

Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen

H. Woschitz

Bei der elektrooptischen Codeablesung kann es zu systematischen Höhenfehlern im Millimeterbereich kommen. Der Beitrag weist solche Effekte nach, die insbesondere bei der Systemkalibrierung aber auch beim praktischen Einsatz der Messsysteme berücksichtigt werden müssen.

1 Einführung

Digitalnivelliere sind eine Weiterentwicklung der automatischen Nivelliere. Daher treten die von klassischen Kompensatornivellieren bekannten, höhenwertbeeinflussenden Effekte mit diesen ebenfalls auf. Die durch die Invarlatte verursachten Effekte sind unverändert und bereits bekannt (siehe z.B. RÜEGER und BRUNNER, 2000), da der mechanische Aufbau der Invar-Code-Latten jenem der klassischen Invar-Strich-Latten (der Fa. Nedo) entspricht. Für Kompensatornivelliere wurden spezielle Mess-, Prüf- und Justierverfahren entwickelt (z.B. das Verfahren „Rote Hose“), um den Einfluss aller Effekte möglichst gering zu halten. Diese bewährten Verfahren sind natürlich auch bei der Verwendung von Digitalnivellieren anzuwenden. Durch die automatisierte Höhenablesung treten jedoch zusätzliche Störeffekte auf, über die und deren Untersuchungen in der Literatur bereits ausführlich berichtet wurde, siehe z.B. RÜEGER und BRUNNER (2000).

Bedingt durch die elektro-optische Höhenablesung kann das Nivellier nicht mehr von der Latte getrennt betrachtet werden. Dies spielt vor allem bei der Rückführung der Messgröße „Höhe“ eine wesentliche Rolle. Im Rahmen einer Systemkalibrierung (erste Erwähnung durch HEISTER, 1994) muss das ganze Messsystem verwendet werden. Daher ist die Kenntnis der besonderen Effekte der Digital-Nivelliersysteme und deren Berücksichtigung im Kalibrierprozess essentiell, vor allem bei der Routine-Kalibrierung, durch die der Systemmaßstab bestimmt wird.

In diesem Beitrag werden daher Effekte von Präzisions-Digitalnivelliersystemen gezeigt, die das Ergebnis der Systemkalibrierung beeinflussen können. In Abschnitt 2 werden Temperatureffekte und in Abschnitt 3 systematische Höhenfehler bei Messungen in den Lattenendbereichen behandelt. Für die Bestimmung der Abtastintervalle bei der Systemkalibrierung sind auch Quantisierungseffekte (Abschnitt 4) und zyklische Höhenfehler (Abschnitt 5) zu beachten. Deren Berücksichtigung im Kalibrierprozess führt zum an der TU Graz verwendeten Ablauf der Systemkalibrierung, der in Abschnitt 6 beschrieben wird und den Kern dieses Beitrages darstellt. Da die gezeigten Effekte aber auch im Feld auftreten, sind sie für die Praktiker ebenfalls von besonderem Interesse.

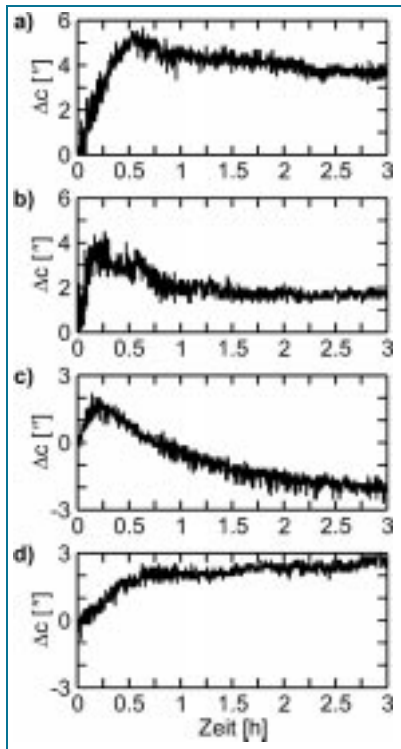
2 Temperatureffekte

2.1 Akklimatisationseffekte

Wird ein Digitalnivellier einer anderen Umgebungstemperatur ausgesetzt, kann sich aufgrund der thermischen Ausdehnung der Nivelliermaterialien die Ziellinie um einen Betrag Δc verändern. Dies wurde bereits für verschiedene Digitalnivellier-Typen untersucht, z.B. BLUM (1991), SCHAUERTE (1995) oder RÜEGER (2000). Bei vielen Untersuchungen wurden die Messungen automatisiert ausgelöst und erfolgten unmittelbar aufeinander. Um jedoch auch die Bewegung des Nivelliers im Feld (Tragen des Gerätes, Auslösen der Messung) zu simulieren, wurde eine neue Untersuchung mit Anregung des Kompensators durchgeführt. Nach jeweils drei Höhenablesungen erfolgte die Anregung mittels einer Klopfleinrichtung (siehe WOSCHITZ UND BRUNNER, 2003). Danach wurde eine Ruhephase von jeweils 10 Sekunden eingehalten, um die Zeit, während der das Gerät nicht arbeitet (Anzielvorgang bei Feldmessungen oder Positionierung der Latte bei der Kalibrierung), zu simulieren. Die untersuchten Geräte waren ein Leica NA3003 (SW-Vers. 4.3), ein Leica DNA03 (SW-Vers. 1.20), ein Topcon DL101C (SW-Vers. 3.02) und ein Trimble/Zeiss DiNi11 (SW-Vers. 3.40). Die Messungen wurden automatisch ausgelöst und erfolgten auf eine etwa 12 m entfernte, fix stehende Nivellierlatte. Vor Messbeginn befand sich das eingeschaltete Nivellier 5 Stunden lang bei 40 °C in einer Klimabox. Abb. 1 zeigt das Verhalten der Präzisions-Digitalnivelliere während der Akklimatisation auf Raumtemperatur (ca. 25 °C, beim DNA03 20 °C). Während dieser Zeit blieb die Temperatur im Labor innerhalb von $\pm 0,2$ K stabil.

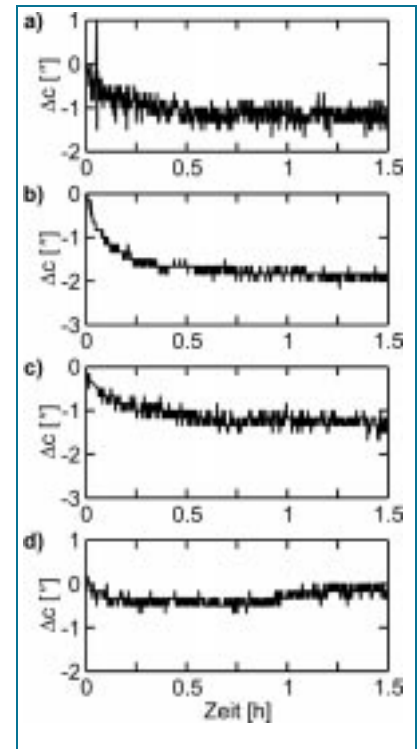
Alle Instrumente zeigen die stärksten Änderungen der Ziellinie (bis zu 6'') in der Anfangsphase während der ersten 10 bis 40 Minuten. Die Ziellinie ändert sich danach langsamer und wird erst nach mehr als drei Stunden vollkommen stabil. Die entsprechenden Versuche ohne Kompensatoranregung (hier nicht gezeigt) ergaben einen sehr ähnlichen Verlauf, allerdings schien der Kompensator zu bestimmten Zeitpunkten hängen zu bleiben.

Für Feldmessungen mit unterschiedlichen Distanzen ergibt sich aus der Untersuchung, dass eine Akklimatisationszeit von etwa 2 min/K eingehalten werden sollte (vergleiche auch MENZEL, 1999). Die danach verbleibenden Ziellinienänderungen können für die meisten Anwendungen über ein lineares Korrekturmodell ausreichend eliminiert werden, vorausgesetzt, dass sie mittels einer entsprechenden Messkonfiguration (z.B. zwei mehrmals gemessene stabile Referenzpunkte) erfasst wurden. Bei der Kalibrierung hingegen, für die maximale Stabilität der Ziellinie gefordert wird, ist eine Akklimatisationszeit von 8



◀ **Abb. 1:** Ziellinienänderung eines (a) Leica NA3003, (b) Leica DNA03, (c) Topcon DL101C und (d) Trimble/Zeiss DiNi11 während deren Akklimation von 40 °C auf Raumtemperatur und mit Kompensatoranregung

Abb. 2: Ziellinienänderung eines akklimatisierten (a) Leica NA3003, (b) Leica DNA03, (c) Topcon DL101C und (d) Trimble/Zeiss DiNi11 nach dem Einschalten und mit Kompensatoranregung ▶



Stunden, wie sie von RÜEGER und BRUNNER (2000) vorgeschlagen wurde, sicherlich gerechtfertigt.

2.2 Eigenerwärmung

Nach der Inbetriebnahme ändert sich die Ziellinie auch bei einem genügend akklimatisierten Instrument als Folge der Eigenerwärmung. Zur Bestimmung der Größenordnung des Effektes wurden Testmessungen mit den mehreren Tagen lang akklimatisierten Geräten durchgeführt. Erst unmittelbar vor dem Test wurden die Geräte eingeschaltet. Die danach erfolgten Ziellinienänderungen sind in Abb.2 dargestellt. Der Aufbau und die Messung erfolgte, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, wiederum mit Anregung des Kompensators.

Innerhalb von etwa 15 Minuten treten Ziellinienänderungen von 0,4'' bis 2,0'' auf. Danach ändert sich die Ziellinie der verschiedenen Instrumente nicht mehr bzw. nur mehr linear. Um einen Eindruck über die Eigenerwärmung zu erhalten, wurde die Gerätetemperatur des Leica DNA03 mit dem eingebauten Temperatursensor gemessen und aufgezeichnet. In den ersten 15 Minuten stieg die interne Gerätetemperatur um 2 K an, danach nur mehr um 0,5 K. Bei weiteren Versuchen ohne Kompensatoranregung traten Effekte ähnlicher Größenordnung und Änderungsverlaufs auf. Nur das Topcon Gerät wies, im Vergleich zum in Abb. 2c gezeigten Verlauf, deutliche Unterschiede auf und erreichte die lineare Phase erst nach 90 Minuten. Wird das akklimatisierte Gerät jedoch mehrere Stunden vor Messbeginn eingeschaltet, halbiert sich der Einfluss beim Topcon Gerät. Bei den Leica und Trimble/Zeiss Geräten treten dann keine Ziellinienänderungen mehr auf.

Für die Kalibrierung bedeutet dies, dass das Gerät schon während der Akklimationsphase eingeschaltet sein sollte, oder dass vor der eigentlichen Kalibrierung so viele Messungen durchgeführt werden, bis sich das Gerät im

linearen Bereich der „Aufheizkurve“ befindet. Um den verbleibenden Resteinfluss zu minimieren, ist in jedem Fall eine kurze Kalibrierdistanz anzustreben.

Beim Liniennivellement haben dieser und der zuvor gezeigte Effekt keinen Einfluss, da die Messungen aus der Mitte und unmittelbar hintereinander erfolgen. Hingegen werden beim Flächennivellement die Höhenwerte infolge der unterschiedlichen Distanzen beeinflusst, was aber, vorausgesetzt man befindet sich im linearen Bereich, wieder erfasst und rechnerisch eliminiert werden kann.

3 Höhenfehler in den Lattenendbereichen

Alle Digitalnivelliere verwenden zur Berechnung der Höhenwerte mehrere Codeelemente. Die Größe des benutzten Lattenabschnitts (L^{calc}) ist bei den Leica und Topcon Geräten distanzabhängig ($L^{calc} = 2 \cdot d \cdot \tan \alpha$ mit der Distanz d und dem Öffnungswinkel α , wobei $\alpha = 2^\circ$ für die Leica und $\alpha = 1^\circ 20'$ für die Topcon Instrumente ist), und bei den Trimble/Zeiss Geräten konstant ($L^{calc} = 30$ cm bzw. 100 cm bei Geräten der T-Serie). Somit wird nahe den Lattenenden nicht nur der Lattencode, sondern auch die Hintergrundtextur am CCD-Array abgebildet. Diese Störmuster müssen von der Software erkannt und gefiltert werden. In jedem Fall ist das verbleibende Code-Bild unsymmetrisch, wodurch Höhenfehler entstehen können. Die Hersteller (z.B. LEICA, 1994) empfehlen daher keine Messungen in den Lattenendbereichen durchzuführen. Bei einer 3 m Invar-Latte liegen diese unterhalb $0,04 \text{ m} + L^{calc}/2$ und oberhalb $2,98 \text{ m} - L^{calc}/2$.

Abb.3 zeigt die Höhenabweichungen ΔH der vier verschiedenen Digitalnivelliere am oberen Ende einer 3 m Invar-Latte bei den Distanzen 3 m und 30 m, wobei der zu meidende Lattenendbereich rechts von der vertikalen Linie liegt.

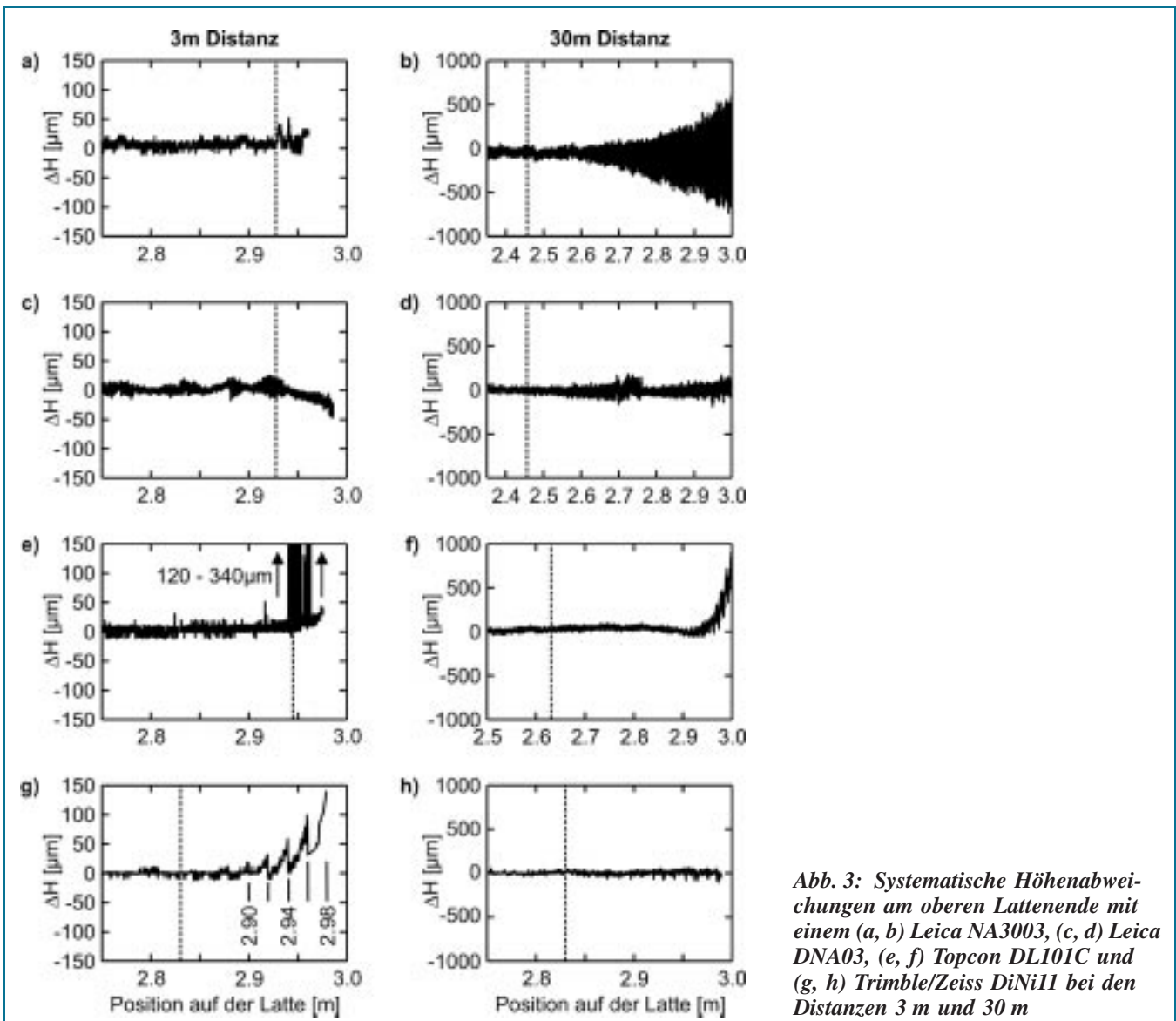


Abb. 3: Systematische Höhenabweichungen am oberen Lattenende mit einem (a, b) Leica NA3003, (c, d) Leica DNA03, (e, f) Topcon DL101C und (g, h) Trimble/Zeiss DiNi11 bei den Distanzen 3 m und 30 m

Bei der 3 m Distanz kann keines der Geräte eine 3 m Latte voll ausmessen. Ursache hierfür ist, dass im extremen Lattenendbereich zu wenig Codeelemente für die Decodierung des Lattencodes vorhanden sind. Die Leica Geräte zeigen nahe den Lattenenden Höhenfehler kleiner als 0,05 mm. Die Fehler des Topcon Geräts betragen bis zu 0,34 mm und liegen damit in der Größenordnung jener Fehler, die im Übergangsbereich von Nah- und Fernmodus auftreten (WOSCHITZ, 2003, S. 135). Beim Trimble/Zeiss Gerät treten Fehler von bis zu 0,15 mm auf, deren Ursache in der Verzeichnung des Gerätes (WOSCHITZ, 2003, S. 147) liegen dürfte. Die sägezahnartige Abweichungen, die mit der 20 mm Periode des Codes auftreten, werden durch eine Fehlschätzung des Abbildungsmaßstabes verursacht.

Bei der 30 m Distanz treten beim NA3003 zyklische Höhenfehler mit einer Amplitude von bis zu 0,6 mm (am unteren Lattenende 1,5 mm) und einer Periode von etwa 4,05 mm auf. Beim DNA03 betragen diese Fehler an den Lattenenden nur mehr etwa 0,2 mm. Beim DL101C ist neben den Abweichungen von bis zu 0,8 mm auch ein sägezahnartiger Effekt zu erkennen, der die 10 mm

Periode des Topcon Codes aufweist. Die Höhenwerte des DiNi11 im Lattenendbereich sind unbeeinflusst, da der verwendete 30 cm Bereich bei größeren Distanzen weitgehend von der Verzeichnung unbeeinflusst ist. Die Untersuchung wurde mit allen Geräten auch für den unteren Lattenendbereich durchgeführt. Die dort auftretenden Abweichungen sind in etwa von der gleichen Größenordnung wie jene am oberen Lattenende. Bei der Routine-Kalibrierung müssen die beiden Lattenendbereiche ausgeschlossen werden, damit die dort auftretenden systematischen Fehler nicht die Schätzung des Maßstabs beeinflussen. Aber auch bei Feldmessungen sollten die Lattenenden immer gemieden werden. Erkennt das Gerät bei der Berechnung des Höhenwertes die Hintergrundtextur nicht richtig, so können auch grobe Fehler auftreten, z.B. ein 2,15 m Höhenfehler beim DL101C bei 10 m Distanz (WOSCHITZ, 2003, S. 154). Für die meisten Anwendungsbereiche und für die derzeitigen Präzisions-Digitalnivelliere kann für den Distanzbereich unter 30 m die pragmatische Faustformel „Lattenendbereich ist ca. 30 cm“ verwendet werden.

4 Quantisierungseffekte

Alle derzeitigen Präzisions-Digitalnivelliere haben eine Höhengauflösung von $\Delta = 10 \mu\text{m}$. Höhenwerte, die innerhalb dieses $10 \mu\text{m}$ Quantisierungsintervalles liegen, werden entweder auf ganze $10 \mu\text{m}$ gerundet oder abgeschnitten. Der dadurch entstehende Quantisierungsfehler ε ($-5 \mu\text{m} < \varepsilon \leq +5 \mu\text{m}$) ist für Feldmessungen sicherlich nicht von Bedeutung. Bei einer Kalibrierung kann jedoch der bestimmte Maßstab β um bis zu $9,9/L \text{ ppm}$ vom tatsächlichen β abweichen, wenn die ε an den Messpositionen nicht zufällig verteilt sind. Dabei ist L in [m] der bei der Kalibrierung verwendete Lattenbereich, also die Länge des sichtbaren Invarbandes vermindert um die beiden Lattenendbereiche. Um einen Maßstabsfehler zu vermeiden, muss das Abtastintervall I_s die Bedingung

$$\text{modulo}(I_s, \Delta) \neq 0 \quad (1)$$

erfüllen, d.h. I_s darf kein ganzzahliges Vielfaches von der Höhengauflösung Δ sein. Wird nun beispielsweise ein I_s verwendet, das die Gleichung

$$\text{modulo}(I_s, \Delta) = 3 \mu\text{m} \quad (2)$$

erfüllt, werden die Quantisierungsfehler ε für den in der Praxis vorkommenden Maßstabsbereich (ca. $|\beta| < 20 \text{ ppm}$) ihre Systematik weitgehend verlieren. Dies könnte auch durch Mehrfachmessung an einer Lattenposition erreicht werden, wobei zwischen k Einzelmessungen, die Latte jeweils um einen Betrag Δ/k verschoben wird (MEIER-HIERMER und MEIER-HIERMER, 1995). Diese Multi-Positionierung der Latte mit μm -Genauigkeit würde jedoch eine erhebliche Verlängerung des Kalibrierprozesses verursachen.

Der Maßstab β lässt sich mit einer Präzision von σ_β schätzen, wenn genügend viele Messungen auf der Latte durchgeführt werden. Die Anzahl n der notwendigen Messungen kann ausgehend von der Varianz des mittels linearer Regression geschätzten Maßstabswertes und unter der nun berechtigten Annahme der Gleichverteilung der Quantisierungsfehler mit

$$n \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta^2}{L^2 \cdot \sigma_\beta^2} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta^4}{L^4 \cdot \sigma_\beta^4} + 1} \quad (3)$$

berechnet werden (WOSCHITZ, 2003, S. 169–179). Dabei wird vorausgesetzt, dass sonst keine systematischen Höhenfehler vorliegen, weswegen z.B. in den Lattenendbereichen keine Messungen durchgeführt werden dürfen. Das Abtastintervall ergibt sich aus L/n , muss aber noch leicht angepasst werden, um Gleichung (2) zu genügen und um bei der Kalibriermessung mögliche systematische Effekte, hervorgerufen durch z.B. zyklische Höhenfehler, aufdecken zu können.

5 Zyklische Höhenfehler

Schon bald nach Einführung der Digitalnivelliere wurde über zyklische Höhenfehler berichtet. Für das Wild NA2000 wurden beispielsweise bei einer Distanz von 15 m Höhenfehler mit einer Amplitude von 0,35 mm und einer Periode von 2,025 mm festgestellt (SCHAUERTE,

1991). Zwischen dem Auftreten dieser Effekte und der größenmäßigen Übereinstimmung von einem oder mehreren Codeelementen (Leica: 2,025 mm Breite) mit einem oder mehreren auf die Latte projizierten Pixel ($pixel^{proj}$) des CCD-Arrays besteht ein Zusammenhang. Die Größe von $pixel^{proj}$ lässt mit $pixel^{proj} = pixel \cdot d/f$ leicht berechnen, wobei $pixel$ die Größe eines Pixels des Bildsensors, d die Distanz und f die Brennweite des Nivelliers sind (numerische Werte für f und $pixel$ sind z.B. in WOSCHITZ, 2003, S. 42 angegeben). Mittlerweile wurden für alle Präzisions-Digitalnivelliere bei Prototypen-Tests zyklische Höhenfehler festgestellt (WOSCHITZ, 2003), deren Periode p entweder $pixel^{proj}$ ist oder vom Grundintervall der Latteinteilung abhängt.

Exemplarisch ist in Abb. 4 die Entwicklung zyklischer Höhenfehler für ein Leica NA3003 (Messmodus: „erweiterte Systemgenauigkeit“) im Distanzbereich um 15 m für einen $4 \cdot pixel^{proj}$ (ca. 8,1 mm) großen Lattenabschnitt gezeigt. Die maximalen Höheneffekte haben eine Amplitude von 0,15 mm und eine Periode von 2,025 mm. Sie treten beim untersuchten Gerät bei einer Distanz von 14,98 m auf, wo $1 \cdot pixel^{proj}$ genau einem 2,025 mm Codeelement entspricht. Bei leicht geänderten Distanzen treten kaum mehr Höheneffekte auf, siehe Abb. 4. Für die Praxis ist daher zu empfehlen, keine Messungen um diese Distanz (etwa $15 \text{ m} \pm 0,25 \text{ m}$) durchzuführen. Bei anderen Distanzen treten solche Effekte zwar auch auf, sind aber mit der Ausnahme von hochpräzisen Einzelhöhenübertragungen wohl kaum von Bedeutung für die Praxis. Als Hauptursache konnte mit einem an der TU Graz erstellten Simulationsprogramm, das mittels einfacher physikalischer Modelle Pixelbilder generieren und diese mit nachgebildeten Nivellier-Algorithmen auswerten kann, die Unvollkommenheit der Bildsensoren festgestellt werden (WOSCHITZ, 2003, S. 124–131).

Bei der Routine-Kalibrierung zur Maßstabsbestimmung müssen die zyklischen Höhenfehler jedoch berücksichtigt werden, da das Abtastintervall I_s aus wirtschaftlichen Gründen (kurze Messzeiten) wesentlich größer ist, als deren Periode p . Durch diese Missachtung des Abtasttheorems von Shannon treten Alias-Effekte auf, die nicht stören, solange die Wellenlänge des Alias wesentlich kleiner als der bei der Kalibrierung verwendete Lattenabschnitt L ist, es sich also um einen kurzwelligen Alias handelt. Unter Kenntnis von p lässt sich für ein I_s die Wellenlänge des Alias berechnen und somit ein geeignetes Abtastintervall finden.

Trotz der Optimierung von I_s ist es möglich, dass ein langwelliger Alias auftritt, da die Geräteparameter (z.B. Brennweite) zwischen den einzelnen Geräten variieren

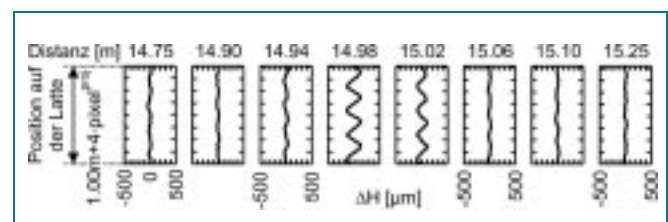


Abb. 4: Zyklische Höhenfehler des Leica NA3003 um eine Distanz von 15 m



können. Der geschätzte Maßstab kann dadurch um bis zu $2 \cdot A/L$ ppm verfälscht sein, wobei A die Amplitude des zyklischen Fehlers in [μm] und L in [m] ist. Beispielsweise könnte sich für ein Leica NA3000 (oder NA3003 im Modus „Standard Systemgenauigkeit“) bei einer Distanz von 3 m, einem L von 2,7 m und einem A von 0,04 mm ein Maßstabsfehler von 30 ppm ergeben. Ein langwelliger Alias kann jedoch erkannt werden, wenn die Messpositionen der Rückmessung gegenüber jenen der Hinmessung um $Is/2$ versetzt sind, da dann die Alias der Hin- und der Rückmessung um π phasenverschoben sind.

Eine weitere Fehlererkennungsmöglichkeit ist einfach realisierbar, indem die Wiederholungsmessung mit einem um δ unterschiedlichen Is durchgeführt wird, wobei δ kleiner als die Periode p der zyklischen Höhenfehler sein muss (z.B. $p/3$). Stimmt der aus beiden Kalibrierungen geschätzte Maßstab nicht überein, so ist bei einer der beiden ein langwelliger Alias aufgetreten, die andere wird jedoch fehlerfrei sein. Die Entscheidung, welche der beiden Messungen beeinflusst war, ist erst nach einer weiteren Wiederholungsmessung möglich, wobei das Is zu den beiden vorangegangenen wieder um δ unterschiedlich sein muss.

6 Ablauf der Systemkalibrierung an der TU Graz

An der TU Graz wird die Routine-Systemkalibrierung unter reproduzierbaren Laborbedingungen (Temperatur, Feuchte, Beleuchtung) mit einem Vertikalkomparator, der eine Standardunsicherheit ($k = 2$) von $\pm 3 \mu\text{m}$ aufweist (WOSCHITZ und BRUNNER, 2003), durchgeführt. Die im Präzisionsnivelement üblichen Distanzen zwischen 1,5 m und 30 m können verwendet werden. Die Kalibrierung wird im wesentlichen nach dem Vorschlag von RÜEGER und BRUNNER (2000) durchgeführt, wobei durch einige Änderungen eine noch höhere Präzision in der Maßstabsbestimmung erreicht werden konnte (WOSCHITZ, 2003).

Nach einer mindestens 8-stündigen Akklimatisationszeit wird die Systemkalibrierung bei einer kurzen (3 m) und einer langen (10–30 m) Distanz durchgeführt. Bei der kurzen Distanz haben ziellinienverändernde Einflüsse (z.B. Refraktion, Aufheizeffekte) einen geringen Einfluss auf das Ergebnis, und die Präzision der Höhenmessung ist besser als bei langen Distanzen, da ein Codeelement auf mehrere Pixel projiziert wird. Zudem sind die Lattenendbereiche hier relativ klein. Bei 3 m wird die Kalibrierung mit beiden dem Messsystem zugehörigen Invarlatten durchgeführt. Als Ergebnis erhält man die Systemgenau-

igkeit, die Maßstabswerte und die Information über die Reproduzierbarkeit.

Bei der längeren Distanz wird die Systemkalibrierung aus ökonomischen Gründen nur mit einer Latte durchgeführt. Sie dient im wesentlichen zur Überprüfung des Messsystems, denn manche Systeme verwenden bei längeren Distanzen einen anderen Algorithmus als bei kurzen. Der Lattencode wird schlechter aufgelöst, weshalb die Auflösung des Systems in der Regel geringer ist. Ziellinienvariationen erzeugen größere Höhenfehler und werden dadurch leichter detektierbar.

Das Abtastintervall wurde für die 3 m Distanz den Überlegungen aus den Abschnitten 3 bis 5 zufolge bestimmt. Der verwendete Lattenendbereich und die Anzahl der Messpunkte, die notwendig sind, um den Maßstab mit einem $\sigma_\beta = 0,3$ ppm bestimmen zu können, sind in Tab. 1 angegeben. Daraus ergibt sich das Abtastintervall $Is1$, das jedoch noch leicht adaptiert wurde, um Gleichung (2) zu erfüllen und um von zyklischen Höhenfehlern möglichst unbeeinflusst zu sein.

Bei Verwendung dieser Intervalle überlappen sich die vom CCD gesehene Bereiche des Lattencodes an den benachbarten Lattenpositionen, so dass beschädigte Codeelemente (siehe z.B. WOSCHITZ, 2003, S. 158–166) zumindest durch drei aufeinanderfolgende Höhenwerte angezeigt werden.

Jede Kalibrierung besteht aus einer Hinmessung (nach oben) und einer Rückmessung (nach unten), um eine Beeinflussung durch mögliche Ziellinienvariationen ausschließen zu können. Das Abtastintervall ist für diese beiden Messungen gleich groß. Die Messpositionen der Rückmessung sind gegenüber jenen der Hinmessung um $Is/2$ versetzt (siehe Abschnitt 5) und das Nivellier bleibt für beide Messungen unverändert an seiner Position. Sollte eine Anregung des Kompensators notwendig sein (was sich aus den bisherigen Messungen nicht gezeigt hat), so wird dies mit der Klopfvorrichtung des Komparators ausgeführt.

Danach wird die Latte ausgespannt, wie bei Feldmessungen auf einen Höhenpunkt aufgesetzt, wieder am Komparator montiert und eine Wiederholungsmessung mit $Is2$ (Tab. 1) durchgeführt. Stimmt der aus beiden Kalibrierungen bestimmte Maßstabswert nicht überein, ist entweder die Latte defekt (z.B. klemmendes Invarband, defekte Spannvorrichtung) oder ein (noch nicht detektierter) langwelliger Alias (siehe Abschnitt 5) aufgetreten. Um den Effekt zuzuordnen zu können, wird in solchen Fällen eine dritte Kalibrierung mit $Is3$ durchgeführt. Im Falle eines Alias stimmen dann zumindest zwei Maßstabswerte überein, im Falle einer defekten Latte werden alle drei unterschiedlich sein.

Tab. 1: Abtastintervalle bei einer Distanz von 3 m

Digital Nivellier Typ	verwendbarer Lattenbereich [m]	Anzahl der Messpunkte n	Abtastintervalle [mm]		
			$Is1$	$Is2$	$Is3$
Leica NA3000/3003	0,094–2,921	138	20,503	20,363	20,633
Leica DNA03	0,099–2,928	138	20,573	20,493	20,643
Topcon DL101/DL101C	0,083–2,939	135	21,273	21,233	21,313
Trimble DiNi 10/11/12	0,175–2,849	155	17,313	17,263	17,363

Die Auswertung der Kalibriermessungen erfolgt im Post-processing, zunächst getrennt für jede Hin- und Rückmessung, dann aber gemeinsam, wenn diese durch keine Effekte (z.B. Ziellinienvariationen) beeinträchtigt sind. Systematische Höhenfehler (z.B. durch beschädigte Codeelemente) müssen natürlich eliminiert werden, wodurch jedoch die Präzision des Maßstabswerts infolge der verringerten Anzahl an Messpunkten schlechter wird. Dies spielt jedoch keine praktische Rolle, da eine Latte mit beschädigten Codeelementen für Präzisionsmessungen ohnedies ausgeschieden werden sollte.

9 Resümee

Durch Vergleichsmessungen mit neuwertigen Instrumenten konnte gezeigt werden (WOSCHITZ et al., 2003), dass der Maßstab des Messsystems mittels Systemkalibrierung auf besser als 1 ppm bestimmt werden kann. Im allgemeinen beträgt die Standardunsicherheit (nach GUM, $k = 2$) des Maßstabs etwa ± 1 ppm, was durch die Unsicherheiten des Komparators und der aus ökonomischen Gründen gering zu haltenden Anzahl an Messpunkten bedingt wird. Die Kenntnis der Effekte der digitalen Nivelliersysteme und deren Berücksichtigung bei der Kalibrierung sind Voraussetzung, um diese hohe Genauigkeit erreichen zu können, und wurden in der vorliegenden Arbeit ausführlich besprochen.

10 Danksagung

Besonderer Dank gilt den Firmen Leica (R&A Rost, Wien), ZSP Geodätische Systeme, Jena und Topcon für die zur Verfügung gestellten Geräte.

Referenzen

- BLUM, M. (1991): Untersuchung und Test des digitalen Nivelliers Wild NA 2000. Allg. Verm. Nachrichten 98: 198–205
- BRUNNER, F. K.; WOSCHITZ, H. (2001): Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In HEISTER, H. und STAIGER, R. (Eds.) Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Konrad Wittwer Verlag, DVW Schriftenreihe 42: 70–90
- LEICA (1994): Wild NA2002 – NA3003 Digitalnivelliere. Technischer Bericht Nr. G1-220-0de-V.94-VD, 13 S.
- MEIER-HIRMER, B., MEIER-HIRMER, R. (1995): Steigerung des Auflösungsvermögens bei digitalen Messgeräten. In: Festschrift für Draheim H, Kuntz E, Mälzer H, Geodätisches Inst. der Univ. Karlsruhe: 151–164
- MENZEL, M. (1999): The Development of Levels during the past 25 years, with special Emphasis on the NI002 Optical Geodetic Level and the DiNi11 Digital Level. In LILJE, M. (Ed.): The importance of heights. FIG, Gävle, Schweden: 85–93
- RÜEGER, J. M. (2000): The Topcon DL-101C Digital Level. The Australian Surveyor 45: 62–70
- RÜEGER, J. M.; BRUNNER, F. K. (2000): On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels. Z. f. Vermessungswesen 125: 120–130

- SCHAUERTE, W. (1991): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Digitalnivelliers WILD NA 2000. Vermessung und Raumordnung 53: 45–55
- SCHAUERTE, W. (1995): Erste Untersuchungsergebnisse zum neuen DiNi10-Digitalnivellier der Fa. Carl Zeiss. Vermessung und Raumordnung 57: 78–89
- WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K.; HEISTER, H. (2003): Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator. Z. f. Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 128: 11–17
- WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K. (2003): Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels. Österr. Z. f. Vermessung und Geoinformation 81: 68–76
- WOSCHITZ, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker-Verlag, Aachen, 210 S.

Anschrift des Verfassers

Dr. HELMUT WOSCHITZ,
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme,
Technische Universität Graz,
Steyrergasse 30,
A-8010 Graz,
helmut.woschitz@tugraz.at

Zusammenfassung

Bei digitalen Nivelliersystemen kann es durch die elektro-optische Höhenablesung zu systematischen Effekten kommen. Dadurch können bei speziellen Distanzen oder durch die Anzielung gewisser Bereiche auf der Latte Höhenfehler im Millimeterbereich entstehen. Anhand von Untersuchungsergebnissen der derzeit am Markt erhältlichen Digitalnivelliere werden jene höhenwertbeeinflussenden Effekte gezeigt, die bei der Systemkalibrierung berücksichtigt werden müssen. Die Beschreibung des Ablaufs der Systemkalibrierung stellt den Kern der Arbeit dar. Doch auch für den Praktiker werden die gezeigten Effekte von besonderem Interesse sein.

Abstract

Digital levels use the image of the coded staff to determine the height readings. At specific distances or at specific positions at the staff, systematic effects might cause height errors in the millimetre range. Investigations of current digital precision levelling systems have shown that these effects must be considered for system calibration. Although the process of system calibration is the main part of this article, the shown effects might be of special interest for practical applications.

Keywords

Digitalnivelliere, systematische Effekte, Ablauf der Systemkalibrierung