Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlatten-prüfungen an der TUM

K. Foppe, P. Wasmeier, Th. Wunderlich

An der TU München wurden in den vergangenen 25 Jahren mehr als 3500 Kalibrierungen von Präzisionsnivellierlatten durchgeführt. Basierend auf dieser Fülle von Daten lassen sich Aussagen über die Qualität und das Langzeitverhalten von Nivellierlatten ableiten.

1 Einführung

Am Geodätischen Prüflabor (Leitung: Dr.-Ing. K. Foppe in Nachfolge †Dr.-Ing. W. Maurer) des Lehrstuhls für Geodäsie (Ordinarius: Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Th. Wunderlich, Emeritus: Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. K. Schnädelbach) der TU München werden nunmehr seit knapp 25 Jahren Nivellierlatten kalibriert. Der erste Vertikalkomparator zur Untersuchung der Latten in ihrer natürlichen Gebrauchsstellung wurde bereits im Jahr 1980 entwickelt; ursprünglich zur Erfassung der Striche mit einem elektro-optischen Mikroskop ausgerüstet und seit Anfang dieses Jahres auf CCD-Technologie umgestellt [Maurer/Schnädelbach 1980 u. 1983]. Im Jahr 1985 erwarb der Lehrstuhl für Geodäsie eine separat gegründete und damit von Gebäudebewegungen entkoppelte und thermisch isolierte Klimakammer mit sieben Metern Länge, in die ein Horizontalkomparator zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten von Längennormalen integriert wurde. Die Klimakammer hat einen Arbeitsbereich von $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$ bis $+50\,^{\circ}\mathrm{C}$ und ermöglicht in Kombination mit dem Vertikalkomparator eine komplette Überprüfung von Nivellierlatten. [Maurer/Rossmeier 1987] Beide Anlagen funktionieren rechnergesteuert und vollkommen automatisch.

Tabellarische Aufzeichnungen der Ergebnisse in elektronischer Form existieren seit August 1991 [Maurer/Schnädelbach 1995]. Seit diesem Zeitpunkt wurden mehr als 3500 Latten geprüft und registriert, wobei die Mehrheit als Neuware vom Hersteller kam und somit eine generelle Aussage über die Qualität moderner Nivellierlatten ermöglicht. Es werden jedoch auch vermehrt Gebrauchslatten rekalibriert, was wiederum Anhaltspunkte für die Langzeitstabilität dieser Qualitätseigenschaften unter zum Teil härtesten Arbeitsbedingungen liefert. Im Einzelnen sind diese umfangreichen Daten nach folgenden Gesichtspunkten näher zu betrachten:

- Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient α
- Mittleres Lattenmeter m_0
- Langzeitverhalten
- Nullpunktfehler
- Einzelstrichverbesserungen
- Periodische Teilungsfehler
- Untersuchung des Lattenfußes
- Schäden
- Ungewöhnliche Lattentypen

2 Der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient α

2.1 Größenordnung

Eine der wichtigsten zu bestimmenden Größen ist der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient der Prüflingslatte. Der DIN 18717 folgend muss dieser für Präzisionslatten im Betrag kleiner als $1 \cdot \mathrm{ppm\ K^{-1}}$ sein. In der Literatur sind jedoch unterschiedlichste Angaben für Invar zu finden, was die Optimierung der Legierung durch die Hersteller wieder spiegelt: Lag der Ausdehnungskoef-

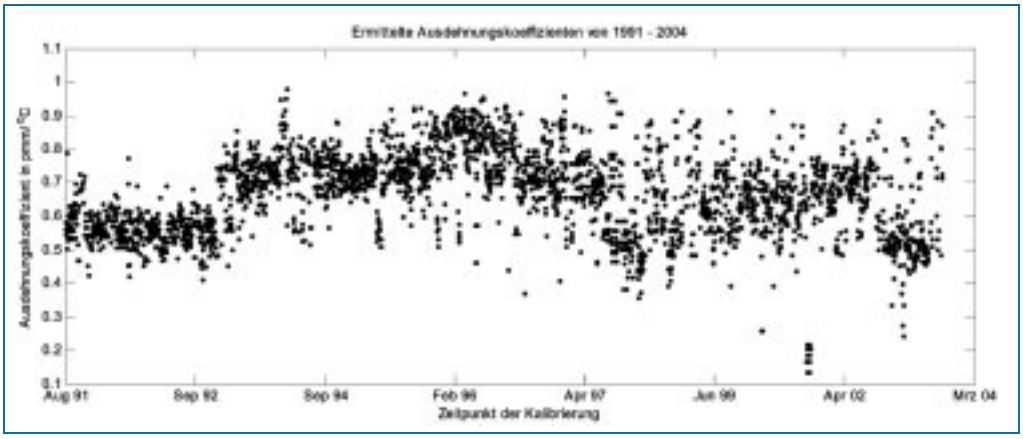

Abb. 1: Übersicht der ermittelten Ausdehnungskoeffizienten von 3097 Präzisionslatten (Gemeinsame Darstellung fabrikneuer und gebrauchter Latten)

fizient vor 20 Jahren noch im Bereich von 1,6 – 2,4 · ppm K^{-1} [Pelzer 1983], so geben die Hersteller von Invarlegierungen den Ausdehnungskoeffizienten heute mit 0,6 – 1,2 · ppm K^{-1} an [www.burde-metall.at 2004]. Unabhängig davon hängt die Ausdehnung einer Nivellierlatte nicht nur vom teilungstragenden Band selbst, sondern auch vom Lattenrahmen, der Spannfeder usw. ab. Am Geodätischen Prüflabor der TU München erfolgt die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten deshalb bei fünf unterschiedlichen Temperaturen zwischen 0 °C und 40 °C in der Abfolge $30° \rightarrow 0° \rightarrow 20° \rightarrow 40° \rightarrow 10°$. Diese großen Temperatursprünge gewährleisten, dass Hystereseeffekte durch Reibung oder Fehlverhalten von Spannmechanismus und Bandbefestigung als solche aufgedeckt und nicht als systematischer Anteil des Ausdehnungskoeffizienten gedeutet werden.

In die Auswertung der Abb. 1 gingen 3097 Präzisionslatten mit Invarband ein, wovon 2808 mit einer Codeteilung versehen waren. Nicht bei allen Prüfaufträgen wird die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten durchgeführt. Nicht erfasst sind ferner Latten mit deutlichen Schäden, die sich auf das Ausdehnungsverhalten auswirken (Knicke, verzogene oder festsitzende Lattenbänder), sowie Latten, deren Bänder aus einem anderen Material als Invar gefertigt sind (z.T. $\alpha > 4$ ppm K^{-1}).

Im Zeitraum bis Ende 1992 liegt α im Mittel zwischen 0,5 und 0,6 · ppm K^{-1}, bis Anfang 1997 liegt der mittlere Wert etwa bei 0,75 · ppm K^{-1}. Seit diesem Datum streuen die Ergebnisse vergleichsweise stark um einen Mittelwert von etwa 0,6 · ppm K^{-1}. Dies liegt hauptsächlich an der Zusammensetzung der Stichprobe: Während in den ersten Jahren fast ausschließlich firmenneue Latten kalibriert worden waren, nahm die Zahl der Gebrauchtlatten seit 1997 kontinuierlich zu. Eine separate Auswertung zeigt, dass deren Resultate erwartungsgemäß unsystematisch im Bereich von 0,4 – 1,0 · ppm K^{-1} variieren, wogegen sich bei Neulatten der Ausdehnungskoeffizient nur langsam in Abhängigkeit des Herstellungsdatums ändert.

Die Gesamtheit der überprüften Latten zeigt einen mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 0,66 · ppm K^{-1} mit einer Standardabweichung von 0,12 · ppm K^{-1}, wobei die Spezifikationen der DIN durchweg erfüllt und die Angaben der Legierungshersteller empirisch bestätigt werden. Für eine rechnerische Korrektur der Messwerte späterer Nivellements ist jedoch nach den Erfahrungen am Geodätischen Prüflabor der TUM die Bestimmung der einzelnen Ausdehnungswerte unabdingbar, da ein Anbringen eines theoretischen Fixwertes dem individuellen Charakter der Einzellatte nicht gerecht werden kann.

2.2 Linearität

Der thermische Ausdehnungskoeffizient verhält sich im Bereich der jeweiligen Anwendungen idealerweise annähernd linear. Für Invar (FeNi36) trifft dies im Bereich bis etwa 50 °C zu.

Eine ideale Kurve für die thermische Ausdehnung einer 2 m-Latte zeigt Abb. 2(b). Abweichungen vom geradlinigen Verlauf sind möglich durch individuelles Verhalten des jeweils verwendeten Legierungsbandes, überlagert durch Effekte, die die Latte ganzheitlich betreffen (vgl. Abb. 2(a)).

Die Abweichungen von der Linearität sind jedoch auch in diesen Fällen minimal (Standardabweichungen 0,05 · ppm K^{-1}), so dass eine weitere Korrektur z.B. mittels eines quadratischen Terms entfallen kann.

3 Das mittlere Lattenmeter m_0

Die nächste wichtige Größe, die auf den Komparatoren des Geodätischen Prüflabors der TU München bestimmt wird, ist das mittlere Lattenmeter m_0. Es ist dies der Maßstab, der an die Ablesungen (Ist-Werte) anzubringen ist, um die verbleibenden Abweichungen zur tatsächlichen Lattenlänge (Soll-Werte) über die gesamte Lattenlänge hin zu minimieren. Dieser Definition folgend erhält eine „zu kurze Latte“ ein negatives (die tatsächlich verwendete Bandlänge ist kürzer als der aufgebrachte Code es fordert); eine „zu lange Latte“ ein positives Lattenmeter.

Das mittlere Lattenmeter m_0 ist in seiner Auswirkung additiv dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten; es beschreibt den Maßstab der Ablesungen bei einer gewählten Bezugstemperatur (meist 20 °C). Im Idealfall streuen die Einzelstrichverbesserungen nur geringfügig um m_0.

Die Ergebnisse der Jahre 1991 – 2004 (Abb. 3) zeigen ein relativ breit gestreutes Spektrum im Bereich von etwa − 15 bis + 15 ppm. Dabei ist zu beachten, dass die Messungen im Vertikalkomparator bis Ende 2003 mit einem elektronischen Mikroskop durchgeführt wurden und somit mit einem größeren Rauschanteil behaftet waren als die seit Ende 2003 mittels CCD-Kamera durchgeführten Messungen. Die Grobstruktur dominiert auch hier wieder die Überzahl der fabrikneuen Latten; ein kleiner Sprung in deren Resultaten im Jahr 1995 wurde durch die Umstellung des Herstellers auf ein verbessertes Meteorologie-Erfassungssystem verursacht.

In die Auswertung aufgenommen wurden 2455 Latten in horizontaler (liegender) und 3363 Latten in vertikaler (Gebrauchs-) Stellung. Der Mittelwert horizontal beträgt

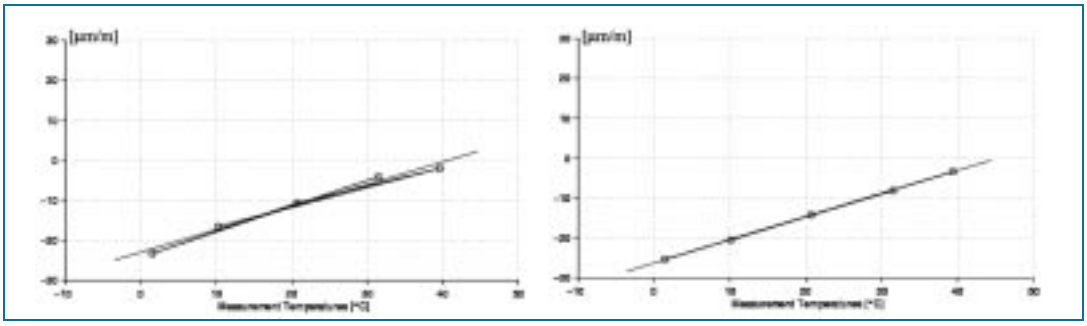

Abb. 2: (a) von der Linearität abweichender Ausdehnungskoeffizient (Snr. 11107) (b) ideal linearer Ausdehnungskoeffizient (Snr. 11105)

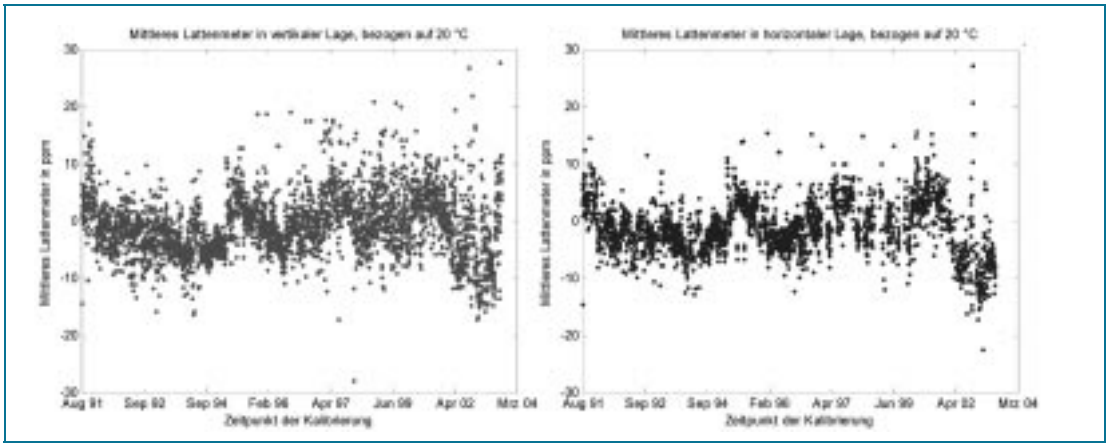

Abb. 3: (a) Mittlere Lattenmeter bezogen auf 20 °C, bestimmt in vertikaler Stellung (b) Mittlere Lattenmeter bezogen auf 20 °C, bestimmt in horizontaler Stellung

− 1,17 ppm und vertikal − 0,80 ppm, allerdings mit einer erheblichen Standardabweichung von 4,7 bzw. 5,4 ppm. Auch dadurch wird wieder deutlich, dass es sich empfiehlt, jede Latte als Unikat zu kalibrieren, um das exakte Lattenmeter zu ermitteln.

Das mittlere Lattenmeter ist ein Produkt des verwendeten Materials und des jeweiligen Herstellungsprozesses. Eine Abhängigkeit von der Länge der Latte (und damit des Lattenbandes) oder der Art des aufgebrachten Codes (Anzahl, Dichte bzw. Dicke der einzelnen Codierungsstriche) kann nicht erkannt werden.

Für die Aussagekraft der Kalibrationsergebnisse von besonderem Interesse ist die Differenz zwischen horizontalem und vertikalem Lattenmeter. Dazu existieren in der Literatur verschiedene Theorien [MAURER/ROSSMEIER 1987] über die Maßstabsänderung, die in erster Linie mit dem Eigengewicht des Teilungsbandes zusammen hängen.

Für 2452 Latten, die sowohl liegend als auch in Gebrauchsstellung untersucht worden sind, wurde die Differenz „horizontal – vertikal“ bestimmt und in Abb. 4(a) aufgetragen. Eine Histogrammdarstellung derselben Daten zeigt Abb. 4(b).

Der Mittelwert liegt hier bei 0,45 ppm mit einer Standardabweichung von $\sigma = 2{,}4$ ppm; Latten in horizontaler Lage sind im Mittel also anscheinend länger als in vertikaler Gebrauchsposition. Dieser Sachverhalt scheint der gängigen Meinung zu widersprechen, dass sich das Lattenband durch sein Eigengewicht in Gebrauchsstellung ausdehnen und damit sein Maßstab zunehmen müsste. Herr Dr. Thomas Fischer, Firma Nedo/Dornstetten, findet folgende Erklärung für diesen Effekt:

Das Invarband ist unten fest eingehängt und oben am Lattenkopf an einer Feder befestigt. Diese Kombination kann als Doppelfedersystem (Abb. 5) betrachtet werden. Die Federkonstanten sind bekannt:

$$\textit{Spannfelder}: \; c_1 \approx 2{,}7\,\frac{N}{mm} \;\; (\textit{Datenblatt})$$

$$\textit{Invarband}: \; c_2 \approx 1000{,}0\,\frac{N}{mm} \;\; (\textit{gemessen})$$

In horizontaler Lage herrscht ein Kräftegleichgewicht $F_1 = F_2$ zwischen der Feder $F_1 = c_1 \cdot s_1$ und dem Invarband $F_2 = c_2 \cdot s_2$.

Bei vertikaler Stellung der Latte wirkt zusätzlich die Gewichtskraft des Bandes F_G, so dass $F_1' = F_2' + F_G$ gilt. Mit $F_1' = c_1 \cdot s_1'$ und $F_2' = c_2 \cdot s_2'$ erhält man als Zwischenergebnis $c_1 \cdot s_1' = c_2 \cdot s_2' + F_G$, was zusammen mit den Strecken $s_1' = s_1 + s_x$ bzw. $s_2' = s_2 - s_x$ zu der Gleichung

$$s_x = \frac{F_G - c_1 \cdot s_1 + c_2 \cdot s_2}{c_1 + c_2} \textit{bzw.}\; s_x = \frac{F_G - F_1 + F_2}{c_1 + c_2} \textit{führt.}$$

Da $F_1 = F_2$ findet man so die Gleichung für die Verkürzung in Vertikallage

$$s_x = \frac{F_G}{c_1 + c_2}.$$

Das 3 m-Invarband hat ein Gewicht von ca. 0,369 kg. Dies entspricht einer Gewichtskraft von 3,69 N, so dass sich für eine 3 m-Latte eine Verkürzung in Vertikallage von

$$s_x = \frac{3{,}69N}{2{,}7\,\frac{N}{mm} + 1000{,}0\,\frac{N}{mm}} = 3{,}7\mu m$$

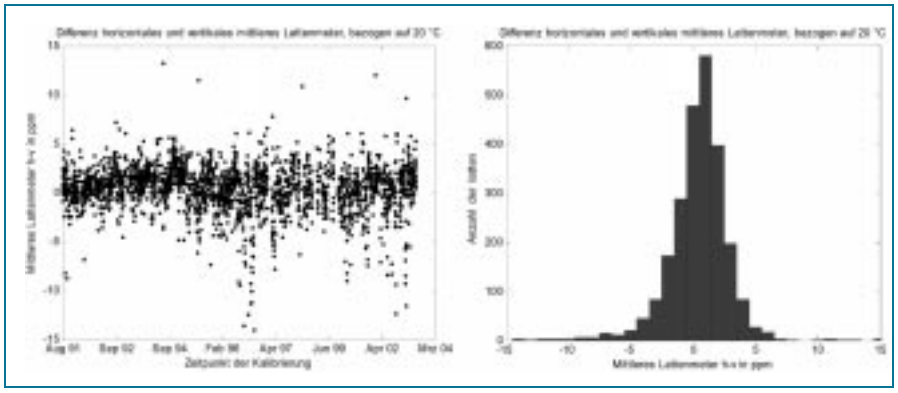

Abb. 4: (a) Differenz von horizontalem und vertikalem Lattenmeter, bezogen auf 20 °C (b) Histogramm von (a)

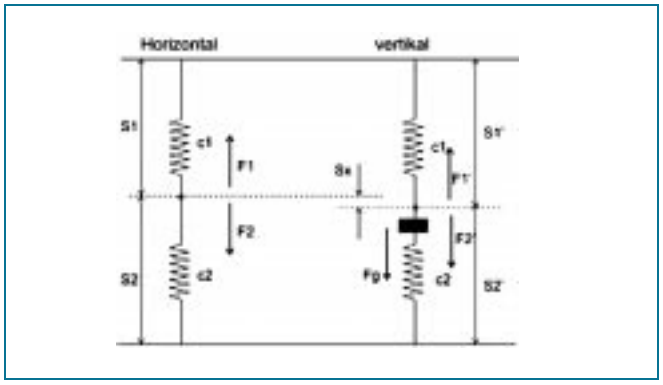

Abb. 5: Doppelfedersystem

ergibt, was einem Maßstabseffekt von ca. − 1,2 ppm entspricht, also für die Differenz „horizontal – vertikal“ + 1,2 ppm bedeutet.
Die schon aus den Messungen bekannte Tendenz hin zu einem positiven Wert von „h-v“ ist mit 0,45 ppm zwar nicht signifikant (Testgröße 0,19 bei einem Quantil $t_{f,1-\alpha/2} = 1{,}96$ mit $\alpha = 0{,}05$), bestätigt jedoch die theoretischen Überlegungen. Daher und auf Grund der teilweise deutlichen Unterschiede der Resultate, die auch in den im Rahmen des Ringversuch 2003 gewonnenen Daten der beteiligten Labors deutlich werden, ist eine Kalibrierung in Gebrauchsstellung derjenigen in liegender Position vorzuziehen.

4 Langzeitverhalten

Im 13jährigen Zeitraum der Kalibrationsaufzeichnungen sind einige Latten wiederholt überprüft worden. Es handelt sich dabei durchweg um Latten, die zum Teil unter extremen Bedingungen im ständigen Gebrauch sind. Interessant ist bei solchen Mehrfachkalibrierungen, ob die einzelnen Latten einen Trend hinsichtlich des mittleren Lattenmeters aufweisen, oder ob dieser unsystematisch streut.
Untersuchungen an 28 Latten unterschiedlicher Typen, die im Zeitraum von 10 Jahren regelmäßig kompariert wurden, weisen in 3 Fällen ein signifikantes Abnehmen des Lattenmeters auf, in 9 Fällen einen positiven Trend (z.B. Abb. 6(a)) und in den restlichen 16 Fällen kein signifikantes Verhalten (z.B. Abb. 6(b)).

Die Größenordnung bei trendbehafteten Latten liegt im Schnitt bei ca. 1 ppm/Jahr.
Auch hier überlagern sich wieder Alterungseffekte der verwendeten Materialien (fortschreitende Entspannung des Teilungsbandes durch thermische und mechanische Beanspruchung) sowie der mechanischen Befestigungen mit anderen, temporären Gebrauchsauswirkungen (Schmutz zwischen Lattenband und -körper, Transport und Aufbewahrung der Latten etc.).
Sichtbare Alterungseffekte sind in der Regel klein genug, um auch für einen längeren Zeitraum eine spezifikationsgemäße Verwendung laut Hersteller- bzw. DIN-Vorgaben nicht einzuschränken.

5 Nullpunktfehler

Der Lattennullpunktfehler wird auf dem Vertikalkomparator des Geodätischen Prüflabors seit August 1997 bestimmt. Verwendet wird dazu eine Platte mit Referenzstrichen, deren Abstände zum Aufsatzpunkt der Latte hochgenau bekannt und konstant sind. Die Bestimmung des Nullpunktfehlers geschieht im Rahmen einer Kalibrierung automatisch, ist jedoch abhängig von der Messung des jeweiligen Bezugsstrichs auf der Latte. Ist der Bezugsstrich beschädigt, kann kein Nullpunktfehler im Sinne der DIN 18717 bestimmt werden. Nach DIN 18717 darf der Nullpunktfehler nicht größer als 50 µm sein.
Betrachtet man jedoch die aus über 900 Messungen gewonnenen Werte der an der TU München komparierten Latten, so befinden sich einige im Grenzbereich dieser Forderung bzw. erfüllen diese nicht mehr (Abb. 7). In diesen Fällen handelt es sich um Gebrauchslatten, für die eine Nachjustierung des Lattenbandes einzufordern ist.

6 Einzelstrichverbesserungen

Die Abweichung des Referenzstrichs (bzw. der Referenzstrichkante), über welchen der Bezug zwischen Lattenteilung und Lattenfuß realisiert wird, von der Sollposition findet sich in voller Größe im Nullpunktfehler wieder. Das mittlere Lattenmeter zur Bezugstemperatur und der thermische Ausdehnungskoeffizient für eine eventuelle Abweichung von dieser sind also so anzubringen, dass sie an der Stelle des Referenzstrichs keinen Beitrag lie-

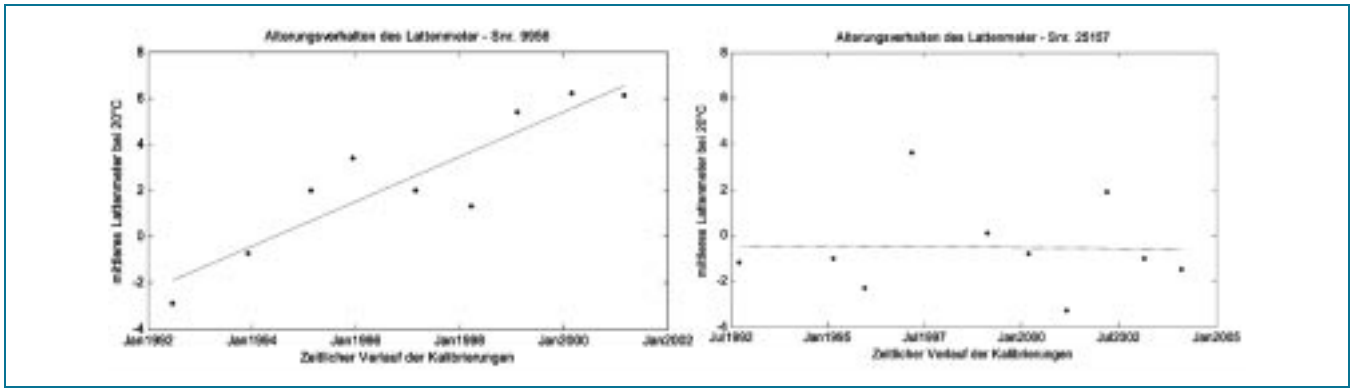

Abb. 6: (a) Latte mit deutlichem Alterungsverhalten im Lattenmeter von + 1,2 ppm/Jahr (b) Latte ohne signifikantes Alterungsverhalten

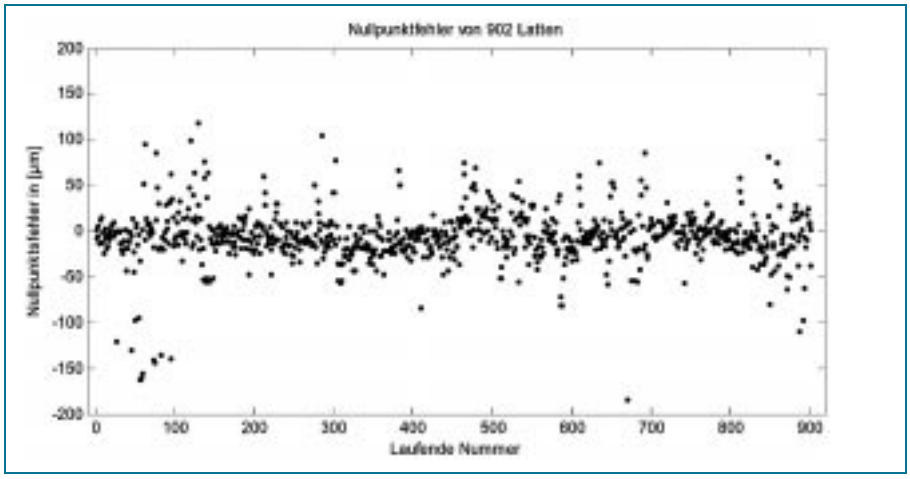

Abb. 7: Nullpunktfehler in [µm] von 902 Nivellierlatten seit August 1997

fern. Damit wird ein linearer Korrekturterm für alle anderen Striche der Latte definiert, die verbleibenden Abweichungen der Sollposition von der korrigierten Istposition für jeden weiteren Strich nennt man die Einzelstrichverbesserungen der Latte.
Bedingt durch das Wesen des mittleren Lattenmeters als Regressionsgerade durch die einzelnen Abweichungen sind die verbleibenden Einzelstrichverbesserungen in ihrer Quadratsumme minimal.
Für besondere Genauigkeitsanforderungen im Bereich des analogen Nivellements kann das Anbringen der Einzelstrichverbesserungen berücksichtigt werden, wenn die entsprechenden Abweichungen der jeweils verwendeten Latten die Größenordnungen der Ablesegenauigkeiten mit Planplatte oder Aufsatzkeil berühren.
Bei Verwendung digitaler Nivelliere mit Codelatten ist eine Angabe von Einzelstrichverbesserungen für die Codestriche zwar prinzipiell genauso möglich, hat aber wegen der interpolierenden Bestimmung des letztlichen Höhenwerts durch das Digitalnivellier aus einem Lattenabschnitt, dessen Größe von der Zielweite abhängig ist, für die praktische Anwendung keine Bedeutung [HEISTER ET.AL. 2004]. In diesem Fall können die Verbesserung lediglich zur Überprüfung der allgemeinen Teilungsqualität und des Lattenzustands dienen.

7 Periodische Teilungsfehler

Ältere Nivellierlatten wurden mit Schablonen unterschiedlicher Länge im Gravurverfahren (Abb. 8(a) mit 1m-Schablone) oder im Farbspritzverfahren (Abb. 8(b) mit 50 cm-Schablone) hergestellt. Eventuelle Abweichungen der Schablonen von der Solllage sind deshalb in den Teilungsbildern dieser Latten periodisch wiederkehrend und konnten mit den vorhandenen Komparatoren deutlich aufgedeckt werden. Bei periodischen Abweichungen dieser Natur besitzt das Anbringen eines mittleren Lattenmeters nur geringes Verbesserungspotential, hier ist verstärkt auf die Einzelstrichverbesserungen zu achten.
Seit 1980/81 werden die Codierungsstriche mittels eines interferometrisch gesteuerten Lasers auf das Lattenband in voller Länge aufgebrannt, so dass diese Systematiken nicht mehr auftreten.

8 Untersuchung des Lattenfußes

Neben den Erkenntnissen über die Lattenteilung selbst, die aus den Komparatormessungen gewonnen werden können, sollen zusätzliche Untersuchungen das Angebot des Geodätischen Prüflabors der TU München abrunden. Von besonderem Interesse sind die Rechtwinkligkeit des Lattenfußes bezüglich der Teilungsachse und deren Ebenheit. Abweichungen werden als Aufsetzflächenfehler bezeichnet.
Nach [DEUMLICH/STAIGER 2002] muss bei einer Abweichung von mehr als 0,15 mm zwischen zwei beliebigen Punkten der Aufsetzfläche bezüglich einer ebenen Referenzfläche fehlende Planarität oder Rechtwinkligkeit angenommen werden. DIN 18717 gibt als erlaubtes Grenzmaß eine Neigung von 5′ vor, was über die maximale Tiefe des Lattenfußes einer Abweichung von 50 µm entspricht („nach vorne-“ oder „nach hinten-Kippen“).

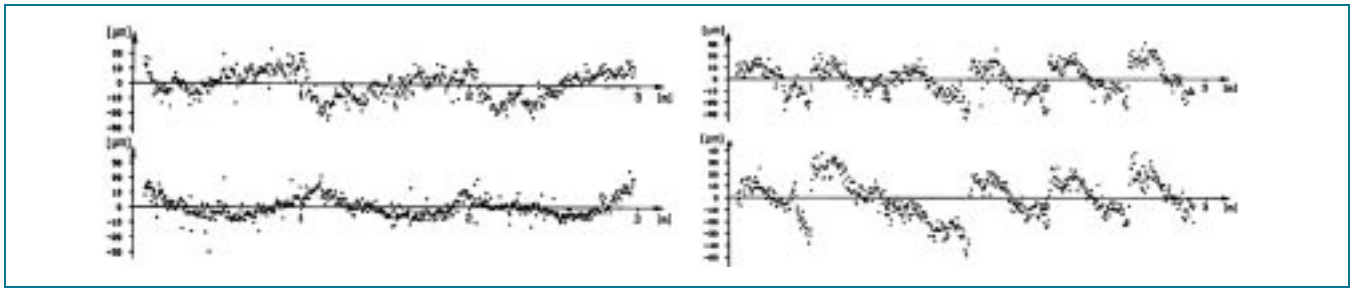

Abb. 8: (a) Strichverbesserungen einer Strichteilung im früheren Gravurverfahren der Firma Kern (b) Strichverbesserungen einer Strichteilung im früheren Farbspritzverfahren der Firma Nedo (bis ca. 1980)

Abb. 9: Mikrometer-Messuhren zur Bestimmung des Aufsetzflächenfehlers

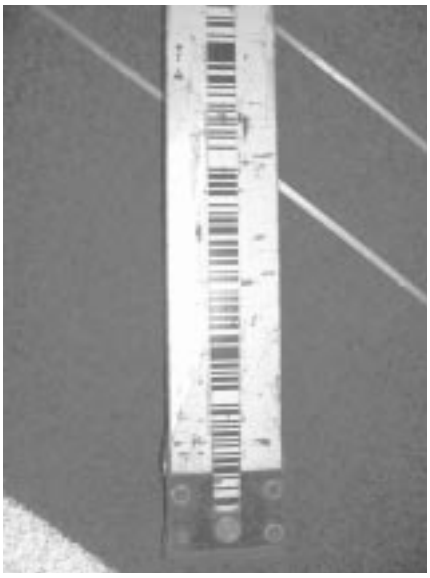

Abb. 10: Stark beanspruchte Latte aus einem Kraftwerk in Slowenien

Das Geodätische Prüflabor am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München bietet die Überprüfung der Aufsetzfläche seit März 2004 an. Dabei werden die Prüflingslatten an sechs definierten Stellen des Lattenfußes mit einer vom Hersteller mit besonderer Sorgfalt angefertigten und zertifizierten Referenzlatte verglichen (Abb. 9).
Erste Untersuchungen an den institutseigenen Latten und einer Charge von Gebrauchslatten aus der Industrie haben aufgezeigt, dass in den engen Grenzen der DIN 18717 eine Bestimmung und Berücksichtigung der Lattenfußneigung notwendig ist. Darüber soll jedoch weiter berichtet werden, wenn die Stichprobe der untersuchten Latten angewachsen ist.

9 Schäden

Ein wesentliches Merkmal eines guten Nivellierlattenkomparators ist die Robustheit der Ergebnisse, auch wenn die untersuchten Latten deutliche Gebrauchsspuren aufweisen. Neben den zu zertifizierenden fabrikneuen Latten sind es ja genau diese, die einer Überprüfung bedürfen (z.B. Abb. 10).
Im Laufe der Jahre sind etliche stark beanspruchte und zum Teil beschädigte Latten an der TU München kompariert worden, die hinsichtlich der Ergebnisse gewisse Besonderheiten aufweisen.
Eine Übersicht über die wichtigsten Schäden und ihre Auswirkungen gibt die folgende Tabelle:

Schaden	Auswirkung auf die Latte	Auswirkung auf die Kalibrationsergebnisse
Delle im Lattenkörper	Lattenband verläuft nicht mehr freigängig und geradlinig	– sprunghafte Änderung des Lattenmaßstabs nach der Beschädigung – Regression der Strichverbesserungen ist nicht mehr linear
(partielles) Festbacken des Lattenbandes am Lattenkörper	Lattenband verläuft nicht mehr freigängig, Spannmechanismus versagt	– Ausdehnungskoeffizient anscheinend nicht mehr linear – Verfälschung der Strichverbesserungen
Lattenband unzureichend gespannt	Lattenband wellt sich	– Lattenmeter auch über kurze Zeiträume nicht konstant – lokale Verfälschungen der Einzelstrichverbesserungen
Farbabplatzer an den Teilungsstrichen, Kratzer [vgl. Abb. 11a]	Strichkanten sind unterbrochen	– unmögliche oder unsichere Angabe einer Einzelstrichverbesserung – Auswirkungen auf das Lattenmeter
Verwischungen der aufgebrachten Teilung (vgl. Abb. 11b)	Strichkanten erscheinen unscharf	– unmögliche oder unsichere Angabe einer Einzelstrichverbesserung – Auswirkungen auf das Lattenmeter
Korrodierte oder beschädigte Aufsatzfläche	Aufsatzfläche nicht mehr eben bzw. rechtwinklig zur Teilungsachse	– unsichere Angabe des Nullpunktfehlers

Da beschädigte Striche nicht nur unsichere Einzelstrichverbesserungen zur Folge haben, sondern sich unmittelbar auf das mittlere Lattenmeter auswirken, ist für ein zuverlässiges Ergebnis eine robuste Stricherfassung dringend notwendig. Die Erfahrung zeigt, dass die bisherige Erfassung von Strichen mittels eines nur in einer Spalte arbeitenden Diodenmikroskops bei ausgefransten Kanten (vgl. Abb. 11(a)) konstruktionsbedingt Mängel aufweist, da die jeweils verwendete Spalte u.U. nicht repräsentativ für den Verlauf der gesamten Kante ist. Dies wird in jüngster Zeit in verschiedenen Labors durch die Umstellung auf CCD-Flächensensoren behoben, so dass solche Kantenbilder in der Auswertung durch ihre Regressionskurven ersetzt werden können.
Bei zu starken Beschädigungen ist es jedoch sinnvoller, die entsprechenden Einzelstriche vollständig aus der Berechnung von Lattenmeter und Ausdehnungskoeffizient zu eliminieren.

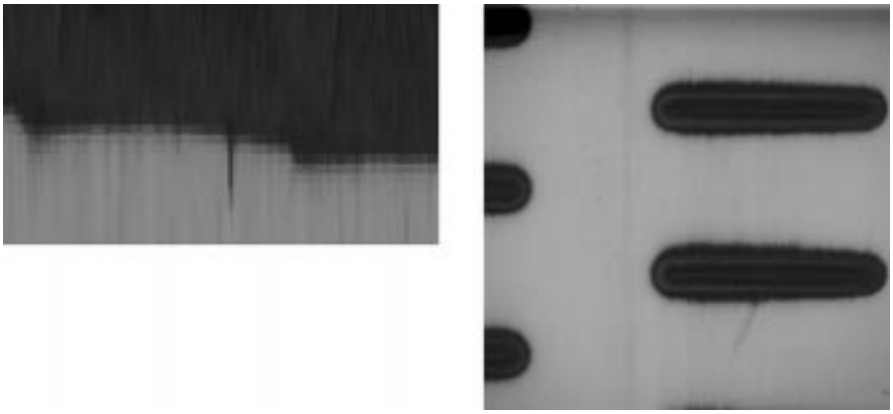

Abb. 11: (a) Ausgefranste Strichkante mit Resultat des Kantenfilters (b) Verwischte Teilungsstriche. Die Originalbreite ist als heller Umriss zu erkennen

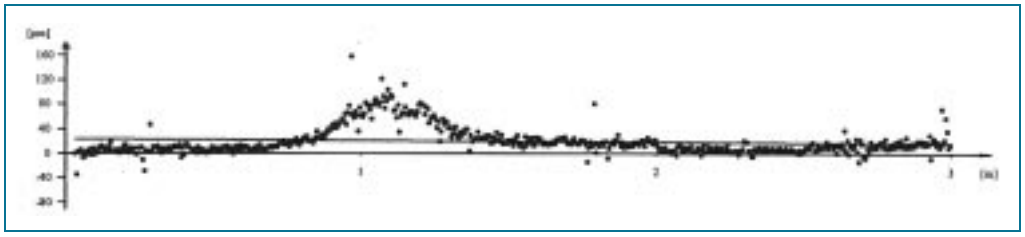

Abb. 12: Strichverbesserungen einer Latte mit verwischten Teilungsstrichen (Snr. Kern 0036)

Die Auswirkungen der verwischten Teilstriche im Bereich der Griffe von Abb. 11(b) auf die Einzelstrichverbesserungen zeigt Abb. 12. Deutlich zu erkennen ist die Störung der ansonsten homogen verlaufenden Strichverbesserungen in einer Größenordnung von bis zu 160 μm und die daraus resultierende Verschiebung des mittleren Lattenmeters.

10 Ungewöhnliche Lattentypen

In der DIN 18717 ist geregelt, welche Teilungsbilder und welche Lattenlängen (3 m und 2 m) für eine Präzisionslatte zugelassen sind. Abweichend davon gibt es jedoch Sonderanfertigungen vor allem in der gewünschten Lattenlänge; am häufigsten sind dabei 1 m-Latten zu finden. Geprüft wurden auf den Komparatoren des Geodätischen Prüflabors jedoch auch schon Nivellierlatten von lediglich 30 cm Länge, die als Schulungslatten für die Ausbildung eingesetzt werden.
Prinzipiell ist eine Auswertung mit beliebiger Lattenlänge möglich, allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit der sinkenden Anzahl von verwertbaren Strichen die Standardabweichungen der Ergebnisse deutlich zunehmen (vgl. dazu auch folgende Tabelle).

Lattenlänge	Standardabweichung des Lattenmeter
3 m	0,5 – 1,0 ppm
2 m	1,0 – 2,0 ppm
1 m	4,0 – 6,5 ppm
< 1 m	> 6,0 ppm

Vereinzelt noch vorkommende ungewöhnliche Teilungsbilder (z.B. Keilstriche) sind hingegen wesentlich schwieriger zu bearbeiten, da dafür nicht selten der automatisierte Messablauf abgeändert werden muss.

11 Die nächsten 3000 Nivellierlatten . . .

Mit Aufkommen der neuen CCD-Technologie für hoch auflösende Flächensensoren begannen in den 90er Jahren die Arbeiten zur Umstellung des Komparators von der Stricherfassung mittels Diodenmikroskops auf ein digitales Kamerasystem. Die Forschungsarbeiten waren Gegenstand einer Dissertation [Friede 2000] und führten auch zum Bau des Vertikalkomparators in Neubrandenburg durch den Lehrstuhl für Geodäsie der TU München im Jahre 2003. Die Arbeiten am Vertikalkomparator in München wurden forciert durch die sich allmählich abzeichnenden Alterungseffekte des Diodenmikroskops („Schlemmer-Mikroskop“) des damaligen Komparators, die auch im Rahmen des Ringversuchs Ende Juli 2003 für deutliche Streuungen der Residuen verantwortlich waren. Zusätzlich wurden ein moderner digital gesteuerter Antrieb und eine präzise Erfassung der Meteorologie in das automatisierte Messsystem integriert. Alle verwendeten Komponenten werden auf internationale Normale (Standards) rückgeführt.
Seit Anfang 2004 ist der erneuerte Komparator im Geodätischen Prüflabor der TU München im Einsatz. Die ersten mit dem neuen System gemessenen Chargen weisen eine deutlich reduzierte Streuung bei einem bisher nicht erreichten Auflösungsvermögen auf, so dass eine qualitative Steigerung der Ergebnisaussagen für die nächsten 3000 Nivellierlatten in den kommenden Jahren erreicht werden wird.

Literatur

[1] Deumlich, F.; Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, Wichmann Verlag, Heidelberg 2002
[2] DIN 18703 (1996-11): Deutsche Norm „Nivellierlatten“, November 1996
[3] DIN 18717 (1996-11): Deutsche Norm „Präzisionsnivellierlatten“, November 1996
[4] Fischer, Th. (2004): Persönliche Mitteilungen

[5] Friede, O. (2000): Ein hybrides Meßsystem zur Kalibrierung von Strichteilungen, DGK Reihe C, Band 521, München 2000
[6] Heister, H.; Woschitz, H.,; Brunner, F. (2005): Invar-Code-Latten, Komponentenoder Systemkalibrierung? In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 6, 2005
[7] Maurer, W.; Schnädelbach, K. (1980): Kalibrierung geodätischer Präzisionsmessinstrumente mit dem Laser-Interferometer HP 5526A. In Conzett/Matthias/Schmid [Hrsg]: Ingenieurvermessung 80, Dümmler, Bonn 1980, pp. A12 – A12/10
[8] Maurer, W.; Schnädelbach, K. (1983): First experiences with a vertical comparator for the calibration of invar rods. In Pelzer/Niemer [Hrsg]: Precise Levelling, Dümmler, Bonn 1983, pp. 155 – 163
[9] Maurer, W.; Rossmeier, F. (1987): Zur Kalibrierung von Invarbandlatten – Maßstabsverhalten, Einfluß und Berücksichtigung bei Nivellements. In Determination of Heights and Height Changes, Dümmler, Bonn 1987
[10] Maurer, W.; Schnädelbach, K. (1995): Laserinterferometry – Ten Years experience in calibrating invar levelling staffs. In Kogoj, D. [Hrsg]: 1st International Symposium of Laser technique in Geodesy and Mine Surveying, Universtiy of Ljubljana 1995, pp. 1 – 8
[11] Maurer, W. (2000): Tutorial „Kalibrierung von Nivellierlatten“ zum Ingenieurmesskurs 2000, Tagungsmaterialien, München 2000
[12] Pelzer, H. (1983): Systematic Instrumental errors in Precise Levelling In Pelzer/Niemer [Hrsg]: Precise Levelling, Dümmler, Bonn 1983, pp. 3 – 17
[13] www.burde-metall.de Informationen über den Ausdehnungskoeffizienten von Invar36 und dessen Verhalten im Bereich bis 50 °C

In Memoriam Dr.-Ing. W. Maurer († 7. August 2002)

Diese Veröffentlichung ist Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Maurer gewidmet, durch dessen unermüdliches Schaffen die beschriebenen Arbeiten erst möglich wurden.
Der Lehrstuhl für Geodäsie der TUM beklagt den ebenso unerwarteten wie tragischen Tod von Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Maurer am 7. August 2002. Herr Dr. Maurer stand im 54. Lebensjahr kurz vor seinem dreißigjährigen Dienstjubiläum, einer Wirkungsspanne, in welcher er vor allem als hochengagierter Leiter des Geodätischen Prüflabors ungeteilte Anerkennung im In- und Ausland fand.

Von Beginn an experimentell orientiert, hat er sich insbesondere auf den Gebieten des Komparatorbaus, der Kalibrierung von Instrumenten und Etalons, aber auch bei der Entwicklung spezieller Messverfahren für die präzise Distanzmessung einen Namen gemacht. Den hohen Kompetenzen entsprechend, war er stetes Ziel von Abwerbungsversuchen führender Hersteller geodätischer Messinstrumente wie auch ingenieurgeodätisch ausgerichteter Institute an deutschen Universitäten. Jeder daraus folgende Karrieresprung Dr. Maurers war als Vereitelung solcher Unterfangen ein Erfolg Bayerns, seine Spitzenleistungen für die TUM zu erhalten. Er selbst wollte ohnehin immer seiner Heimat Bayern die Treue halten. Davon haben nebenher unterschiedlichste Stellen unserer Universität – in Form schneller, kompetenter Hilfestellung bei schwierigen Messaufgaben – laufend Nutzen ziehen dürfen, zuletzt durch die von Herrn Dr. Maurer geleitete, hochpräzise Einrichtung der Strahlrohre des neuen Forschungsreaktors München II am TUM-Standort Garching.
Als Akademischer Direktor hat Herr Dr. Maurer gleichzeitig über viele Jahre hinweg sorgsamst das Rechnungswesen des Lehrstuhls geführt und seine Überzeugungen in die verschieden Fachgremien der akademischen Selbstverwaltung eingebracht. Faktisch hat ihn jeder im Fachbereich und in der Verwaltung gekannt und geschätzt; niemand jedoch weiß, wie er zu ersetzen wäre. Unsere innigste Anteilnahme gilt seiner geliebten Familie, die – bei höchstem dienstlichem und wissenschaftlichem Einsatz Dr. Maurers – doch stets sein Wichtigstes blieb.

Anschrift der Autoren:
Dr.-Ing. K. Foppe, Dipl.-Ing. P. Wasmeier,
Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Th. Wunderlich,
Lehrstuhl für Geodäsie, Arcisstraße 21,
D-80290 München karl.foppe@bv.tum.de,
peter.wasmeier@bv.tum.de,
thomas.wunderlich@bv.tum.de

Kurzfassung

Am Geodätischen Prüflabor der TU München wurden in den zurückliegenden 25 Jahren mehr als 3500 Kalibrierungen von Präzisionsnivellierlatten durchgeführt. Basierend auf der dabei entstandenen Datenbank, die in Art und Umfang einzig in ihrer Art ist, lassen sich Aussagen über die Qualität sowie das Langzeitverhalten von Präzisionsnivellierlatten treffen.

Abstract

In the last 25 years more than 3500 calibrations of precise levelling staffs were carried out at the Geodetic Laboratory of the TU Munich. The resultant database is unique and allows to make statements about the quality and the long time behaviour of precise levelling staffs.