

Matthias Fuhrland; Argus GeoTech GmbH

Jan Schmidt, Ronny Werschnitzky; Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut

Die leuchtende Nivellierlatte mit Maßstabskorrektur

1 Problemstellung

Das geometrische Nivellement unterliegt neben den bekannten, die Genauigkeit betreffenden, Einsatzkriterien einer wesentlichen Einschränkung. Beim Einsatz unter geringer oder fehlender Beleuchtung ist die Messung weder visuell noch automatisiert möglich. Das heißt, im Tunnelbau, in schlecht beleuchteten Innenräumen oder bei Nacht kann bislang gar nicht oder nur durch erhöhten Aufwand nivelliert werden. Da das Problem nicht neu ist, existieren bereits Systeme zur Beleuchtung von Nivellierlatte. Die Firma Solexperts nutzte zur Bauwerksüberwachung ein DiNi mit aufgesetztem Halogenscheinwerfer. Allerdings strahlt ein Scheinwerfer auch stark Wärme ab und die Reichweite ist begrenzt (KEPPLER et al., 1996). Konstruktive Ansätze zur Verwendung eines Nivelliers mit Blitzlicht oder integriertem Scheinwerfer wurden von den Herstellern verworfen. Stattdessen gibt es mehrere Systeme, die Licht direkt an der Latte erzeugen. Die von Zeiss und Leica Geosystems entwickelten Systeme arbeiten mit einer Lampe, die den Lattenkörper mit der Strichteilung im Auflicht über einen begrenzten Lattenbereich (z.B. 0,5 m) beleuchtet. Das an der Latte reflektierte Licht wird für die Ablesung verwendet. Dieses System hat neben der räumlichen Einschränkung des beleuchteten Bereiches den Nachteil, dass die Beleuchtungseinheit von außen an die Latte angeklemt wird. Da die Lichtausbeute im Auflicht nicht so gut ist, werden auch Halogenscheinwerfer verwendet. Für Präzisionsnivellements mit automatischen Nivellier-Instrumenten kommt es durch die ungleichmäßige Beleuchtung zu fehlerhaften Messungen (RYF, 2004). Der Einfluss der Wärme kann sogar bei Verwendung von Invarlatte Probleme bereiten, da die Wärme ausgerechnet in Höhe des Zielstrahles entsteht und deshalb Luftflimmern bzw. Refraktion in Lattenhöhe bewirkt. Ein System der schweizer Firma Riesen und Stettler AG benutzt eine Kette von LEDs, die am Lattenkörper befestigt wird. Dieses System hat den Vorteil, dass die LED-Ketten fertig konfektioniert im Handel erhältlich und preiswert sind. Doch auch hier kommt es zu inhomogener Beleuchtung.

Die Firma Nedo GmbH entwickelte mit der „LumiScale“ eine selbstleuchtende Nivellierlatte, die mittels einer elektrolumineszierenden Folie als Beleuchtung und einer Kunststofffolie als Codeträger realisiert wird. Die „LumiScale“ bringt zwar schon die gewünschte Funktionalität, da aber die thermische Ausdehnung des Codeträgers nicht berücksichtigt wird, können mit der Latte nur dann hohe Genauigkeiten erzielt werden, wenn der gemessene Höhenunterschied sehr klein ist oder aber die Außentemperatur der Eichtemperatur der Latte entspricht (Maßstab = 1). Parallel dazu wurde am Geodätischen Institut der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der Argus GeoTech GmbH eine leuchtende Nivellierlatte mit einer Länge von 1,50 m entwickelt, kalibriert und getestet (FUHRLAND, 2006). Als Beleuchtung dienten hier elektrolumineszierende Leuchtschnüre und als Codeträger eine bedruckte Plexiglasplatte. Im Unterschied zur „LumiScale“ wurde die thermische Ausdehnung des Codeträgers bei der Messung erfasst und rechnerisch berücksichtigt. Eine Kombination beider Prinzipien wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (WERSCHNITZKY, 2007) untersucht und soll nachfolgend vorgestellt werden.

2 Der Prototyp

Für die Fertigung der 2,20 m langen Leuchtlatte LumiScale wurde von der Firma Nedo GmbH ein für digitale Strichcodelatten üblicher Lattenkörper aus Aluminium verwendet (Abb. 1). Auf dieses Grundgestell wurden zwei Aluminiumprofile genietet. Die Teile aus Aluminium sind mit einer gelben Pulverbeschichtung versehen und ermöglichen eine gute Erkennbarkeit der Nivellierlatte. Die Leuchtlatte ist 7 cm breit und 6 cm tief (inklusive Akku). Der Ausschnitt zur Ablesung am Teilungsträger ist 25 mm breit. In der Führungsnut befinden sich die Lumineszenzfolie und darüber ein Foliensystem aus mehreren Einzellagen, welches auch den Strichcodestreifen enthält. Der Strichcodestreifen wurde durch ein Reprverfahren hergestellt, welches im Gegensatz zum Siebdruck eine sehr hohe Kantenschärfe und sehr gute Schwärzung der dunklen Code-Elemente liefert. Eine leichte Biegung des Foliensystems in Querrichtung verhindert Faltenwurf in Längsrichtung bei thermischer Ausdehnung. Die Lumineszenzfolie gewährleistet eine homogene Durchleuchtung des gesamten Codestreifens. Sie arbeitet nach dem Prinzip der Elektrolumineszenz und besitzt nur eine geringe Wärmeentwicklung. Man spricht deshalb auch von einer so genannten Kaltlichtquelle.

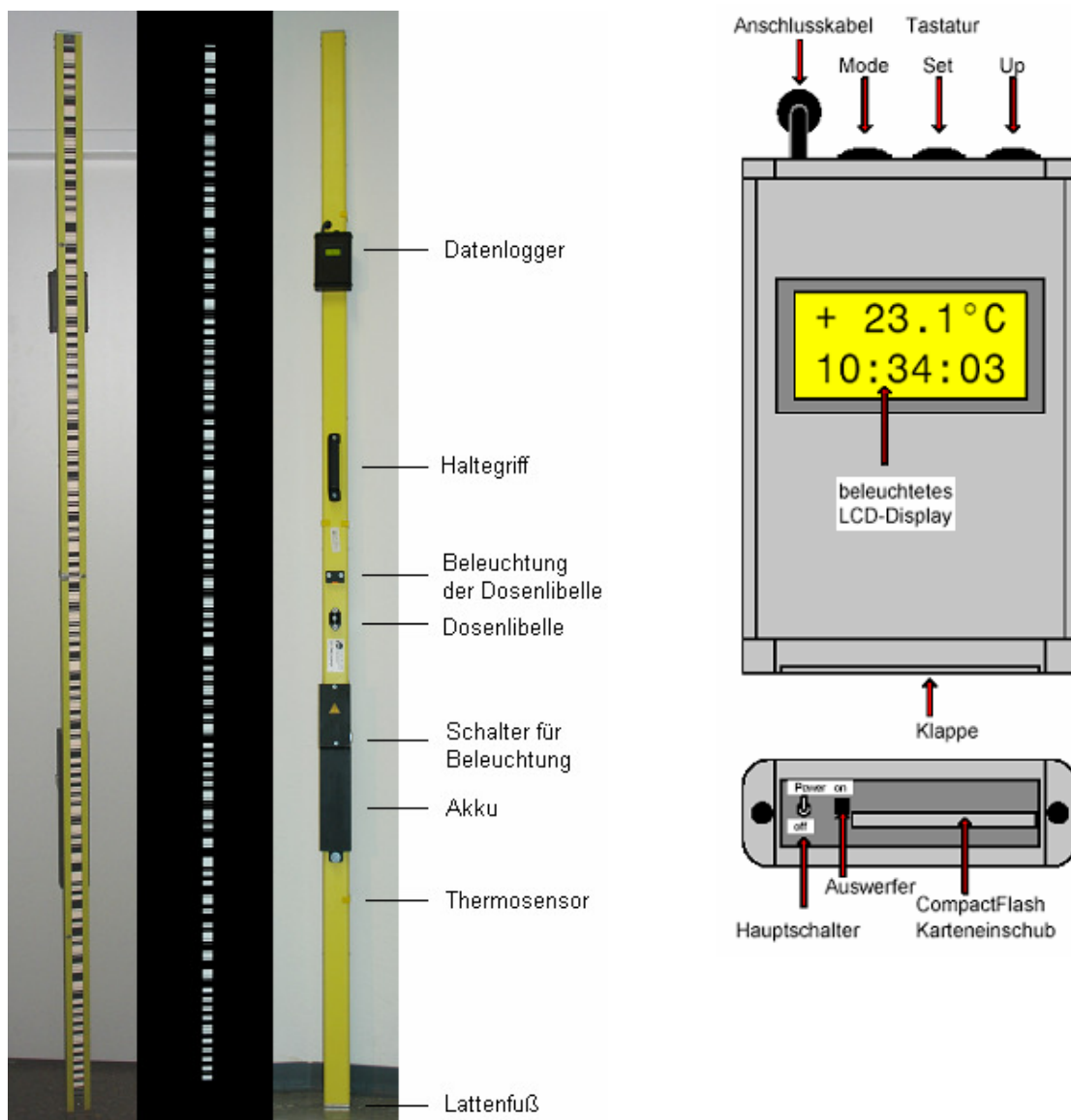


Abbildung 1: Prototyp der Latte und des Datenloggers

Direkt auf der obersten Folienschicht liegen die Thermosensoren auf. Die optimale Wärmeübertragung zwischen Folie und Sensoroberfläche wird durch Wärmeleitpaste gewährleistet. Von jedem Sensor geht im Inneren des hohlen Lattenkörpers ein Kabel zum Datenlogger. Dieser befindet sich auf der Rückseite der Latte. An der unteren Schmalseite des Datenloggers befindet sich eine Klappe, die als Staub- und Spritzwasserschutz für den Hauptschalter sowie den Einschub für eine CompactFlash-Karte dient. An der oberen Schmalseite befinden sich drei Tasten, mit denen alle Funktionen des Messgerätes gesteuert werden. An der breiten Gehäuseseite befindet sich ein zweizeiliges, beleuchtetes LCD-Display. Hier können die erforderlichen Einstellungen kontrolliert und gemessene Temperaturwerte direkt abgelesen werden. Bei Bedarf kann so die Lattentemperatur auch manuell als Punktinformation im Nivellier eingegeben werden.

Zum Aufstellen der LumiScale dienen ein rückseitig angebrachter Haltegriff aus Hartplaste und eine Dosenlibelle. Wird die Lumineszenzbeleuchtung aktiviert, so wird die Dosenlibelle gleichzeitig mit fünf darüber installierten LEDs beleuchtet. Der Akkumulator ist im unteren Drittel der Nivellierlatte angebracht. Dabei handelt es sich um einen abnehmbaren NiMH-Akku mit einer Speicherleistung von 2500 mAh, was bei Zimmertemperatur eine Betriebsdauer bei angeschalteter Beleuchtung von mindestens 7 Stunden ermöglicht. Das Aufladen des Akkus geschieht mit dem dazugehörigen Ladegerät. In Abbildung 1 sind weiterhin die Thermosensoren bzw. deren Abdeckungen und der stählerne Lattenfuß zu erkennen.

Praktische Untersuchungen zeigten, dass sowohl bei Tageslicht, als auch bei Dämmerlicht und Dunkelheit problemlos Zielweiten von 80 m erreicht werden. Größere Zielweiten wurden nicht getestet, sollten aber bis zur Grenze des Messbereiches durchaus möglich sein, da das Bild des Lattencodes mit sehr gutem Kontrast und ausreichend Helligkeit über 80 m erkennbar war. Hier stellt sich im Hinblick auf die erstrebten Genauigkeiten eher die Frage nach dem Sinn längerer Zielweiten. Die visuelle Ablesung einer leuchtenden metrischen Skale war bei unterschiedlicher Außenbeleuchtung ebenfalls über 80 m erfolgreich.

3 Lattenmaßstab

Der Codeträger hat einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha \approx 30$ ppm/K. Für eine 2 m-Nivellierlatte ändert sich also ihre Länge um ca. 0,06 mm pro Kelvin. Werden damit 100 m Höhenunterschied gemessen, beträgt die Abweichung 3 mm pro Kelvin Differenz zur Eichtemperatur. Bei Präzisionsnivelllements muss daher die Temperatur während der Messung erfasst werden. Dafür wurden Temperatursensoren in drei verschiedenen Höhen in den Lattenkörper integriert, die die Lattentemperatur zeitabhängig erfassen. Eine homogene Temperaturverteilung vorausgesetzt berechnet sich der aktuelle Lattenmaßstab M nach der Formel

$$M = 1 + \alpha_T \cdot (T_{\text{ist}} - T_0) . \quad (1)$$

T_0 sei hier die Eichtemperatur der Latte, bei welcher der Lattenmaßstab $M = 1$ ist. Da sich die Latte bei Vor- und Rückblick gleichermaßen ausdehnt oder zusammenzieht, ist der resultierende Höhenfehler bzw. die anzubringende Korrektur eine Funktion der Temperatur und des Höhenunterschiedes. Streng genommen berechnet sich die Korrektur k_i für den auf einem Standpunkt gemessenen Höhenunterschied Δh_i bei Verwendung von zwei verschiedenen Latten für Vor- und Rückblick nach der Formel

$$k_i = R_{\text{Ablesung}} \cdot (M_R - 1) - V_{\text{Ablesung}} \cdot (M_V - 1) . \quad (2)$$

Die Maßstäbe M_R und M_V sind für jede Latte getrennt zu berechnen. Bei Verwendung nur einer Latte ist zwar T_0 bei Vor- und Rückblick gleich, jedoch kann theoretisch T_{ist} bei Vor- und Rückblick unterschiedlich sein. Wenn man T_{ist} für Vor- und Rückblick als gleich annimmt, vereinfacht sich Formel (2) zu

$$k_i = (R_{\text{Ablesung}} - V_{\text{Ablesung}}) \cdot (M - 1) . \quad (3)$$

Die exakte Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T des Prototypen fand in einer Klimakammer statt, die von der ETH Zürich freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde, wofür sich die Autoren an dieser Stelle bedanken möchten.

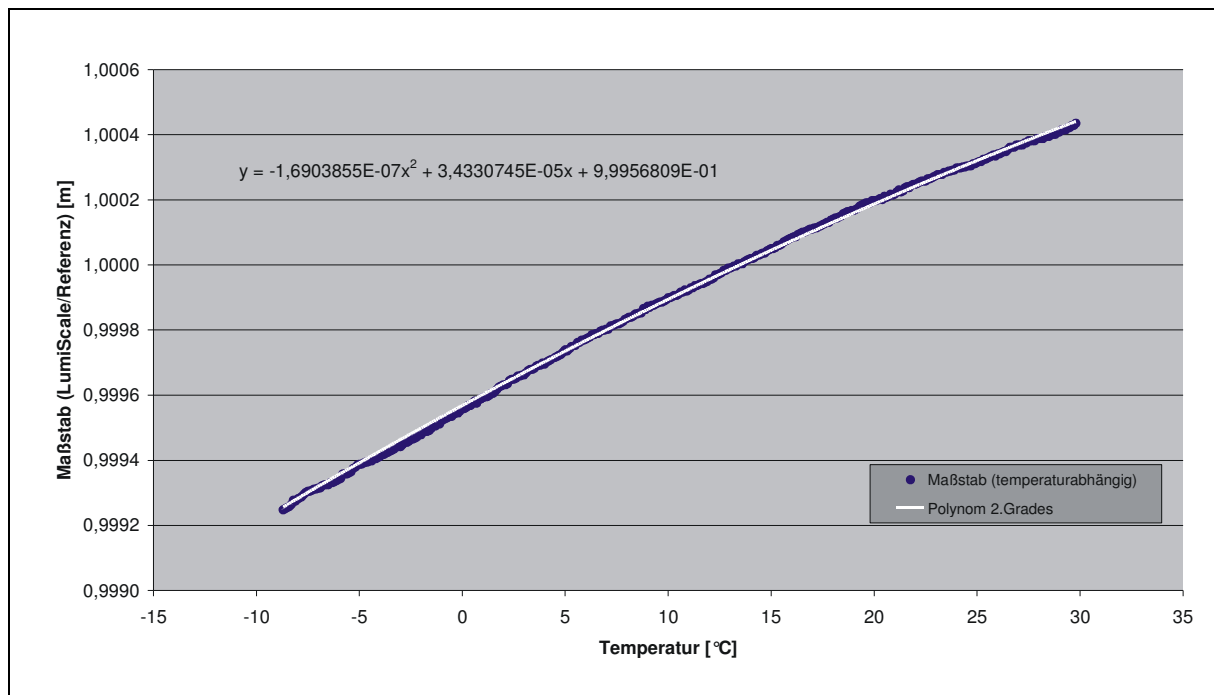


Abbildung 2: Temperaturabhängiger Lattenmaßstab

Innerhalb von vier Stunden wurden alle 6 Sekunden von $+40^\circ\text{C}$ bis -20°C eine Temperaturmessung und eine Ablesung mit dem DiNi 11 durchgeführt (Abb. 2). Bei $+40^\circ\text{C}$ und -20°C wurde eine Vergleichsmessung mit einer Invarlatte durchgeführt, um die Stabilität des Messaufbaus zu überprüfen. Die Ablesung wurde um den Nullpunktsfehler korrigiert. Für den linearen Ausdehnungskoeffizienten wurde $\alpha = 31 \text{ ppm/K}$ ermittelt. Dies entspricht einem Maßstabsfehler von $3,1 \text{ ppm}$, wenn die Temperaturmessgenauigkeit $0,1 \text{ K}$ beträgt. Bei anschließender Erwärmung zurück auf $+40^\circ\text{C}$ ergab sich derselbe Anstieg, allerdings mit leicht verschobener Kurve. Dies kann auf den thermischen Widerstand des Trägermaterials zurückgeführt werden. Dadurch, dass die sich schneller verändernde Umgebungstemperatur auch einen gewissen Einfluss auf den Temperatursensor hat, wird nicht die tatsächliche Temperatur des Materials erfasst, sondern ein je nach Umgebungstemperatur nach oben bzw. unten verfälschter Wert. Dieser Hysterese-Fehler wurde durch Mittelung der mit entgegengesetztem Temperaturverlauf bestimmten Kalibrierkurven bzw. eine ausgleichende Funktion reduziert. Wie Abbildung 2 zeigt, ist die thermische Ausdehnung nicht ganz linear, lässt sich aber durch ein Polynom 2. Grades sehr gut annähern.

Für die Bestimmung der Eichtemperatur wurde der mittlere Lattenmeter sowohl in der Klimakammer als auch auf der Komparatorbahn temperaturabhängig bestimmt. Durch Umstellung der Gleichung (1) lässt sich mit dem ermittelten Lattenmeter, den dazugehörigen mittleren Temperaturen T_{ist} und dem linearen Ausdehnungskoeffizienten α die Eichtemperatur T_0

berechnen. Die Ergebnisse für die Hin- und Rückmessung der Kalibrierung auf dem Nivellierlattenkomparator betragen $13,2^{\circ}\text{C}$ und $13,8^{\circ}\text{C}$. Mittelt man die beiden Werte, so erhält man $T_0 = 13,5^{\circ}\text{C}$. Dieses Ergebnis entspricht exakt dem in der Klimakammernessung berechneten Wert und bestätigt somit diese relativ niedrige Eichtemperatur.

Wie die praktischen Untersuchungen ergaben, ist die Temperaturverteilung entlang der Latte selten so homogen wie in der Klimakammer. Deshalb ist es sinnvoll, jede einzelne Lattenablesung H_{Abl} entsprechend der Temperaturverteilung zu korrigieren. Die korrigierte Lattenablesung H_{ist} entspricht dem Integral des Lattenmaßstabs über die Ablesehöhe.

$$H_{ist} = \int_0^{H_{Abl}} M dH = \int_0^{H_{Abl}} [1 + \alpha_T \cdot (T_{ist}(H) - T_0)] \cdot dH \quad (4)$$

Neben dem bereits besprochenen homogenen Maßstab für die ganze Latte, der nach Mittelung der Daten aller drei Temperatursensoren bestimmt wird, kommen die drei in Abbildung 3 erläuterten Modelle für die Maßstabsverteilung bzw. das Temperaturprofil $T_{ist}(H)$ in Frage.

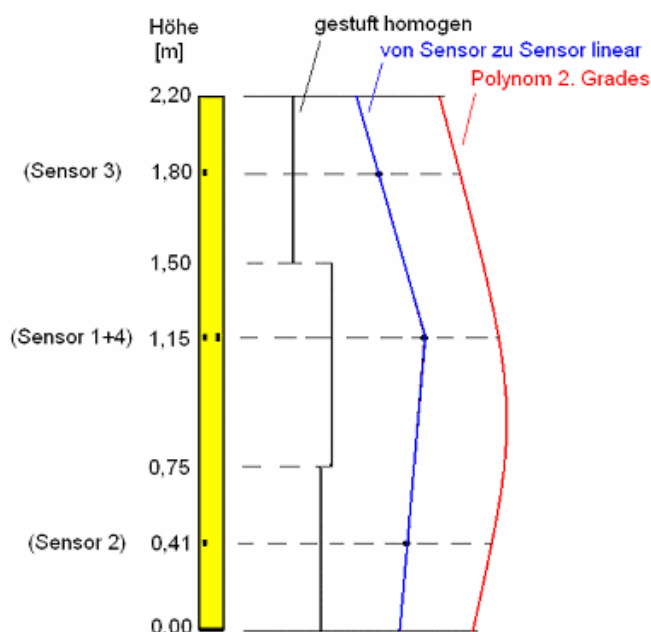


Abbildung 3: Modelle für die Temperaturverteilung bei 3 Thermosensoren

Es sind dies das gestuft homogene Modell, das von Sensor zu Sensor lineare Modell und ein Polynom 2. Grades. Alle Modelle stehen in der Software als Auswahl zur Verfügung. Beim Prototyp der Leuchtlatte waren vier Temperatursensoren in drei verschiedenen Höhen eingebaut. Sensor 1 und 4 befanden sich beide in derselben Höhe für vergleichende Untersuchungen mit und ohne Schutzabdeckung.

4 Messung und Auswertung

Die Erfassung der Lattentemperatur synchron zu den Messwerten des Digitalnivelliers ermöglicht eine mathematische Korrektur des Messergebnisses im postprocessing. Der Datenlogger zeichnet die Temperaturmessung während des Nivellements im Sekundentakt auf. Die Synchronisierung mit den Nivellementsdaten kann beim DiNi von Zeiss bzw. Trimble dadurch erfolgen, dass die Messzeit sekundengenau im DiNi mit abgespeichert wird. Die Uhr des Datenloggers ist hier vor Beginn der Aufzeichnung mit der internen Uhr des verwendeten Nivel-

lierinstruments abzugleichen. Beim Digitalnivellier DL 101-C von Topcon kann die Messzeit nur minutengenau abgespeichert werden, so dass für die Temperaturerfassung ein Minutenmittel gebildet werden muss. Da Leica-Nivelliere keine interne Uhr besitzen, muss die Messzeit vor jeder Ablesung als Punktinformation eingegeben werden. Ein Sokkia-Nivellier stand für die Untersuchungen leider noch nicht zur Verfügung.

Die Temperaturwerte werden im Datenlogger auf CompactFlash-Karte gespeichert. Nach Beendigung der Messung wird die Karte aus dem Logger genommen und im Büro ausgelesen. Je nach Temperatur und Höhenunterschied kann die unkorrigierte Messung stark von der Höhendifferenz der Anschlusspunkte abweichen. Die direkte Prüfung der Ergebnisse im Nivellierinstrument kann nur mit unkorrigierten Messwerten erfolgen. Eine Abschätzung des Maßstabsfehlers im Außendienst zur groben Kontrolle der Messergebnisse ist mit Hilfe der Differenz einer mittleren Temperaturablesung zur Eichtemperatur, mit dem gemessenen Höhenunterschied und dem linearen Ausdehnungskoeffizienten möglich. Eine richtige Überprüfung der Messung gleich im Feld kann mit Hilfe eines Laptops erfolgen. Hierzu müssen auch die Nivellimentsdaten im Feld ausgelesen werden.

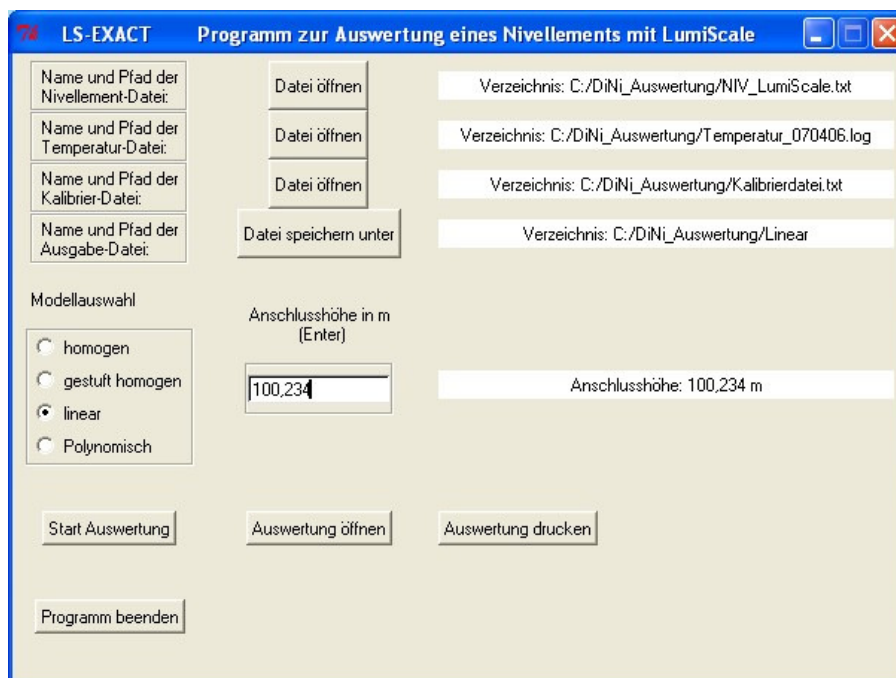


Abbildung 4: Screenshot der Auswertesoftware LS-Exact

Die Korrektur der Messergebnisse erfolgt relativ einfach mit der Software LS-Exact (Abb. 4), in der die Daten der Temperaturkalibrierung als Kalibrierdatei hinterlegt sind. Die Messdaten aus Nivellier und Datenlogger werden eingelesen und eine Anschlusshöhe kann vorgegeben werden. Nach der Auswahl des Modells wird die Auswertung gestartet. Als Ergebnis erhält man eine Datei im Rohdatenformat des Nivelliers, in der die Messwerte durch korrigierte Messwerte ersetzt wurden. Diese Datei kann dann für die weitere Auswertung und Ausgleichung in entsprechende Standard-Software eingelesen werden.

5 Testergebnisse

Im Rahmen der Diplomarbeit fanden neben den Untersuchungen zur thermischen Ausdehnung des Codeträgers auch Untersuchungen zur Genauigkeit der Lattenteilung auf einer Komparatorbahn und Praxistests des Messsystems statt.

Die mittleren Teilungsfehler von Invarbandlatten liegen bei ± 10 bis $\pm 20 \mu\text{m}$. Die maximalen Fehler weisen Werte zwischen $0,03 \text{ mm}$ und $0,05 \text{ mm}$ auf (DEUMLICH und STAIGER, 2002). Wie die Messung auf der Komparatorbahn ergab, beträgt die Standardabweichung der im Re-pro-Verfahren hergestellten Strichcodeteilung der Leuchtlatte nach der Temperaturkorrektur $20 \mu\text{m}$. Einzelne Fehler weichen bis zu $50 \mu\text{m}$ von der Sollposition ab. Damit findet sich die Nivellierlatte, hinsichtlich ihrer Teilungsgenauigkeit, im Bereich der Präzisions-Invarbandlatten wieder. Vergleichende Untersuchungen mit Siebdruck-Teilung zeigten dagegen systematische Abweichungen bis zu $0,6 \text{ mm}$.

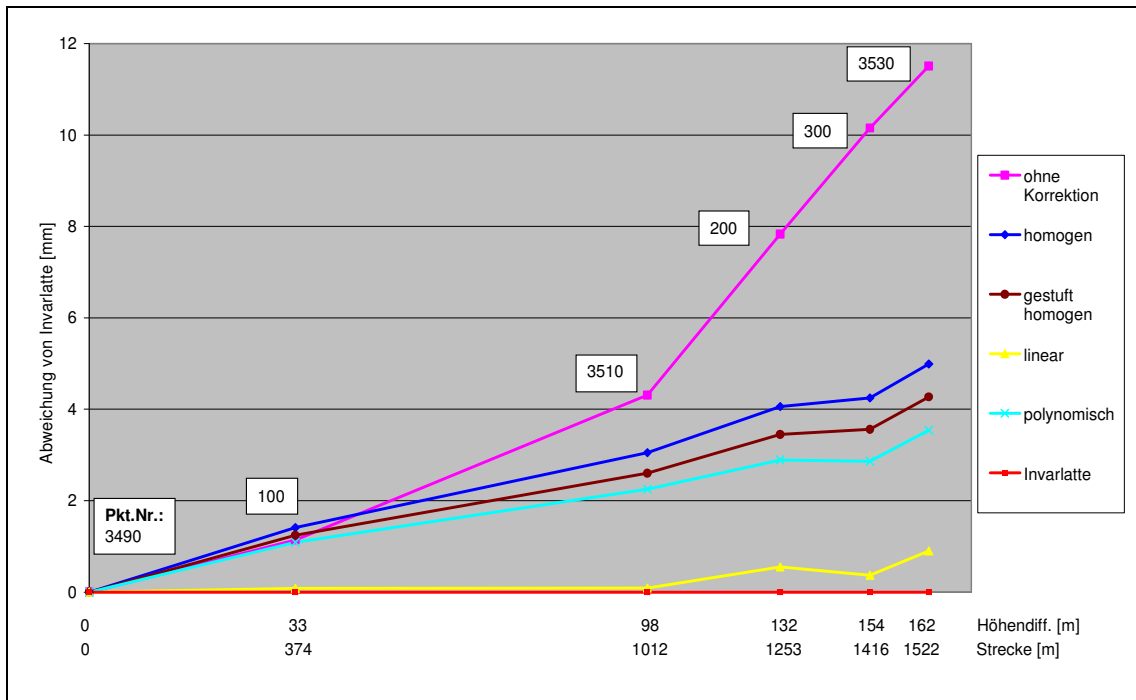


Abbildung 5: Höhendifferenzen bezüglich der Messung mit Invarlatte

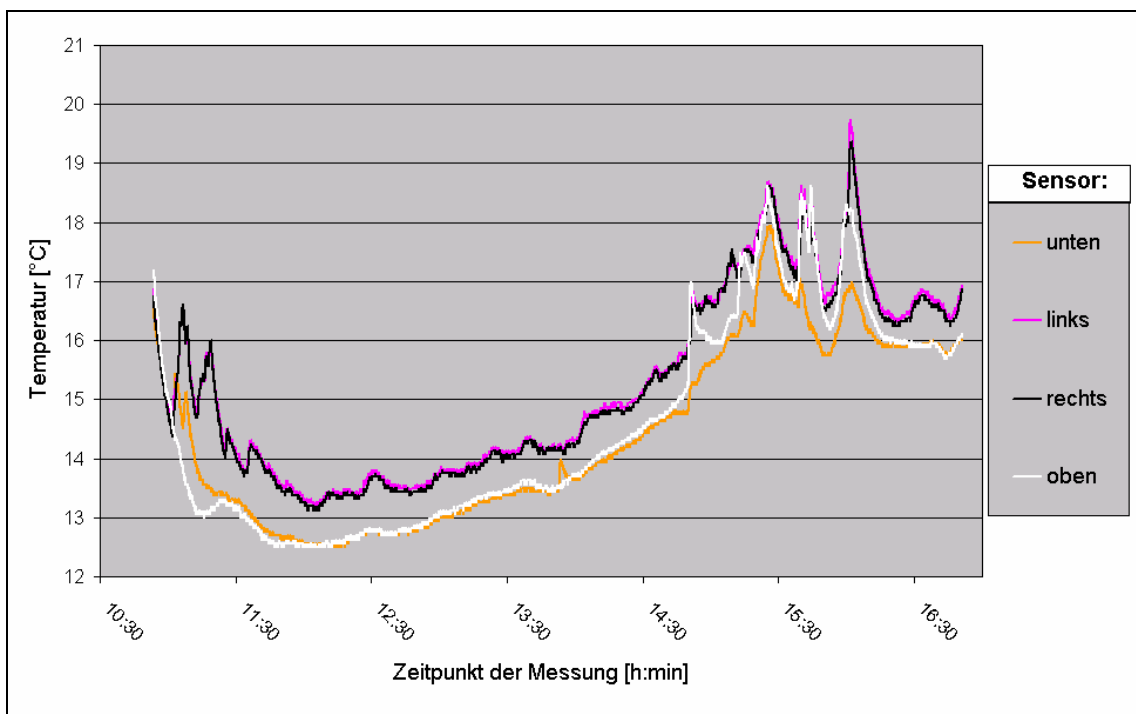


Abbildung 6: Temperatur des Codestreifens während des Nivellements

Ein praktischer Test in Form eines Präzisionsnivelements wurde auf einer Nivellementstrecke mit sehr steilem Gelände und großen Höhendifferenzen durchgeführt. Die Strecke wurde gewählt, um zu zeigen, dass auch bei extrem vielen Stand- bzw. Wechsellpunkten und zum Teil großen Unterschieden zwischen den Visuren der Rückblicke bzw. Vorblicke (Ablesungen an der Nivellierlatte sehr weit oben bzw. sehr weit unten), nach einer Maßstabskorrektur der (Code-)Teilung, den Genauigkeitsanforderungen eines Präzisionsnivelements standgehalten werden kann. Maßstabsfehler führen zu systematisch verfälschten Höhenunterschieden, die umso größer werden, je bewegter das Gelände ist (BAUMANN, 1992). Das Nivellement führte vom Dresdner Ortsteil Borsberg hinab nach Pillnitz über eine Höhendifferenz von ca. 162 m auf einer Strecke von etwa 1,5 km. Die Höhenmessung wurde mit einem DiNi 11 als Parallelnivelement mit der hierbei üblichen Ablesefolge RVVR bei größtenteils bedecktem Himmel und Temperaturen um ca. 15°C durchgeführt. Dasselbe Nivellement wurde zum Vergleich mit demselben Instrument und einer Invarlatte durchgeführt. Die ausgewählte Strecke ist Teil eines Überwachungsnetzes für Geländesetzungen. Es handelt sich also um Punkte höchster Genauigkeit. Die Differenz zwischen eigener Messung mit Invarlatte und Höhen des Landesvermessungsamtes lag am Ende der Nivellementstrecke bei 0,7 mm. Die Differenzen der Messung mit Leuchtlatte zu dieser Messung sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Abbildung 6 zeigt den zugehörigen Temperaturverlauf. Trotz des geringen Unterschiedes zur Eichtemperatur summierte sich bis zum abschließenden Mauerbolzen die Abweichung des Nivellements ohne Korrektur auf 11,5 mm. Nach der Maßstabskorrektur der Lattenablesungen sind diese Differenzen deutlich geringer. Wird für die Leuchtlatte ein homogener Maßstab durch Mittelung der Temperaturwerte herangezogen, so beträgt die Abweichung für die gesamte Nivellementstrecke 5,0 mm. Noch geringer wird dieser Wert, wenn die Ablesungen mit den zuvor beschriebenen Modellen für die Maßstabsverteilung bzw. das Temperaturprofil $T_{\text{ist}}(H)$ korrigiert werden. Hier liegen die Abweichungen bei 4,3 mm (gestuft homogenes Modell), 3,5 mm (polynomisches Modell) und 0,9 mm (lineares Modell). Der lineare Modellansatz zur Temperatur- bzw. Maßstabskorrektur (Abb. 5) erwies sich also bei diesem praktischen Test als sehr genaue Variante. Die Abweichungen des polynomischen Modells vom linearen Modell sind möglicherweise darin begründet, dass die meisten Ablesungen an den Rändern der Latte stattfanden, wo das lineare Modell bei dieser Messung besser passte.

Ursache für den ziemlich unregelmäßigen Temperaturverlauf zu Beginn und am Ende des Nivellements war die zeitweise, direkte Sonnenbestrahlung. Wie der Temperaturverlauf deutlich zeigt, ist die Latte in der Mitte durchgehend wärmer als an den Rändern. Die Differenz von etwa 0,7 K zwischen den mittleren Sensoren einerseits und dem oberen bzw. unteren Sensor andererseits ist wahrscheinlich durch Wärmestrahlung des Messgehilfen im Bereich der mittleren Sensoren verursacht worden. Eine bessere Isolierung im Bereich des Haltegriffs wird hier Abhilfe schaffen.

6 Fazit

In Anbetracht der bei den Testmessungen nachgewiesenen geringen Abweichung von 0,9 mm über 162 m Höhenunterschied bei über 100 Standpunkten kann man durchaus von Präzisionsnivelement sprechen, auch wenn die Latte nicht einer Präzisions-Nivellierlatte gemäß DIN 18717 entspricht. Anwendungen der leuchtenden Nivellierlatte mit Maßstabskorrektur sind bei Überwachungsmessungen in Talsperren und im Tunnelbau zu erwarten. Anfragen aus Skandinavien zeigen, dass das Problem der geringen Beleuchtung nicht nur innerhalb von Bauwerken existiert. Für Nivellements bei einsetzender Dunkelheit oder bei Nacht ist in den Wintermonaten auch in unseren Breitengraden ein höherer Bedarf zu sehen. Mittlerweile steht

am Geodätischen Institut eine eigene Klimakammer zur Verfügung, welche speziell für die Kalibrierung der hier vorgestellten Nivellierlatten konstruiert wurde.

7 Literatur

- BAUMANN, E. (1992): Vermessungskunde, Band 1, Einfache Lagemessung und Nivellement, 3.Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 1992
- DEUMLICH, F., STAIGER, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag Heidelberg, 2002
- FUHLAND, M. (2006): Die leuchtende Nivellierlatte – Präzision ohne Invarband, ZfV Heft 2 / 2006
- KEPPLER, A., MEISSEL, A., NATEROP, D. (1996): Automatische Bauwerksüberwachung mit motorisierten Digitalnivellieren, In Brandstätter, Brunner, Schelling (Eds.): Ingenieurvermessung 96, Band 1, Dümmler Verlag, 1996
- RYF, A. (2004): AlpTransit - Der Gotthard-Basistunnel - Geodätische Aspekte, Präsentation an der ETH Zürich für Besucher der TU Dresden, 30.9.2004
- WERSCHNITZKY, R. (2007): Untersuchungen zur temperaturkalibrierten Leuchtlatte LumiScale, Diplomarbeit, TU Dresden, 2007