriff *Lattenkalibrierung* macht deutlich, dass er sich nur auf die Komponente Latte bezieht und das Digitalnivellier nicht einschließt. Somit ermöglicht dieses Verfahren nur eine Rückführung konventioneller Nivellierlat-

ten, weil nur hier die metrische Teilung direkt die Maßverkörperung darstellt.

Bei einer Code-„Teilung“ ist ohne Beachtung der Ablese-sensorik im Instrument die direkte Zuordnung eines metrischen Wertes (im Sinne einer Messgröße „Höhe“) nicht möglich. Davon zu unterscheiden ist jedoch die durch die Konstruktionsvorschrift des Codes vorgegebene Soll-Lage eines Codeelementes, die mit der Messgröße nicht direkt in Verbindung gebracht werden kann. Die Problematik, die sich bei der *Kalibrierung* und *Rückführung* hieraus ergibt, ist nicht trivial und deshalb Diskussions-schwerpunkt dieses Beitrages.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Wenige Jahre nach der Vorstellung des ersten Digitalnivelliers Wild NA 2000 haben die Firmen Trimble (Zeiss) und Topcon ebenfalls diesen Entwicklungsschritt vollzogen, so dass heute diese Innovation zur Automatisierung des Präzisionsnivelements abgeschlossen erscheint und sich in der Praxis voll durchgesetzt hat. Verbunden hiermit ist jedoch auch, dass es keine *einheitliche* Nivellierlatte mehr gibt: Jeder Hersteller verwendet einen speziellen Lattencode, dessen Bildausschnitt durch einen CCD-Sensor nach verschiedenen Verfahren der Signalverarbeitung digitalisiert wird (INGENSAND, 2005). Dadurch ist die frühere visuelle Höhenablesung des Beobachters, die *einem* bestimmten Teilungsstrich der Skala galt, durch einen automatisierten Messvorgang ersetzt worden, der *mehreren* Codeelementen oder ihren Kanten zuzuordnen ist. Folglich ist die Genauigkeit der Lage *eines* Codeelementes nicht mehr direkt auf die Genauigkeit *einer* Höhenablesung übertragbar. Eine „Strichverbesserung“ für die Codeelemente kann somit nicht zur *direkten* Verbesserung der digitalen Höhenablesung benutzt werden, umso mehr als die implementierten Algorithmen zur Gewinnung der digitalen Information „Höhe“ nicht im Detail publiziert sind. Die „Teilungsgenauigkeit“ von Code-Latten kann nur noch zur Prüfung der *Fertigungstoleranz* des Codes herangezogen werden; diese resultiert wiederum aus der Auswertearithmetik des speziellen Nivelliertyps. Die gewohnten Begriffe wie „Strichverbesserung“ oder „mittleres Lattenmeter“ sind somit bei Code-Latten nicht mehr gültig.

In RÜEGER/BRUNNER, 2000 wurden umfassend die Fehler-einflüsse auf das Nivelement diskutiert, wobei besonderes Augenmerk auf die Systematiken beim Digitalnivelement gelegt wurde. Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, dass es Fehlereinflüsse gibt, die es durch Überprüfung festzustellen gilt und danach eine Entscheidung

über Akzeptanz oder Verwerfung (d.h. Unbrauchbarkeit der Latte oder des Gerätes) erfordern. Teilweise kann aber auch durch eine Justierung der Einfluss bzw. Zustand zufriedenstellend verändert werden. Weiterhin ist dann festzustellen, dass einige Systematiken, wie z.B. der Maßstab  $m$ , nur durch eine Kalibrierung (Rückführung) bestimmt werden können.

Zielsetzung dieser Kalibrierung muss es sein, die verbleibenden Einflüsse von  $m$  und noch zu definierenden  $\Delta H_{\text{kal}}$  zu bestimmen, die dann eine Korrektur des gemessenen Höhenwertes  $H_{\text{gem}}$  ermöglichen:

$$H_{\text{kor}} = H_{\text{gem}} \cdot [1 + m + \alpha_L \cdot (T - T_0)] + \Delta H_{\text{kal}}. \quad (1)$$

Die weiteren Parameter in Gleichung (1) sind der thermische Ausdehnungskoeffizient der Latte  $\alpha_L$ , die Lattentemperatur  $T$  zum Zeitpunkt der Messung und die Referenztemperatur  $T_0$  (in der Regel  $20^\circ\text{C}$ ).

Bei klassischen Invar-Strich-Latten führten der Lattenmaßstab  $m$  und  $\Delta H_{\text{kal}}$  zu Strichverbesserungen, die mittels *Lattenkalibrierung* bestimmt wurden. Bei Digitalnivellieren setzt sich die Höhenverbesserung  $\Delta H_{\text{kal}}$  aus der Lagegenauigkeit mehrerer Codeelemente und weiteren Fehlerinflüssen, die durch die elektro-optische Digitalisierung hervorgerufen werden, zusammen. Dass diese Höhenverbesserungen nur mit Hilfe der *Systemkalibrierung* bestimmt werden können, soll in den nächsten Abschnitten gezeigt werden.

### 3 Kalibrierverfahren

#### 3.1 Lattenkalibrierung

Die schwarz-gelben Codeelemente werden innerhalb vorgegebener Toleranzen durch den Lattenhersteller auf einem Invarband aufgebracht, das in einem Aluminiumrahmen eingespannt die bekannte Präzisionsnivellierlatte realisiert. Bei der Lattenkalibrierung (s. Abb. 1) werden die Ablagen jedes einzelnen Code-Elementes  $y_i$  zu seiner Soll-Lage  $x_i$  bestimmt, wie es bisher auch für herkömmliche Präzisionslatten mit metrischer Teilung durchgeführt wurde. Allerdings muss nun die Soll-Lage, die durch den theoretischen Code typenabhängig ist und vom Hersteller des Instrumentes festgelegt wurde, dem Kalibrierlabor bekannt sein. Je nach Messanordnung bzw. Komparatoreigenschaften und anschließender Analyse (Auswertemodelle) lassen sich unterschiedliche Parameter ableiten. In der Regel sind dies der *Lattenmaßstab*  $m_{\text{KL}}$  und die Korrektur  $k_L$  des *Lattennullpunktes*. Diese kann durch eine zusätzliche Einrichtung meist im gleichen Kalibrierzyklus mitbestimmt werden (siehe z.B. FASSBENDER/SCHAUERTE, 2001), wird aber in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt, da der Lattennullpunkt bei einer geeigneten Messanordnung kompensiert wird.

Im allgemeinen wird das folgende lineare Modell angesetzt:

$$y_i + v_i = c + m_{\text{KL}} \cdot x_i. \quad (2)$$

$y_i$  bedeutet dabei den Ist-Mittelwert der beiden Kanten des  $i$ -ten Codeelementes und  $x_i$  die entsprechende interferometrisch bestimmte Soll-Lage.  $v_i$  entspricht der Rest-

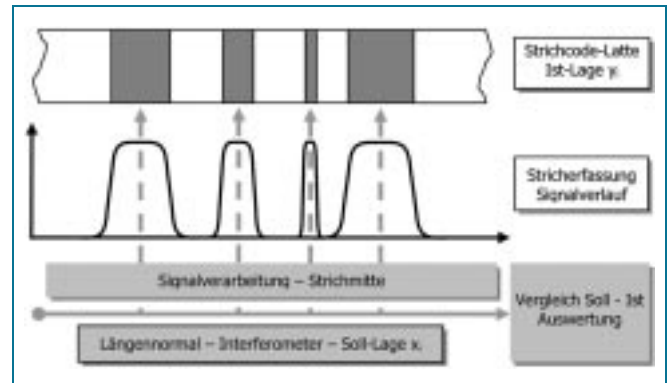


Abb. 1: Prinzip der Lattenkalibrierung

ablage („Strichverbesserung“) und ist somit ebenfalls ein Indikator zur Beurteilung der Fertigungsgenauigkeit der Latte.

Unter bestimmten Bedingungen, nämlich dann wenn im Umfeld des Komparators die Temperatur im Bereich von ca.  $-10^\circ\text{C}$  bis  $+40^\circ\text{C}$  verändert werden kann, ist auch die Bestimmung des wirksamen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_L$  der Latte möglich. Dies ist jedoch in Bezug auf die *Messgröße* beim Nivellieren kein Kalibriervorgang. Die Kenntnis von  $\alpha_L$  ist zur Gewinnung des berichtigten Messwertes eventuell von Bedeutung; dies gilt auf jeden Fall für die Kalibrierung selbst, da sich die Ergebnisse grundsätzlich auf die Referenztemperatur  $T_0$  beziehen. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt (FOPPE u.a., 2004), dass mit  $\alpha_L = 0,75 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  die Ausdehnung des verwendeten Invarbandes genügend genau quantifiziert werden kann. Eine zusätzliche Bestimmung ist deshalb nach Meinung der Autoren nicht notwendig, da es beim Kauf einer *Invar*-Latte Aufgabe des Herstellers ist, spezifizierete typische Eigenschaften und Toleranzen einzuhalten. Allenfalls ist, wie in RÜGER/BRUNNER, 2000 vorgeschlagen, die Überprüfung des Ausdehnungskoeffizienten durch ein unabhängiges Labor im Rahmen eines Typentests sinnvoll.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Lattenkalibrierung heute von allen Laboren, die sich hiermit beschäftigen, auf einem hohen Niveau beherrscht wird (SCHAUERTE/HEISTER, 2005). Die Stricherfassung selbst kann dabei mit einer Messunsicherheit von ca.  $1-2 \mu\text{m}$  angegeben werden, was wiederum zu einer Messunsicherheit in der Maßstabsbestimmung von  $< 1 \text{ ppm}$  führt.

Als Beispiel werden hier die Resultate der Lattenkalibrierung einer Invar-Code-Latte mit Topcon-Code gezeigt. Die Lattenkalibrierung wurde im Geodätischen Labor der Uni-

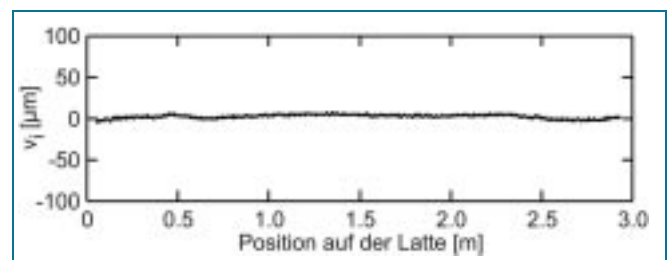


Abb. 2: Resultat der Lattenkalibrierung einer 3 m Topcon Invar-Latte

versität der Bundeswehr in München mit der in HEISTER, 1988 beschriebenen Kalibrieranlage durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Differenzen zwischen der Soll-Lage der Codeelemente und deren tatsächlichen Positionen nach Abspaltung des linearen Lattenmaßstabs  $m_{KL}$ .

Es treten maximale Abweichungen von  $6 \mu\text{m}$  auf, was die hohe Qualität der heute verfügbaren Präzisions-Invarlaten bestätigt. Die größten Abweichungen treten bei dieser speziellen Latte am oberen und unteren Lattenende auf, die vor allem durch die Toleranz in der Geradheit des Lattengehäuses verursacht werden. Trotzdem erfüllt die Latte im Rahmen ihrer Spezifikationen alle Voraussetzungen, um Höhenwerte mit einer Genauigkeit von  $0,01 \text{ mm}$  zu ermöglichen.

### 3.2 Systemkalibrierung

Die Einbeziehung des *Nivellierinstrumentes* in den Kalibrierprozess zusätzlich zur Code-Latte wird als *Systemkalibrierung* bezeichnet (HEISTER, 1994; BRUNNER/WOSCHITZ, 2001). Dabei werden die Differenzen von gemessenen Höhenwerten („Lattenablesungen“) mit einem Längennormal (Interferometer), *direkt* verglichen (s. Abb. 3). Demnach bedeutet dann in Gleichung (2)  $y_i$  die Ablesung am Nivellierinstrument,  $x_i$  die Ablesung am Vergleichsnormal (Interferometer) und  $v_i$  die Residuen der Höhenablesungen. Durch diesen Kalibriervorgang erfolgt die *Rückführung unmittelbar*. Analog zu  $m_{KL}$  in Gleichung (2) kann der Maßstab  $m_{KS}$  bestimmt werden, wobei der Begriff „Lattenmaßstab“ hierbei absichtlich vermieden wird. Der *Systemmaßstab*  $m_{KS}$  beinhaltet nämlich grundsätzlich auch noch systematische Einflüsse des Nivellierinstrumentes. Lange Zeit haben gewisse Unzulänglichkeiten, hervorgerufen durch sensortypisches Verhalten aber auch Fehlfunktionen, die dem Kalibriervorgang zuzuordnen waren, eine Reproduzierbarkeit der Kalibrierergebnisse im zu erwartenden Genauigkeitsrahmen verhindert. Erst weitere Verbesserungsvorschläge durch HEISTER, 2002 aber insbesondere typenabhängige und systematische Untersuchungen bzw. Analysen der Messvorgänge durch WOSCHITZ, 2003 haben gezeigt, dass bei Beachtung instrumententypischer Eigenschaften durch die Systemkalibrierung der repräsentative Maßstab  $m_{KS}$  mit ausreichender Messunsicherheit ermittelt und zur Korrektur genutzt werden kann. Wesentliche Messbedingungen zur Bestimmung des Systemmaßstabes  $m_{KS}$  sind

- Bestimmung des typen- und codeabhängigen Abtastintervalls (WOSCHITZ, 2005),
- Zielweite zum Prüfling  $< 5 \text{ m}$ ,
- Mehrfachmessungen mit dem Nivellierinstrument,
- sensoroptimiertes Beleuchtungsspektrum.

Eventuell sind zusätzliche Ablesungen an einer festen Referenzlatte sinnvoll (HEISTER, 2002). Weiterhin ermöglicht die Systemkalibrierung auch eine repräsentative Genauigkeitsaussage über das Nivellier-System bzw. über die Messgröße „Höhe“, da gemäß Gleichung (2) über die Residuen  $v_i$  ihre Standardabweichung statistisch korrekt geschätzt werden kann.

Neben diesen *primären Kalibrierzielen* erlaubt die Systemkalibrierung auch weiterführende Aussagen über sensortypische Eigenschaften oder Fehlverhalten durch

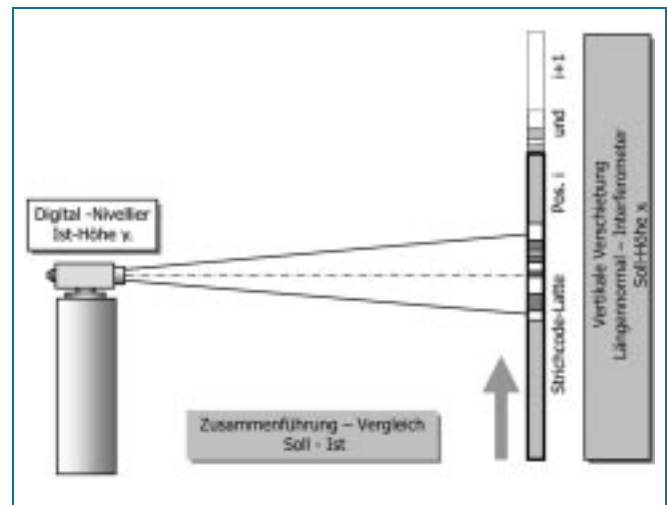


Abb. 3: Prinzip der Systemkalibrierung

den instrumentenspezifischen Auswerteprozess. Hierfür wird beispielhaft die Systemkalibrierung mit einem Topcon DL101C mit zugehöriger Invar-Code-Latte näher betrachtet. Die Ergebnisse stammen aus umfangreichen Typentests, die an der TU Graz durchgeführt wurden (WOSCHITZ, 2003). Für die Systemkalibrierung wurde der in WOSCHITZ/BRUNNER, 2003 beschriebene Vertikalkomparator verwendet. Die Untersuchung zeigte für den Nah- und Fernbereichsmodus des Nivelliers ein extrem unterschiedliches Verhalten. Im Nahbereich, wo zur Berechnung der Höhenwerte ein Kantendetektionsalgorithmus verwendet wird, liefert das Messsystem hervorragende Ergebnisse. Ab einer Entfernung von ca.  $9 \text{ m}$  wird der Fernbereichsmodus (Fourier-Analyse) verwendet. Dabei kommt es zu systematischen Höhenabweichungen von bis zu  $0,3 \text{ mm}$  (WOSCHITZ, 2003, S. 131 – 138). Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Resultat einer Systemkalibrierung und zwar bei einer Distanz von  $13 \text{ m}$ .

Die Höhenwerte sind nach Abspaltung des linearen Systemmaßstabes  $m_{KS}$  sinusförmig beeinflusst, wobei sich die Amplitude in Abhängigkeit des Höhenwertes verändert. Die Beeinflussung wird mit zunehmender Entfernung geringer und ist bei einer Distanz von ca.  $30 \text{ m}$  nicht mehr zu erkennen. Die Ursache für diesen Effekt ist noch unbekannt, jedoch lassen die Resultate des Typentests vermuten, dass die Abweichungen vom Auswertalgorithmus (Fourier-Analyse) verursacht werden. In keinem Fall werden sie durch die Latte selbst verursacht, was aus den Resultaten der Lattenkalibrierung (siehe Abb. 2) geschlossen werden kann.

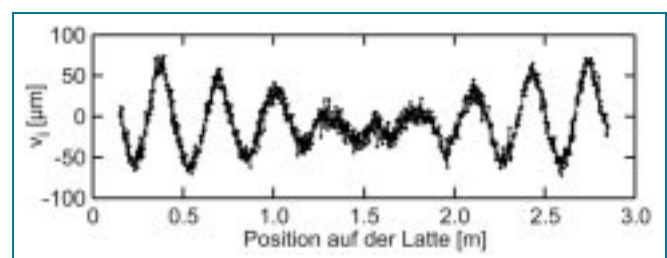


Abb. 4: Resultat der Systemkalibrierung eines Topcon DL101C (SW-Vers. 3.02) bei einer Distanz von  $13 \text{ m}$

Im gezeigten Beispiel muss bei einer Distanz von 13 m mit systematischen Abweichungen von bis zu 0,15 mm gerechnet werden, die bei höchsten Genauigkeitsanforderungen nicht vernachlässigt werden sollten. Gemäß Gleichung (1) ist also neben einer Maßstabskorrektur noch eine instrumentenabhängige Korrekturgröße  $\Delta H_{\text{kal}}$  zur Verbesserung der Messgröße  $H_{\text{gem}}$  anzubringen.

### 3.3 Herleitung einer Kalibrierfunktion

Wie weiterhin die oben dargelegten Typentests gezeigt haben, bleibt die Phasenlage des in Abbildung 4 dargestellten sinusförmigen, amplitudenmodulierten Signalverlaufs innerhalb des Distanzbereiches von 9 m bis 30 m erhalten und auch bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen reproduzierbar. Für dieses deterministische Signal besteht ein Zusammenhang mit den Breiten der Codeelemente, der es ermöglicht, den Höhenfehler  $v_i$  durch folgende Kalibrierfunktion darzustellen (WOSCHITZ, 2003):

$$\Delta H_{\text{kal}}(H_{\text{gem}}, D) = [\text{WA}(H_{\text{gem}} + c) + \text{WB}(H_{\text{gem}} + c) - 10 \text{ mm}] \cdot \frac{a}{b} \cdot f(D). \quad (3)$$

WA und WB sind die Breiten der A- und B-Codeelemente (berechenbar nach RÜEGER, 2000) an den Positionen  $H_{\text{gem}} + c$ , wobei  $H_{\text{gem}}$  der gemessene Höhenwert und  $c$  ein Offset sind. Die Parameter  $a$  und  $b$  des Proportionalitätsfaktors  $a/b$  und der Offset  $c$  wurden mittels Systemkalibrierung für das DL101C (SW-Vers. 3.02) bestimmt. Der zusätzliche Skalierungsfaktor  $f(D)$  passt die Korrekturwerte entsprechend der Distanz  $D$  an. Die angegebene Kalibrierfunktion ist natürlich nur innerhalb des beeinflussten und durch Kalibriermessungen überdeckten Bereichs (ca. 10 m bis 30 m) anzuwenden.

Abbildung 5 zeigt die verbleibenden Höhenfehler  $\bar{v}_i$  nach Korrektur der gemessenen Höhenwerte der Systemkalibrierung (Abb. 4) durch die Kalibrierfunktion, Gleichung (3).

Der systematische Einfluss der Höhenablesung wurde somit wirksam reduziert, die verbleibenden Restabweichungen sind nun  $< 0,05$  mm. Auch bei weiteren Distanzen ( $10 < D < 30$  m) konnte durch Anwendung der Kalibrierfunktion die Systematik beseitigt und die Restabweichung auf  $< 0,05$  mm reduziert werden. Es ist jedoch anzumerken, dass es nicht Absicht ist, diese Kalibrierfunktion als allgemeine Lösung zu präsentieren. Vielmehr soll gezeigt werden, dass nur die Systemkalibrierung derartige systematische Abweichungen aufdeckt und messbar macht.

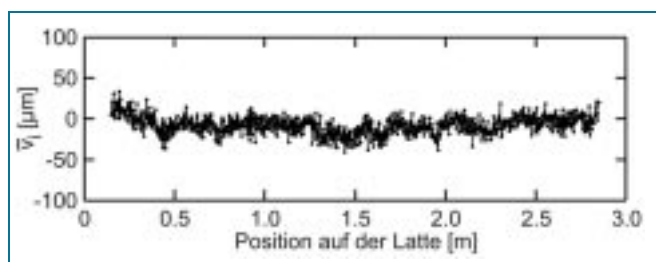


Abb. 5: Restabweichungen der Höhenwerte (Topcon DL101C, 13 m Distanz) nach Anwendung der Kalibrierfunktion Gleichung (3)

## 4 Bewertung

### 4.1 Lattenkalibrierung

Die *Lattenkalibrierung* hat sich aus der historischen Notwendigkeit entwickelt, den Maßstab (das mittlere Lattenmeter) klassischer Nivellierlatten mit Skalenteilung rückzuführen. Deshalb ist dieses Verfahren sicherlich auch für Code-Latten eine geeignete Methode, den *Lattenmaßstab* zu bestimmen; das Digitalnivellier ist jedoch nicht Teil dieses Kalibrierprozesses. Die dabei bestimmten Verbesserungen der Codeelement-Positionen können deshalb nicht direkt zur Korrektur der Höhenwerte verwendet werden. Die Lattenkalibrierung kann daher die Anforderung einer Rückführung im Sinne der Definition *Kalibrierung* nicht erfüllen. Sie bietet jedoch die Möglichkeit, die Lage der einzelnen Codeelemente und damit die Präzision der Fertigung zu überprüfen. Diese Kalibriermethode ist jedoch dann bevorzugt einzusetzen, wenn es um die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_L$  der Invar-Latten geht. Dass dies nicht für jede Latte notwendig ist, wurde bereits o. erwähnt und in RÜEGER/BRUNNER, 2000 ausführlich diskutiert. Für temperaturbedingte Reduktionen ist ein mittlerer Ausdehnungskoeffizient, z.B.  $\alpha_L = 0,75$  ppm/K, ausreichend. Dieser Wert sollte allerdings zur Überprüfung der Herstellungstoleranzen durch ein unabhängiges Labor regelmäßig überprüft und veröffentlicht werden.

Der Trend zu Black-Box-Systemen und die Tatsache, dass die Herstellerfirmen immer weniger geneigt sind, die grundlegenden Funktions- und Auswerteprozesse offen zu legen, werden zukünftig die Komponentenkalibrierung durch die Systemkalibrierung weitgehend ersetzen (HENNES/INGENSAND, 2000; STAIGER, 2000).

### 4.2 Systemkalibrierung

Bei der Systemkalibrierung wird der gemessene Höhenwert nicht nur vom Lattenmaßstab beeinflusst, sondern auch noch vom „Maßstab des Nivelliers“ (Gerätemaßstab), der durch einzelne Hardwarekomponenten und durch den Auswertalgorithmus hervorgerufen werden kann. Dieser Gerätemaßstab sollte idealerweise 1 sein. Er kann für individuelle Instrumente abweichen, wodurch systematische Höhenabweichungen innerhalb des Grundintervalls der Lattenteilung entstehen können (siehe z.B. WOSCHITZ, 2003, S. 145–149). Für die *Systemkalibrierung* ergeben sich somit unterschiedliche Anwendungsbereiche:

- Eine Aufgabe ist die Bestimmung des *Systemmaßstabes* („globaler Maßstab“), der über den ganzen Messbereich der Code-Latte gültig ist und mit dem *Lattenmaßstab* vergleichbar sein sollte. Voraussetzung hierfür ist ein geeignetes Abtastintervall, das unter Kenntnis der gerätespezifischen Effekte bestimmt werden kann (WOSCHITZ, 2004). Weist das Gerät jedoch weitere, eventuell noch unbekannte Effekte auf, so kann die Vergleichbarkeit mit der Lattenkalibrierung nicht mehr gegeben sein.
- Die Bestimmung zusätzlicher, über den linearen Maßstabsanteil hinaus vorliegender systematischer Höhenabweichungen ist eine weitere Aufgabe der Systemka-

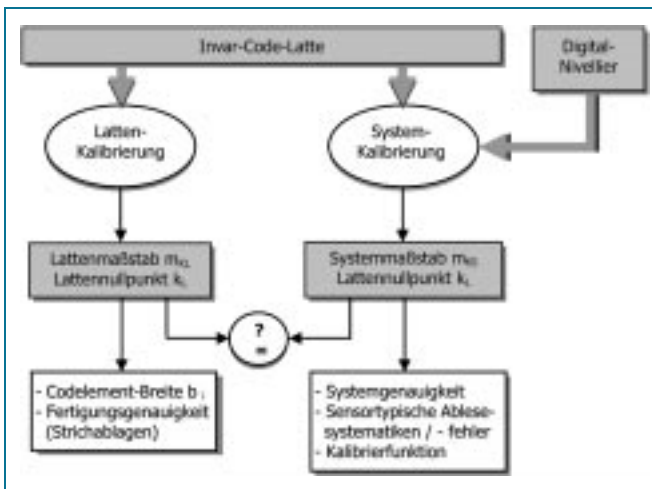


Abb. 6: Vergleichende Gegenüberstellung der Latten- und Systemkalibrierung

librierung. Sind diese Effekte von signifikanter Größenordnung und reproduzierbar, sollten bei entsprechenden Genauigkeitsanforderungen die vom Nivellier ausgegebenen Höhenwerte korrigiert werden. Hierfür können entweder eine *Kalibrierfunktion* oder aber auch die durch eine Systemkalibrierung bestimmten signifikanten *Restabweichungen* verwendet werden. Es wird hier erneut betont, dass nur die Systemkalibrierung, die das Nivellier in den Kalibrierprozess einbindet, die hierfür notwendigen Informationen liefern kann.

In Abbildung 6 sind nochmals die wichtigsten Unterschiede beider Verfahren schematisch gegenübergestellt. Beide Verfahren verlangen eine intensive Kenntnis von Code und/oder Instrument:

- Die Lattenkalibrierung benötigt die Rekonstruktion des Codes, sowie die Aussage, dass durch den Digitalisierungsprozess *keine* systematischen, z.B. maßstabsverändernden, Einflüsse auftreten können.
- Für die Systemkalibrierung müssen die wesentlichen höhenwertbeeinflussenden Größen und Prozesse bekannt sein (z.B. aus Prototypentests bestimmt werden). Generell dürfte es schwieriger sein, den Prozess der Systemkalibrierung zu beherrschen, da *alle* maßstabsrelevanten instrumentellen Fehlereinflüsse eliminiert bzw. kompensiert werden müssen.

Abschließend bleibt noch zu bemerken, dass beide Kalibrierverfahren im Hinblick auf eine umfassende Typenprüfung ihre Berechtigung haben, ja sogar notwendig sind. Die Lattenkalibrierung hat ihre heutige Bedeutung vor allem in der Überprüfung der Herstellungstoleranzen. Die Systemkalibrierung hingegen liefert direkte Aussagen über die Qualität der Höhenwerte des Messsystems und den unmittelbaren Anschluss an das Vergleichsnormale „Länge“.

## 5 Resümee

Nur die Systemkalibrierung garantiert die direkte Rückführung der Messgröße Höhe. Werden dabei signifikante systematische Abweichungen der gemessenen Höhenwer-

te festgestellt, die systeminhärent und daher reproduzierbar sind, dann ist es möglich, diese durch eine Kalibrierfunktion zu berücksichtigen. Diese umfasst nicht nur den linearen Trend – den Maßstab  $m_{SK}$  –, sondern modelliert auch periodische Anteile.

Mit der historisch gewachsenen Lattenkalibrierung, die das Nivellier selbst nicht in den Kalibrierprozess einbezieht, ist dies nicht möglich. Daher sollte die Kalibrierung einer Digitalnivellierausrüstung vorrangig durch eine Systemkalibrierung über den gesamten Messbereich der Nivellierlatte und möglichst bei verschiedenen Distanzen durchgeführt werden. Nur so ist es möglich, den vor 30 Jahren begonnenen Weg – beim Präzisions-Nivellement die visuelle Ablesung durch die Strichverbesserung zu korrigieren – bei der innovativen Messtechnik des digitalen Nivellements erfolgreich fortzusetzen.

## 6 Literatur

- [1] BRUNNER, F. K.; WOSCHITZ, H. (2001): Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In: HEISTER, H.; STAIGER, R.: Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Konrad Wittwer Verlag, DVW Schriftenreihe 42, S. 70–90
- [2] FASSBENDER, H.; SCHAUERTE, W. (2001): Ein geeignetes Meßverfahren für die Kalibrierung beliebig codierter Strichteilungen. Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, 63. Jahrg., S. 129–140
- [3] FISCHER, T.; FISCHER, W. (1999): Manufacturing of High Precision Levelling Rods. In LILJE, M. (Ed.): The importance of heights. FIG, Gävle, Sweden, S. 223–228
- [4] FOPPE, K.; WASMEIER, P.; WUNDERLICH, TH. (2005): Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfungen an der TUM. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 2005, Heft 6
- [5] HEISTER, H. (1994): Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. In: BRUNNER, K. UND PELPE, J. (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 46, S. 95–101
- [6] HEISTER, H. (1988): Zur automatisierten Kalibrierung geodätischer Längenmessinstrumente. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 27
- [7] HEISTER, H. (2002): Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 109. Jahrg., S. 380–385
- [8] HENNES, M.; INGENSAND, H. (2000): Komponentenkali-brierung versus Systemkalibrierung. In: SCHNÄDELBACH, K. UND SCHILCHER, M.: Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166–177
- [9] INGENSAND, H. (1990): Das Wild NA 2000, das erste Digitalnivellier der Welt. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 97. Jahrg., S. 201–210
- [10] INGENSAND, H. (2005): Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 2005, Heft 6
- [11] MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. (1995): Laserinterferometry – Ten Years Experience in Calibrating Invar Leveling Staffs. Proceedings: First International Symposium Applied Laser Techniques in Geodesy and Mine Surveying, Ljubljana

- [12] RÜEGER, J. M. (2000): The Topcon DL-101CL Digital Level. The Australian Surveyor, Vol. 45, S. 62–70
- [13] RÜEGER, J. M.; BRUNNER, F. K. (2000): On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels. Zeitschrift für Vermessungswesen, 125. Jahrg., S. 120–130
- [14] SCHAUERTE, W.; HEISTER, H. (2005): Der Ringversuch 2003/2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 2005, Heft 6
- [15] SCHLEMMER, H. (1975): Laser-Interferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. DGK Reihe C, Heft 210, München
- [16] SCHMID, C.; INGENSAND, H. (1995): Automatisierte Nivellierlattenkalibrierung für Strich- und Codeteilungen. Schriftenreihe „Berichte des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie“, Eigenössische Technische Hochschule Zürich, Heft 244
- [17] SCHWARZ, W. (2005): Komparatoren zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 2005, Heft 6
- [18] STAIGER, R. (2000): Calibration Methods for modern Survey Equipment. Proc. FIG Seminar Mediterranean Surveyor in the new Millenium, September 18–21, Malta, Proceedings auf CD
- [19] TAKALO, M. (1999): Verification of Automated Calibration of Precise Levelling Rods in Finland. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 99: 7, Kirkkonummi
- [20] WOSCHITZ, H., BRUNNER, F. K., HEISTER, H. (2003): Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator. Geoinformation und Landmanagement 128, S. 11–17
- [21] WOSCHITZ, H., BRUNNER, F.K. (2003): Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels. Österr. Z. f. Vermessung und Geoinformation 81, S. 68–76
- [22] WOSCHITZ, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker-Verlag, Aachen, 2003
- [23] WOSCHITZ, H. (2005): Systemkalibrierung: Effekte von Digitalen Nivelliersystemen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 2005, Heft 6

#### Anschriften der Verfasser

Apl. Prof. Dr. Ing.habil. HANS HEISTER,  
Institut für Geodäsie,  
Universität der Bundeswehr München,  
Werner-Heisenbergweg. 39,  
D -85579 Neubiberg,  
h.heister@unibw-muenchen.de

Dr. HELMUT WOSCHITZ und  
o. Univ.-Prof. Dr.techn. FRIEDRICH K. BRUNNER,  
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme,  
Technische Universität Graz,  
Steyrergasse 30,  
A-8010 Graz, helmut.woschitz@tugraz.at,  
fritz.brunner@tugraz.at

#### Zusammenfassung

**Mit der Einführung digitaler Nivelliere wurde die früher notwendige visuelle Höhenablesung des Beobachters durch einen automatisierten Messvorgang abgelöst. Die herkömmlichen Präzisionsnivellierlatten mit metrischer Teilung wurden durch Invar-Code-Latten ersetzt und das Nivellierinstrument bildet nun gemeinsam mit der Code-Latte ein Messsystem. Bei der Berechnung des Höhenwertes werden mehrere Codeelemente verwendet. Die klassischen Verfahren der Lattenkalibrierung, die auch auf Code-Latten angewendet werden, können zwar die Lage der einzelnen Codeelemente bestimmen und damit die Präzision der Lattenfertigung überprüfen, aber das dabei bestimmte „mittlere Lattenmeter“ und die „Strichverbesserungen“ sind nicht mehr direkt nutzbar. Nur eine Kalibrierung unter Einbeziehung des Nivellierinstrumentes, eben die Systemkalibrierung, kann den Anforderungen einer Rückführung der Messgröße „Länge“ genügen und repräsentative Kalibrierparameter für das Messsystem bestimmen.**

#### Abstract

**Since the introduction of digital levels the conventional levelling staffs with metric graduation were substituted by coded staffs. Capturing and evaluating several code elements made the automation of the height readings possible. Now, the digital level and the coded staff together form the measuring system. Using the classical technique of staff calibration allows to measure the positions of the code elements and subsequently to determine the precision of the staff's manufacturing process. However the "mean scale value of the staff" and the "correction values for single graduation lines" of this calibration process are not directly applicable any longer. Only a calibration procedure that involves the levelling instrument, i.e. the system calibration, is able to determine representative calibration parameters for the measuring system and to satisfy the traceability requirements of the measurand „length“.**