

Die leuchtende Nivellierlatte – Präzision ohne Invarband

Matthias Fuhrland

Zusammenfassung: Im nachfolgenden Artikel wird die Entwicklung einer leuchtenden Nivellierlatte beschrieben. Als Teilungsträger wird eine Plexiglasplatte verwendet, deren thermisches Ausdehnungsverhalten messtechnisch erfasst und rechnerisch korrigiert wird. Ein Prototyp der leuchtenden Nivellierlatte wurde in Zusammenarbeit von Argus GeoTech GmbH und TU Dresden entwickelt und getestet.

Abstract: The following article describes the development of a luminescent levelling rod. The carrier of the scale graduation is a plexiglass plate whose thermic expansion behaviour becomes measured and mathematically corrected. A prototype of the luminescent levelling rod was developed and tested in collaboration of Argus GeoTech GmbH and TU Dresden.

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 Nivellierlatten. 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 u.a., 1996]. Konstruktive Ansätze zur Verwendung eines Nivelliers mit Blitzlicht oder integriertem Scheinwerfer wurden von den Herstellern verworfen. Statt dessen 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. 0,5m) 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 Invarlatten Probleme bereiten, da die Wärme ausgerechnet in Höhe des Zielstrahles entsteht und deshalb Luftflimmern bzw. Refraktion in Lattennähe 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.

Ein an der TU Graz entwickeltes System nutzt ein unter Strom selbstleuchtendes Material, welches für den Aufdruck der Strichteilung auf den Lattenkörper verwendet wird. [BRUNNER / WOSCHITZ, 2004] beschreiben die Möglichkeit, eine selbstleuchtende Nivellierlatte mittels elektrolumineszierender Folien zu realisieren. Da der beschriebene Aufdruck in mehreren

Schichten erfolgen muss, ist das Druckverfahren der Lumineszenzfolie sehr aufwändig, jedoch ist die Beleuchtung sehr homogen. Welche Genauigkeiten bei Verwendung der Folie als Teilungsträger erzielbar sind, ist bislang noch nicht bekannt. Vorgeschlagen wurde hier ebenfalls eine Invar-Maske vor der Lumineszenzfolie, die den Strichcode wiedergibt. Die Firma NEDO zeigte einen entsprechenden Prototyp auf der InterGeo 2004. Der Fertigungsaufwand für eine solche Maske ist immens. Die Fertigungsgenauigkeit der Strichteilung genügt aber weder bei Ätzung noch bei Laserschneiden oder Erodieren den Ansprüchen an das Präzisionsnivelement, weshalb von einer Serienfertigung Abstand genommen wurde.

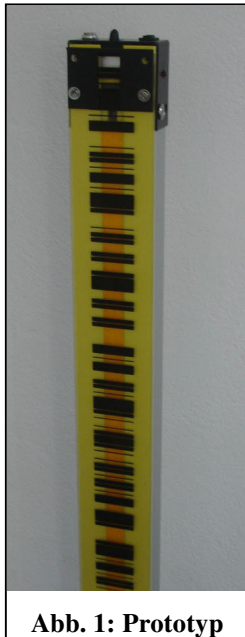


Abb. 1: Prototyp

Lösungsansatz

Der innovative Ansatz der Firma Argus GeoTech GmbH besteht darin, den Träger der Strichteilung ähnlich wie bei der Invar-Maske durchsichtig zu gestalten, im Durchlicht zu beleuchten, die thermische Ausdehnung zu kalibrieren und die Lattentemperatur im Feld mit zu erfassen. Ausführungsbeispiel ist eine vorderseitig bedruckte Plexiglas-Platte, die rückseitig satiniert ist, um das Licht der dahinter befindlichen Lichtquelle zu streuen und die bereits nahezu gleichmäßige Beleuchtung der Strichteilung noch zu homogenisieren. Die Lichtquelle besteht aus Leuchtschnüren in Form von Kaltkathodenröhren, die zwischen Lattenkörper und der Plexiglasplatte anzuordnen sind. Das Wirkprinzip ist mit dem der Lumineszenzfolien identisch. Die Leuchtschnüre sind als Meterware im Handel erhältlich. Aufgrund der Bestrahlung im Durchlicht und der zusätzlichen Reflexionen am Lattenkörper ist die Lichtausbeute sehr gut. Die Leuchtschnüre können farblich so gestaltet werden, dass einerseits der Kontrast gut ist, andererseits eine Überstrahlung verhindert wird. Zur Erhöhung der Leuchtkraft können

mehrere Lagen Leuchtschnur mäanderförmig nebeneinander gelegt werden. Die für den Betrieb notwendigen elektronischen Bauteile können im oder am Lattenkörper befestigt werden. Ein Prototyp der leuchtenden Nivellierlatte (Abb. 1) wurde in Zusammenarbeit von Argus GeoTech GmbH und TU Dresden entwickelt und getestet. Die Akkus und sonstige elektronischen Bauteile wurden im Lattenkörper integriert. Am Lattenkopf befinden sich ein Schalter, die Ladebuchse und eine Leuchtdiode, die bei niedriger Akku-Ladung blinkt. Die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Lattenkörper und Plexiglasplatte wurde konstruktiv durch Langlöcher im Plexiglas berücksichtigt. Als alternative Bauform sind Schienen an den Seiten sicher besser geeignet, da sie die aufgedruckte Lattenteilung besser gegen mechanische Einwirkung schützen können und ein gleichmäßiges Andrücken an den Lattenkörper garantieren. Um Tests mit verschiedenen Instrumenten durchführen zu können, wurden mehrere Plexiglasträger mit unterschiedlichen Strichteilungen bedruckt, die beim Prototyp leicht ausgetauscht werden konnten. Nachfolgend sollen die Untersuchungsergebnisse vorgestellt werden.

Reichweiten

Mit dem Prototyp einer 1,50m-Latte wurden Tests mit automatisierten Nivellieren durchgeführt. Das verwendete NA 3003 von Leica Geosystems konnte bis Zielweiten von 36m problemlos messen, sowohl bei Tageslicht, als auch bei Dämmerlicht und Dunkelheit. Die Limitierung der Reichweite ergibt sich aus dem großen Öffnungswinkel von 2° und der

Bedingung, dass das Lattenbild mindestens 2/3 des Sichtfelddurchmessers abdecken muss. Bei Verwendung einer 3m-Latte dürfte demnach die doppelte Zielweite erreichbar sein.

Bei Verwendung eines DiNi 10 von Zeiss wurden problemlos Zielweiten von 80m erreicht. 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 80m 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 80m erfolgreich. Abb. 2 zeigt Helligkeit und Kontrast bei Dämmerlicht und Dunkelheit.

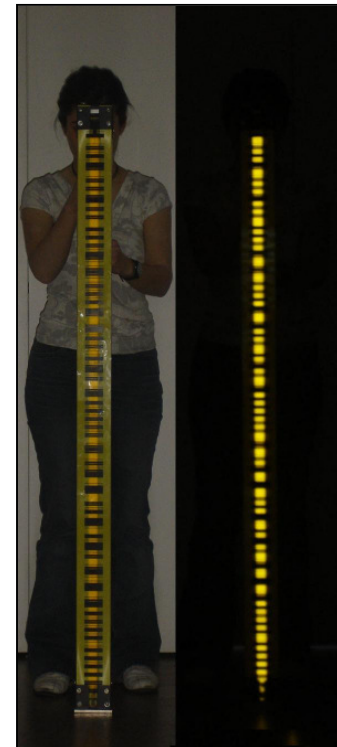


Abb. 2: Prototyp im Dunkel mit und ohne Blitzlicht

Kalibrierung

Plexiglas hat einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha \approx 70$ ppm/K. Das heißt, eine 3m-Latte ändert ihre Länge um ca. 0,2 mm pro Kelvin. Für Präzisionsnivellements ist es daher unerlässlich, die Temperatur T_{ist} während der Messung mit zu erfassen. Hierfür wurde eigens ein Temperatursensor mit Anzeige und Datenlogger in den Lattenkörper integriert (siehe Abb. 3). Die zeitabhängige Aufzeichnung der Lattentemperatur kann im Datenlogger erfolgen oder als Punktinformation im Digitalnivellier eingegeben werden. Letzteres ist z.B. im DiNi 10 möglich. Der aktuelle Lattenmaßstab M berechnet sich aus der Formel

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

T_0 sei hier die Eichtemperatur der Latte, bei welcher der Lattenmaßstab = 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

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

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

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

Die exakte Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten α des Prototypen fand in einer Klimakammer statt, die von der ETH Zürich freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde, wofür sich der Autor an dieser Stelle bedanken möchte. Bei einer über einen Zeitraum von vier Stunden kontinuierlichen Temperaturdrift von $+40^\circ\text{C}$ bis auf -20°C wurden in gleichem Takt von 6 s eine Temperaturmessung und eine Ablesung mit dem DiNi 11 durchgeführt. Bei $+40$ und -20°C wurde eine Vergleichsmessung mit einer Invarlatte durchgeführt, um die Stabilität des Messaufbaus zu überprüfen. Die Ablesung wurde um den

Nullpunktfehler korrigiert, dessen Bestimmung unten beschrieben ist. Der Anstieg der ausgleichenden Gerade für Diagramm 1 liefert einen Wert von $\alpha = 66 \text{ ppm/K}$. Als ausgleichende Funktion ist jedoch besser das in Bild und Formel dargestellte Polynom 2. Grades geeignet. Bei anschließender Erwärmung zurück auf $+40^\circ\text{C}$ ergab sich derselbe Anstieg, allerdings mit leichter Verschiebung des Nullpunktes. Dies kann auf den hohen thermischen Widerstand des Plexiglases zurückgeführt werden. Dadurch, dass die sich schneller verändernde Umgebungstemperatur auch einen gewissen Einfluss auf den



Abb. 3: Rückseite mit Temperaturanzeige

Temperatursensor hat, wird nicht die tatsächliche Temperatur des Plexiglases erfasst, sondern ein je nach Umgebungstemperatur nach oben bzw. unten verfälschter Wert. Dieser Hysterese-Fehler kann durch Mittelung beider Kalibrierkurven bzw. eine ausgleichende Funktion reduziert werden. Eine instrumentelle Verbesserung wird sich durch thermische Isolation der Temperaturmessstelle und einen dünneren Teilungsträger ergeben. Konstante Abweichungen zwischen erfasster Temperatur und tatsächlicher Lattentemperatur sind unkritisch, da die Korrektur sich auf die gemessene Temperatur bezieht.

Für die Bestimmung der Eichtemperatur T_0 wurde zusätzlich für eine konstante Temperatur $T_{17^\circ\text{C}}$ der mittlere Lattenmeter auf der Komparatorbahn des Geodätischen Institutes der TU Dresden bestimmt. Durch Umstellen von Gl. 1 wurde T_0 mit 24°C ermittelt. Dieser hohe Wert konnte nach Rücksprache mit der Druckerei darauf zurückgeführt werden, dass

zur Trocknung des Druckbildes ein 50°C heißer Luftstrahl verwendet wurde. Zu bemängeln wäre außerdem die Kantenschärfe, die beim Siebdruck bekanntermaßen geringer ist als bei Repro-Verfahren.

Genauigkeitskriterien

Für eine korrekte Bestimmung des Lattenmaßstabes mit nur einer Ablesung, wie oben beschrieben, ist die Korrektur des Lattennullpunktes notwendig. Die Bestimmung des Lattennullpunktes muss möglichst bei Eichtemperatur erfolgen. Wenn die Lattentemperatur von der Eichtemperatur abweicht, sollte die für die Nullpunktbestimmung notwendige Ablesung am unteren Lattenende erfolgen, um den Einfluss des Maßstabsfehlers zu minimieren. Durch Vergleich mit einer Invarlatte wurde beim Prototypen ein Nullpunktfehler von $0,6 \text{ mm}$ ermittelt, der nach Abschluss der Messungen durch Neujustage behoben wurde. Der absolute Nullpunktfehler der Invarlatte sollte nur wenige hunderstel mm betragen

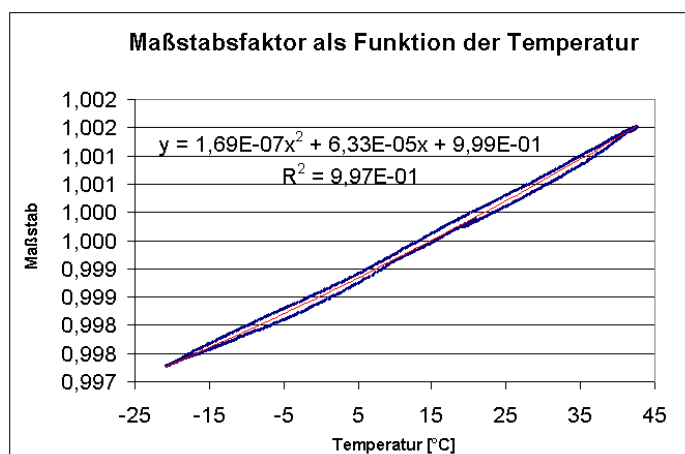


Diagramm 1

und ist deshalb vernachlässigbar.

Da der Temperatursensor schneller reagiert als der Teilungsträger, kommt es, wie oben gezeigt, bei Temperaturwechseln zur Hysterese-Effekten. Zur Abschätzung der Genauigkeit der Temperaturkorrektur ist neben der Genauigkeit der Temperaturmessung also auch der Restfehler aus der Mittelung der Kalibrierkurven zu berücksichtigen. Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt beim verwendeten Sensor laut Herstellerangabe $\pm 0,1$ K. Wenn man den linearen Anstieg der Kalibrierkurve mit 66 ppm/K annimmt, ergibt sich damit ein Maßstabsfehler von $\pm 6,6$ ppm. Dies lässt sich bereits mit der Genauigkeit einer Invarlatte vergleichen. Da Invar einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 0,9 ppm/K besitzt, erhält man mit der Invarlatte einen Maßstabsfehler von 6,6 ppm bei einer Temperaturdifferenz von ca. 7K zwischen zwei Messungen. Dieser Vergleich wird jedoch durch die Hysterese-Effekte hinfällig. Für den Prototypen sind nach Abschätzung der Differenzen in Diagramm 1 bei schnellen Temperaturwechseln maximal Fehler zwischen -0,17 bis +0,17 mm/m zu erwarten. Eine Akklimatisierung der Latte vor der Messung ist demzufolge empfehlenswert. Der maximale Fehler wegen Hysterese und Temperaturmessgenauigkeit ergibt sich je nach Messtemperatur dann aus der Summe beider Einzelfehler, z.B. bei 25°C sind das $\pm 0,1$ mm pro Lattenmeter. Bei langsamen Temperaturänderungen dürfte der Fehler deutlich darunter liegen.

Bekanntermaßen erreicht die Strichteilungsgenauigkeit beim Siebdruckverfahren nicht die Werte wie das Verfahren mit Lasergravur, was die Untersuchung auf der Komparatorbahn auch bestätigte. Mit Blick auf die noch laufenden Entwicklungsarbeiten kann an dieser Stelle auf nachfolgende Veröffentlichungen verwiesen werden.

Testergebnisse

Ein Präzisionsnivelement ohne vorherige Akklimatisierung wurde bei bedecktem Himmel und Temperaturen um 20 °C im Gelände der TU Dresden in Form eines Doppelnivellements mit Ablesefolge RVVR durchgeführt. Parallel wurde mit demselben Instrument auf jedem Standpunkt eine Messung mit Invarlatte durchgeführt. Während der 3-stündigen Messung fiel die Lattentemperatur um 7 K, vorwiegend wegen des 30 min langen Akklimatisierungseffektes. Die aktuelle Lattentemperatur wurde auf jedem Standpunkt für Vor- und Rückblick erfasst und als Punktinformation im Instrument (DiNi10) eingegeben. Nebenbei wurden die Werte im 15-Sekunden-Takt mit dem Datenlogger aufgezeichnet. Bei der Auswertung wurden drei Varianten unterschieden: 1.) Auswertung mit einheitlichem Maßstab für die ganze Schleife basierend auf einer Durchschnittstemperatur; 2.) Auswertung mit einheitlichem Maßstab für jeden Standpunkt, basierend auf der gemittelten Temperatur für Vor- und Rückblick; 3.) Auswertung mit separatem Maßstab für jede Visur. Der Vergleich zur ausgeglichenen Messung mit Invarlatte ergab folgende Ergebnisse :

Der mittlere km-Fehler betrug bei allen Auswertevarianten ca. 0,3 mm, bei der Invarlatte 0,4 mm. Die Differenz des gemittelten Gesamthöhenunterschiedes von 7,28 m zur Messung mit Invarlatte betrug bei allen Varianten weniger als 0,2 mm. Der zeitliche Versatz zwischen Temperaturablesung mit Eingabe am Nivellier und der Lattenablesung bewirkte Differenzen von 0,01 bis 0,03 mm zur Berechnung mit den zum Zeitpunkt der Lattenablesung im Datenlogger gespeicherten Temperaturen. Die Art der Temperaturwertspeicherung hat also bei geringen Höhenunterschieden keinen nennenswerten Einfluss auf das korrigierte Messergebnis. Bei Höhenunterschieden über 200m wäre vielleicht ein signifikanter Einfluss erkennbar. Leider liegen dazu wegen des erhöhten Aufwandes an eine solche Messung noch keine Untersuchungen vor.

Die Dicke der Plexiglasplatte von 5mm erwies sich als problematisch, da es durch den vorderseitigen Aufdruck der Strichteilung bei Tages- oder starkem Fremdlicht zu Schattenwurf kam, der beim verwendeten DiNi 10 die Messung teilweise unmöglich machte. Bei Dämmerlicht oder Dunkelheit gab es keine Probleme. Das Umdrehen der Plexiglasplatte wäre zwar zum Schutz der Strichteilung sinnvoll, wegen der rückseitigen Satinierung hätte aber die Qualität der Abbildung gelitten. Zu erwarten ist hierbei eine Änderung des Bildmaßstabes durch den planparallelen Versatz des divergenten Zielstrahles an der Plexiglasplatte. Ob und inwieweit dies eine Verfälschung der Ablesung bewirkt, bleibt zu untersuchen. Die Wirtschaftlichkeit einer leuchtenden Nivellierlatte wurde beim jährlichen Talsperrenpraktikum des Geodätischen Institutes der TU Dresden in Innerthal (Schweiz) untersucht. Für die Präzisionsnivelllements im Inneren der Staumauer waren bislang immer zwei Kabeltrommeln und ein Halogenscheinwerfer zur Beleuchtung der Latte notwendig. Ein Student war jeweils nur für die Beleuchtung zuständig. Trotz oder gerade wegen des Halogenscheinwerfers bereitete die Messung an vielen Standpunkten Probleme, d.h. sie war oft wegen Überstrahlung oder ungleichmäßiger Beleuchtung unmöglich. Der Zeitaufwand

war nicht zuletzt wegen der beengten Platzverhältnisse enorm. Gleiches gilt für die Messung im Sennegg-Stollen, einem 1,70m hohen Stollen, der zur Überwachung der Hangrutschung im bebauten Gebiet 90m tief in der Berg getrieben wurde. Da hier kein Stromanschluss vorhanden ist, musste der Strom bislang immer durch Kabel vom nächstgelegenen Wohngebäude besorgt werden. Die Messung mit 2m-Latten war in beiden Fällen nicht möglich. Der Einsatz der 1,50m-Leuchtlatte reduzierte sowohl bei der Talsperrenmessung (siehe Abb.4) als auch bei der Messung im Stollen die Dauer des Nivellements um ca. 60 %. Dazu wäre noch die Personaleinsparung zu rechnen. Demzufolge kann festgestellt werden, dass der Einsatz der leuchtenden Nivellierlatte das Nivellement bei Dunkelheit, in Tunneln, Talsperren und anderen schlecht beleuchteten Gebäuden ermöglicht bzw. deutlich rationalisiert. Als zweckmäßig erwies sich, eine Taschenlampe zur Beleuchtung der Dosenlibelle an den Lattenkörper anzukleppen, welche bei Bedarf zur Punkt suche abgenommen werden kann.



Abb. 4: Einsatz in der Talsperre

Ausblick

Wie sich bereits im Vorfeld der InterGeo 2005 herausstellte, hat die Firma NEDO mit der LUMISCALE zeitgleich ein ähnliches Produkt entwickelt. Die LUMISCALE arbeitet nicht mit einer bedruckten Plexiglasplatte, sondern mit einer bedruckten Spezialfolie, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient bei 18 ppm/K liegt. Da der Teilungsträger sehr dünn ist, kann die bedruckte Seite im Inneren der Latte liegen, wodurch der Code gegen Abrieb geschützt ist und das Problem des Schattenwurfes bei Tageslicht nicht auftritt. Die Beleuchtung erfolgt nicht mit Leuchtschnüren, sondern mit Leuchtfolie. Die Dosenlibelle ist separat beleuchtet. Zur Stromversorgung ist die

LUMISCALE mit Wechsel-Akkus ausgestattet [NEDO]. Eine Erfassung der Lattentemperatur ist nicht realisiert, weshalb die Latte auch noch nicht als Präzisionsnivellierlatte angeboten wird. Da sowohl das System von Argus GeoTech als auch die Latte von NEDO gewisse Vor- und Nachteile haben, wird zunächst eine ausführliche Untersuchung durchgeführt, die klären soll, ob es Synergien aus beiden Konzepten gibt. Dabei soll insbesondere die Frage diskutiert werden, in welchem Umfang durch die Temperaturmessung bei der LUMISCALE thermisch bedingte Maßstabsfehler reduziert werden können. Im Falle eines positiven Ergebnisses ist eine Kooperation angedacht mit dem Ziel, eine selbstleuchtende Latte zu bauen, die einer Invarlatte in puncto Genauigkeit ebenbürtig ist und damit die Forderungen der DIN 18717 erfüllt.

Literatur:

Kepler, A., Meissel, A., Naterop, D.: *Automatische Bauwerksüberwachung mit motorisierten Digitalnivellieren*, In Brandstätter, Brunner, Schelling (Eds.): *Ingenieurvermessung 96*, Band 1, Dümmler Verlag, 1996

Brunner, F., Woschitz, H.: *Die selbstleuchtende Nivellierlatte*, AVN 03/2004.

Ryf, A.: *AlpTransit - Der Gotthard-Basistunnel - Geodätische Aspekte*, Präsentation an der ETH Zürich für Besucher der TU Dresden, 30.9.2004

www.nedo.com

Anschrift des Autors: Dipl.-Ing. Matthias Fuhrland
 TU Dresden
 Geodätisches Institut
 01062 Dresden

email: matthias.fuhrland@tu-dresden.de