

Ein automatisiertes Nivelliersystem für Überwachungsaufgaben

An Automated Levelling System for Monitoring Tasks

Julian Pimpi | Andreas Wehner | Otto Heunecke

Zusammenfassung

Digitalnivelliere mit einem Autofokus bieten die Möglichkeit zum automatisierten Feststellen von Höhenveränderungen in der Umgebung eines Standpunktes, wenn eine Drehvorrichtung für die Ausrichtung des Nivelliers auf die Barcodelatten integriert wird. Für die Drehung um die Stehachse kann man zum einen ein motorisiertes Tachymeter verwenden, wenn zusätzlich zu den Polarmessungen auf ein Prisma die Höhe eines Zielpunktes auch nivellitisch bestimmt werden soll. Zum anderen kann ein eigenständiges Drehmodul zur Anwendung kommen. Ein kosteneffizientes Messverfahren ergibt sich insbesondere für den Fall, dass die Barcodelatten in der erforderlichen Länge und Anzahl durch Druck auf Papier oder eine Folie selbst hergestellt werden können. Um ein durchgehendes Monitoring auch im Dunkeln zu ermöglichen, lassen sich LED-Streifen nutzen, die funkbasiert für den Zeitraum der Messung einer Latte eingeschaltet werden und diese ausleuchten. Gezeigt werden Entwicklungen und erste Ergebnisse, die im Geodätischen Labor der UniBw München entstanden sind.

Schlüsselwörter: beleuchtete Nivellierlatten, Drehmodul, gedruckter Barcode, Höhenüberwachung, Mikrocontroller

Summary

Digital levels with an autofocus offer the possibility of automated monitoring of height changes in the vicinity of a set-up point if a rotation device is integrated for the alignment of the instrument to the barcode rods. For the rotation of the standing axis, on the one hand a motorised total station can be used, if in addition to the polar measurements to a prism the height of a target point is also to be determined by levelling, on the other hand a stand-alone rotation module can be applied. A cost-efficient measuring method results if the barcode rods can be printed on paper or a foil in the required length and quantity. To enable continuous monitoring even in the dark, LED strips can be used, which are switched on radio-based during measurement each period for rod illumination. Developments and first results produced in the Geodetic Laboratory of the UniBw Munich will be shown.

Keywords: illuminated rods, height monitoring, micro controller, printed barcode, rotation module

1 Einleitung

Durch die Nachverdichtung, Modernisierung, Sanierung und Erweiterung der bebauten Umwelt ist die Notwendigkeit der Überwachung etwaiger geometrischer Veränderungen bei solchen Bauvorhaben stetig gewachsen. Der laufenden Beobachtung von Setzungen bzw. Hebungen mit dem unmittelbaren Versenden einer Warnung beim Erreichen von Schwellwerten kommt bei vielen Anwendungen eine besondere Bedeutung zu. Verschiedene, in der Praxis etablierte Messtechniken können genutzt werden, z. B. automatische Schlauchwaagen, die jedoch einen hohen logistischen Aufwand bei der Installation der Schläuche verlangen und im Allgemeinen einen nur eingeschränkten Messbereich bieten. Voraussetzung für die Nutzung optischer Messverfahren wie der Tachymetrie ist zunächst allein, dass von einem Standpunkt freie Sichtverhältnisse auf das Messobjekt gegeben sind. Die Erfassung von Veränderungen erfolgt diskretisiert durch Objektpunkte, die auf die Messungen zu Stützpunkten referenziert werden. Flächenorientierte optische Messverfahren, z. B. das Scanning, zur permanenten Überwachung mit Frühwarnoption finden in der Praxis bisher kaum Anwendung.

Aufgrund der hohen Flexibilität bei der Installation sowie den gegebenen Reichweiten und Genauigkeiten wird in der Praxis oft auf motorisierte Tachymeter mit automatisierter Zielfindung der an den Messobjekten angebrachten Prismen zurückgegriffen, die eine Punktbestimmung in allen drei Koordinatenkomponenten erlauben (u. a. Pink 2008). Robuste Messgeräte und eine Vielzahl leistungsfähiger Software führen zusammen mit den genannten Merkmalen dazu, dass man von dem Standardmessverfahren des Monitorings in der Ingenieurgeodäsie sprechen kann. Mit Hilfe der Teleskopkamera einer Image Assisted Total Station (IATS) wird alternativ zu angebrachten Prismen von Wiedemann et al. (2017) eine Methode entwickelt, bei der mittels Bilderkennung und mit einem Ausgleichungsverfahren die Kantenpositionen einer Barcodelatte detektiert werden. Unter Verwendung der Zenitwinkel sowie der Schrägstrecke werden die aufgenommenen Bilder entzerrt und so die Höhen der Zielpunkte berechnet.

Bei der Verwendung eines Rotationslasers können Präzisionslaserempfänger eingesetzt werden, die in einem begrenzten Messbereich die emittierten Strahlen der horizontalen Ebene detektieren. Geolaser Messtechnik (2021) gibt an, hiermit Höhen mit einer Messgenauigkeit von bis zu 0,02 mm bestimmen zu können. Nach der Marktreife von

Digitalnivellieren in den 1990er Jahren wurde eine Motorisierung solcher Messgeräte zur Drehung um die Stehachse für die Ausrichtung auf eine Barodelatte und eines zweiten aufgesetzten Schrittmotors für die Fokussierung in Abhängigkeit der Zielweite zuerst durch die Solexperts AG (1999) für die Geräte NA 3000 der Firma Leica und DiNi 10 der Firma Zeiss realisiert. Durch ein vorangehendes Teaching, d. h. die Bestimmung der Einstellungen der beiden Schrittmotoren je angebrachter Barodelatte am Messobjekt, lässt sich eine Automatisierung der Messzyklen umsetzen.

Bei Digitalnivellieren mit einer Autofokuseinrichtung, wie diese heute verfügbar sind, entfällt die Notwendigkeit der externen Einstellung der Fokussierung. Im Folgenden wird eine Entwicklung vorgestellt, die auf dem Digitalnivellier LS15, zugleich ein Kompensatornivellier, der Firma Leica Geosystems basiert. Für die Drehung um die Stehachse kann alternativ ein motorisiertes Tachymeter oder ein eigens entwickeltes Drehmodul benutzt werden. Die Ablesung einer Barodelatte ist nur bei einer adäquaten Beleuchtung möglich. Bei der Konzeption von Solexperts (1999) wurde hierzu ein starker Scheinwerfer verwendet, der auf dem sich drehenden Digitalnivellier montiert ist. Daneben wären hinterleuchtete Barodelatten mit einer Elektrolumineszenzfolie denkbar, wie diese mit den jeweiligen Codes für alle gängigen Digitalnivelliere speziell von der Firma Nedo (www.nedo.com) lieferbar sind. Teil der eigenen Entwicklung ist der Druck des Barcodes auf Papier oder eine Folie und die Beleuchtung der Latten mit einem LED-Streifen, der nur zu den konkreten Messzeitpunkten funkbasiert ein- und nach erfolgreicher bzw. abgebrochener Messung wieder ausgeschaltet wird.

2 Anforderungen an eine automatisierte nivellitische Höhenmessung

Um eine automatisierte nivellitische Höhenmessung zu ermöglichen, bei der von einem Gerätestandpunkt aus eine der jeweiligen Situation entsprechende erforderliche Anzahl von Barodelatten anzuzielen ist, muss das Nivellier auf einem steuerbaren Unterbau installiert werden. Entsprechend der maximalen Zielweite zwischen dem Nivellier und einer Latte ergibt sich die notwendige Einstellgenauigkeit der Ausrichtung. Für den Fall, dass der Code einer Nivellierlatte 2 cm breit ist und die Zielweite 50 m beträgt, ist eine Auflösung des Drehmotors bzw. eine Übersetzung von ca. 40.000 Schritten für den Vollkreis erforderlich. Besteht die Möglichkeit, eine Latte mit einem breiteren Code zu benutzen, reduziert sich die Anforderung an die Auflösung bzw. es können gegebenenfalls größere Zielweiten realisiert werden.

Weiterhin ist sicherzustellen, dass sich die voreingestellte Ausrichtung aus dem Teaching auch nach dem Durchlaufen vieler Messzyklen durch die ständigen Beschleunigungen und das Abstoppen nicht verändert. Ein langsames Drehen, was solche Effekte mindern würde, hat Rückwir-

Tab. 1: Ausgewählte Spezifikationen Leica LS15 (Leica Geosystems 2015)

Genauigkeit der Höhenmessung	$\sigma = 0,2/0,3$ mm pro km Doppel-nivellement mit Invarlatten $\sigma = 1$ mm pro km Doppel-nivellement mit Standardlatten
Genauigkeit der Distanzmessung	$\sigma = 15$ mm bei 30 m
Messbereich	Min. 1,8 m, max. 110 m
Messzeit	In der Regel 2,5 Sek./Pkt.
Zeit zum Fokussieren	Typisch 4 Sek.
Kompensator	Arbeitsbereich $\pm 9'$, Genauigkeit $\sigma = 0,3''$
Digitaler Kompass	$\sigma = 3$ gon

kung auf die Dauer eines Messzyklus in Abhängigkeit der anzuzielenden Punkte. Die Anforderung bedeutet, dass sich das Nivellier gegenüber dem Oberbau der Drehvorrichtung keinesfalls verdrehen darf bzw. dass der Schrittmotor der Drehvorrichtung und der Horizontalteilkreis des Nivelliers einen konstanten Versatz aufweisen müssen. Der Oberbau des Nivelliers ist folglich gegenüber dem Horizontalteilkreis zu fixieren.

Bei den Entwicklungsarbeiten wurden unter anderem die folgenden Zielsetzungen formuliert. Das System – im Weiteren NivMon genannt – soll

- ein manuelles oder alternativ Joystick-gesteuertes Verdrehen zum Ausrichten der Zielachse für das Teaching ermöglichen,
- ähnlich flexibel zum Einsatz gebracht werden können wie ein motorisiertes Tachymeter,
- robust und outdoor-tauglich sein,
- sich vielfach um die eigene Achse drehen können, ohne dass es zu Kabelaufwicklungen kommt,
- auch über längere Messzeiträume hinweg verlässliche Messergebnisse generieren.

Einige Spezifikationen des verwendeten Digitalnivelliers Leica LS15, die für die Eignung bei Monitoringaufgaben Relevanz haben, sind in Tab. 1 zusammengestellt.

3 Drehung via Tachymeter

Als drehbarer Unterbau für erste Studien zu einem automatisierten Nivellement wurde ein motorisiertes Tachymeter genutzt. Das Nivellier Leica LS15 wird mit einem Adapter auf dem Tragegriff des Tachymeters angebracht, siehe Abb. 1. Eine Arretierung an der Grundplatte des Nivelliers verhindert ein Verdrehen gegenüber dem Tachymeter. Befehle der Monitoringsoftware werden über ein Y-Kabel zusammen mit der Stromversorgung an eine

Steuereinheit in Form eines Datenrelais gesendet. Dieses weist dem Tachymeter die Positionierungsbefehle und dem Nivellier die Messbefehle zu. Die Energieversorgung beider Geräte erfolgt ebenfalls über das Relais. Antworten beider Geräte durchlaufen die Steuereinheit und werden an den Controller weitergeleitet.

Ein solcher Aufbau ist leicht umzusetzen und bietet prinzipiell auch die Möglichkeit, neben einer Messung auf Prismen die Höhenbestimmung zusätzlich nivellitisch durchzuführen. Nachteilig ist, dass Drehungen in immer der gleichen Richtung aufgrund der Verkabelung nicht möglich sind. Zudem ist der Aufbau windanfällig und dürfte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur in wenigen Fällen für die Praxis von Interesse sein. Dennoch stellt er eine der beiden Setup-Optionen des Systems NivMon dar.

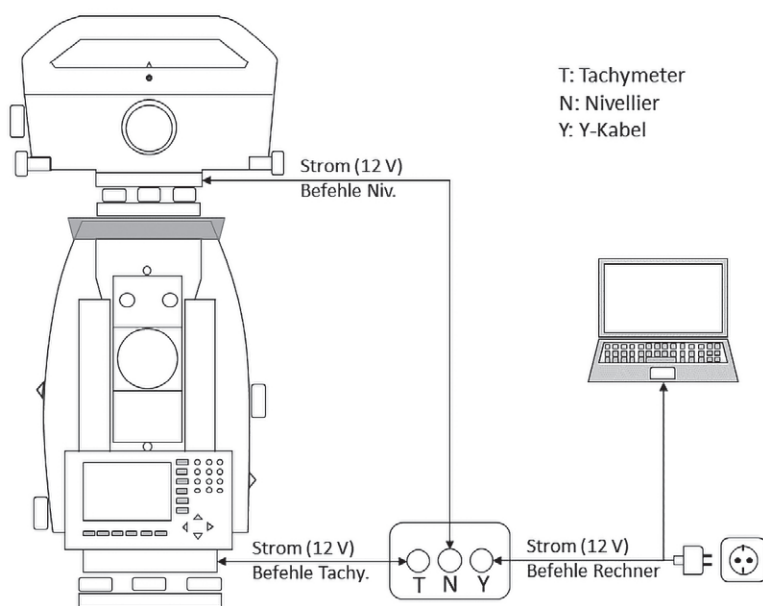


Abb. 1: Nivellier auf einem Tachymeter als Drehvorrichtung mit Steuereinheit

4 Das System NivMon

4.1 Konstruktion eines Drehmoduls

Um das Nivellier präzise um seine Stehachse zu drehen, wird ein herkömmlicher Nema 17 Schrittmotor verbaut, der in vielen Bereichen Anwendung findet, z. B. bei Consumer 3D-Druckern. Solche Motoren (siehe <https://de.nanotec.com>) sind in verschiedenen Ausführungen bezüglich Haltemoment, Schrittwinkel und Bauhöhe erhältlich. Hier wird ein Motor mit $0,9^\circ/\text{Schritt}$ verwendet. Der Schrittwinkel im Zusammenspiel mit der verwendeten Übersetzung und dem Motortreiber ist maßgeblich für die erreichbare Auflösung der Ausrichtung. Je nach Motortreiber können einzelne Schritte in bis zu 256 Mikroschritte unterteilt werden. Der Motor überträgt die Rotation mit Hilfe eines Zahnriemens auf den drehbaren Teller, der von einem Kugellager getragen wird. Da es bei einem Schrittwinkelverlust der Motoren oder Ungenauigkeiten bei der Übersetzung zu Veränderungen der Ausrichtung im Betrieb kommen kann, ist ein Sensor zur Erfassung des Horizontalwinkels erforderlich. Dazu wird ein magnetischer Encoder in Verlängerung der Stehachse des Nivelliers verbaut, der auch bei Stromausfall oder Neustart des Systems den Horizontalwinkel ausgibt. Die Spezifikation des digitalen Kompasses des LS15, siehe Tab. 1, reicht hierzu nicht aus.

Das Gehäuse des Drehmoduls wurde mit einem fused deposition modeling (FDM) 3D-Drucker hergestellt. Dieses Vorgehen erlaubt die zeitnahe und einfache Umsetzung von Designänderungen bei derartigen Entwicklungen. Abb. 2 zeigt das konstruierte Drehmodul im Schnitt und in einer perspektivischen Ansicht.

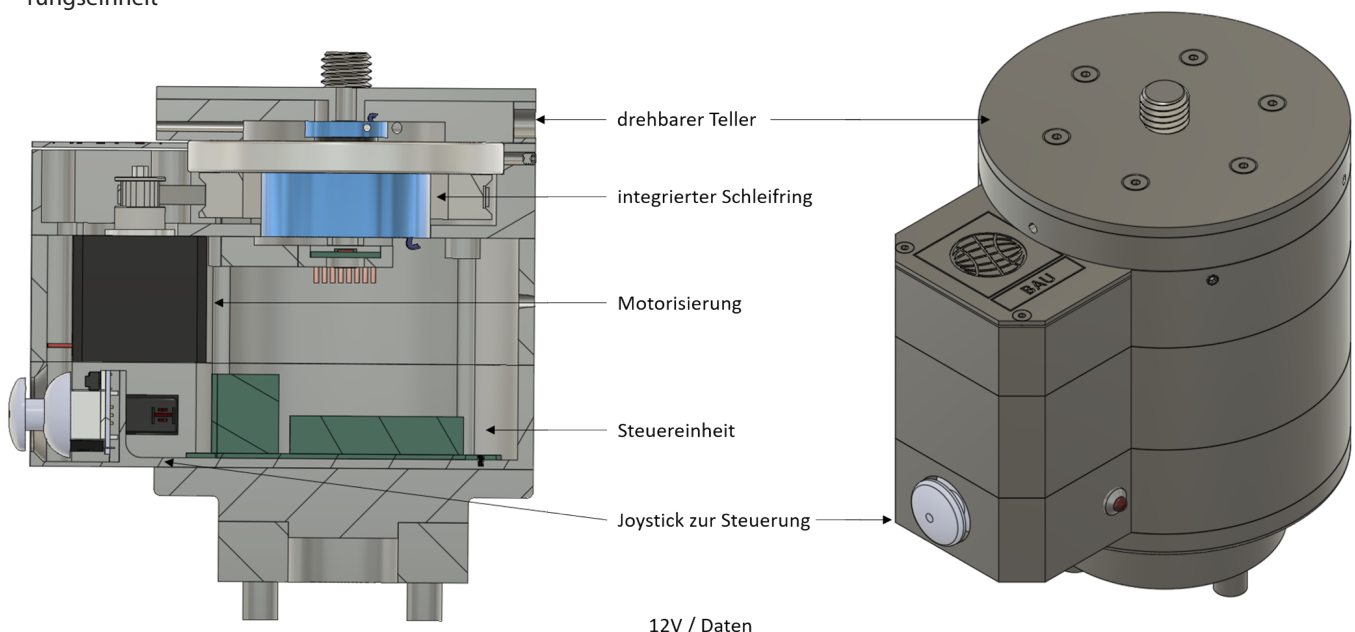


Abb. 2: Schnitt und perspektivische Ansicht des Drehmoduls

Aus Sicht der Mechanik ist das Lager wichtig, welches Ober- und Unterbau miteinander verbindet. Der Oberbau bzw. der drehbare Teller wird mittels Übersetzung durch den Motor verfahren. Die Steuereinheit, die gleichzeitig ein Datenrelais darstellt, befindet sich im Unterbau des Gehäuses. Um ein Aufwickeln der Kabel zu verhindern, wird ein Schleifring verwendet. Dieser leitet sowohl Strom als auch Daten von der Basis der Einheit zum drehbaren Oberbau des Moduls, auf dem das Nivellier mit einer 5/8"-Schraube fixiert wird. Für die Horizontierung wird die Dosenlibelle des aufgesetzten Nivelliers benutzt. Das Drehmodul wird mit dem Drei-Krallensystem in einen Standarddreifuß eingesetzt. Mit einem gegen Niederschläge geschützten, eingehausten Aufbau, wie sie bei Monitoringanwendungen mit Tachymetern üblich sind, ist das Drehmodul und damit das gesamte Messsystem outdoor-tauglich.



Abb. 3: Drehmodul mit Leica LS15

Das Gesamtsystem wird mit Hilfe eines Y-Kabels mit Strom versorgt. Für die Verbindung zum Nivellier wird ein kurzes Kabel mit LEMO-Steckern verwendet. Der RS232-Stecker des Y-Kabels ist mit dem Rechner verbunden, auf dem die zugehörige Monitoringsoftware installiert ist. Die Steuerung der Sensoren und des Motors erfolgt mit einem Mikrocontroller ESP32 der Firma Espressif Systems (www.espressif.com). Der Mikrocontroller verfügt neben zwei Prozessoren über kabellose Kommunikationsmöglichkeiten via Bluetooth und WLAN. Dadurch können Kommunikation, Berechnungen und Steuerungen simultan ablaufen. Da zu Beginn die Posen des Nivelliers »geteacht« werden müssen, wie bei einem Lernsatz eines Tachymeters, ist eine Möglichkeit zum Anfahren der Barcodelatten nötig. Der Schrittmotor kann deshalb auch über einen seitlich angebrachten Joystick betätigt werden. Ebenso ist es möglich, den Oberbau des Drehelements manuell zu drehen (siehe Abb. 3).

Das Nivellier kann mit dem Drehmodul einen Vollkreis in 18 Sekunden ausführen, dies entspricht einer Drehge-

schwindigkeit von 20°/Sek. In Abhängigkeit des Winkels zwischen zwei Messpunkten benötigt das Gesamtsystem für das Anfahren, Fokussieren und die Messung etwa 5 bis 10 Sekunden pro Punkt. Wenn die Zielweiten aufeinanderfolgender Messpunkte stark variieren, benötigt die Autofokusfunktion eine gewisse Zeit für die Umfokussierung. Bleibt der Messaufbau unverändert, wirkt sich ein Zielachsfehler nicht auf die ermittelten Höhenunterschiede eines Messpunktes aus. Da das Nivellier lediglich aufgesetzt und via LEMO-Stecker angeschlossen wird, kann es jederzeit auch für gewöhnliche Nivellements benutzt werden, sofern keine Monitoringanwendung ansteht.

4.2 Beleuchtung einer Nivellierlatte

Entsprechend den vorherrschenden Beleuchtungsverhältnissen muss eine Nivellierlatte zu den Messzeitpunkten erforderlichenfalls zusätzlich beleuchtet werden, um ein Ablesen zu ermöglichen. Versuche, dazu eine starke Lichtquelle am Digitalnivellier zu adaptieren, waren insbesondere bei größeren Zielweiten nicht zielführend, sodass nach einer anderen Lösung gesucht werden musste. Fokussierbare LED-Strahler auf dem Nivellier koinzident zur Zielachse haben lediglich bis ca. 15 m Zielweite eine ausreichende Ausleuchtung gezeigt. Zudem haben solche Strahler eine potenzielle Blendgefahr bei den Messaufbauten. Aus diesem Grund wurde eine Beleuchtung von Nivellierlatten mit seitlich adaptierten LED-Streifen entwickelt. Die Beleuchtung kann ferngesteuert werden, sodass sie nur zu den Messzeitpunkten eingeschaltet wird. Zudem kann diese Form der Beleuchtung bei beliebigen Nivellierlatten seitlich an deren Rahmen montiert werden.

Für die Beleuchtung werden RGB LED-Streifen WS2812 mit 60 LEDs/m verwendet, die auf jede gewünschte Länge zugeschnitten werden können. Die LEDs können einzeln adressiert und geschaltet werden, wodurch eine Anpassung auf die jeweilige Länge einer Barcodelatte ermöglicht wird. Die LED-Streifen lassen sich auf ein Aluminiumprofil kleben, welches am Rahmen einer Nivellierlatte anzubringen ist, siehe Abb. 4. Die Steuerung der LEDs wird durch einen Mikrocontroller ESP32 gewährleistet, der auch die Kommunikation mit der Dreheinheit übernimmt. Dies geschieht über eine Funkverbindung im Frequenzbereich von 2,4 GHz. Über das von Espressif Systems entwickelte Protokoll ESPNow können Daten mit einer Größe von 250 Bytes über weitere Distanzen als herkömmliches WLAN (bis zu 350 m) versendet werden. Die Stromversorgung an der Latte erfolgt über handelsübliche Leica Akkus GEB211, die eine Dauerbeleuchtung von mehreren Stunden erlauben würden. Zudem kann die Beleuchtung erforderlichenfalls mit einer externen Stromversorgung betrieben werden. Da die Beleuchtung nur kurzzeitig eingeschaltet wird und sich der LED-Streifen einige Zentimeter von der Latte entfernt befindet, sind etwaige Aufwärmeeffekte des Barcodes ohne praktische Auswirkungen.

Das Aktivieren und Deaktivieren der Beleuchtung erfolgt mit der Software, die zunächst einen Befehl an die Dreheinheit sendet. Diese leitet den Befehl an die jeweilige Barcodelatte weiter. Ist die Messung erfolgreich durchgeführt worden (die LEDs leuchten kurzzeitig grün), wird die Beleuchtung auf demselben Weg wieder ausgeschaltet. Wird nach Erreichen einer Zeitgrenze eine Messung abgebrochen (die LEDs leuchten kurzzeitig rot), wird ebenfalls ausgeschaltet. Um für längere Messeinsätze Strom zu sparen, kann die Beleuchtung auch abhängig von der Uhrzeit oder einem Lichtintensitätsmesser nur dann geschaltet werden, wenn dies notwendig ist.

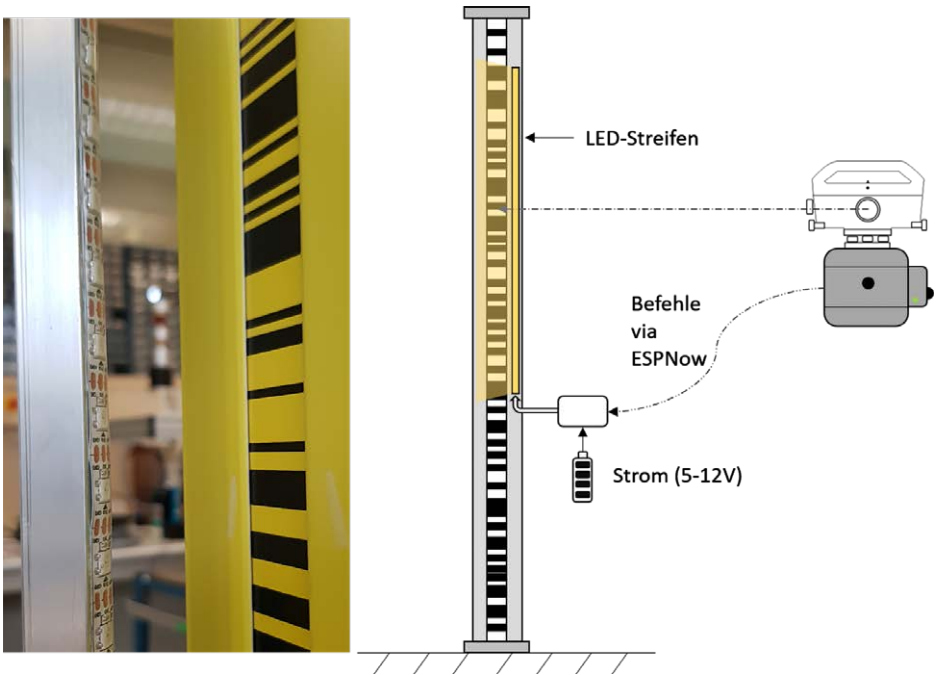


Abb. 4: Beleuchtung einer Barcodelatte mit einem LED-Streifen

4.3 Druck des Barcodes

Eine kostengünstige Möglichkeit zum Herstellen einfacher Nivellierlatten für Monitoringaufgaben besteht darin, den Barcode auf Papier oder eine Folie zu drucken. Ein solcher Druck, z. B. im ganzseitigen Format DIN A0, kann dann auf die gewünschten Längen und Breiten zurechtgeschnitten und auf einen geeigneten Träger, etwa eine Holzleiste, aufgeklebt werden. Der Maßstab einer solchen gedruckten Barcodelatte lässt sich auf dem Longitudinalkomparator des Instituts für Geodäsie bestimmen (siehe Heister 2002). Derartige Untersuchungen haben gezeigt, dass sich daraus erst bei Höhenänderungen im dm-Bereich ein Effekt ergibt, der der Messgenauigkeit entspricht. Naturgemäß sind bei der Verwendung solcher selbsthergestellter Latten die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit zu beachten, insbesondere bei Langzeitmessungen. Detaillierte Untersuchungen hierzu stehen gegenwärtig noch aus.

5 Systemsteuerung via LabView

Die Steuerung des Systems NivMon wird über die Software LabVIEW von National Instruments realisiert. LabVIEW (siehe www.ni.com) ist eine Systementwicklungssoftware für Anwendungen mit Zugriff auf Hardware im Bereich der Mess- und Steuerungstechnik über eine grafische Programmieroberfläche. Bei der Initialisierung erfolgt eine Abfrage, ob das Setup »Tachymeter« oder »Drehmodul« verwendet werden soll. Dementsprechend werden im weiteren Programmablauf die Befehle eingesetzt. Nachdem die Verbindung zwischen dem Rechner und dem Setup hergestellt wurde, können mit dem Teaching die jeweiligen

Messpunkte in eine Liste des Programms aufgenommen werden. Alternativ lassen sich bereits bestehende Listen laden. Die einzelnen Messpunkte besitzen die in Tab. 2 dargestellten Informationen und Abb. 5 zeigt das Interface der Software mit dem Verzeichnis der Messpunkte auf der linken Seite. Die Anzahl der Messpunkte ist praktisch beliebig, bestimmt aber die benötigte Zeit für einen Messzyklus.

Beim Starten der Software wird das gewünschte Messintervall abgefragt, was in einer sinnvollen Relation zur Anzahl der Messpunkte stehen muss. Daraufhin startet der Messvorgang. Zunächst wird das Nivellier auf den voreingestellten Horizontalwinkel ausgerichtet. Ist die Lattenbeleuchtung aktiv geschaltet, wird die zugehörige Nivellierlatte für die Dauer der eigentlichen Messung beleuchtet. Kommt es zu einem Fehlversuch bei der Messung, variiert

Tab. 2: Hinterlegte Informationen der Messpunkte

Bezeichnung	Zweck
Punktnummer	Identifizierung des Stütz- oder Objektpunktes
Höhe	Wert der gemessenen oder geladenen Nullmessung
Horizontalwinkel	Wert für die Ausrichtung des Nivelliers
Status	Aktivierung oder Deaktivierung eines Messpunktes
Licht ID	Steuerung der Kommunikation für beleuchtete Latten
Licht Status	Nur Punkte, deren Licht Status aktiviert ist, werden beleuchtet



Abb. 5: Programmoberfläche der Monitoringsoftware NivMon

die Software die Ausrichtung geringfügig und wiederholt die Messung. Wird schließlich ein voreingestelltes Zeitlimit erreicht, kommt es zum Abbruch und der nächste Messpunkt wird angefahren. Die Differenzen zwischen der Nullmessung und dem aktuellen Höhenwert werden für jeden Messpunkt unmittelbar visualisiert. Die Grafik dient nur der Darstellung der Höhenveränderungen während des Programmablaufs. Darüber hinaus werden die Messwerte für weitergehende Auswertungen in Dateien geschrieben, mit deren Hilfe etwaige Warnungen bei Schwellwertüberschreitungen zu generieren wären.

6 Evaluation des Systems NivMon

6.1 Messaufbau unter Laborbedingungen

Eine wichtige Fragestellung für die Praxistauglichkeit des Systems ist, ob mit dem Drehmodul die Einstellgenauigkeit der Ausrichtung ausreichend ist, um Latten auch bei größeren Zielweiten korrekt ablesen zu können. Für ein Tachymeter als Drehelement zur Ausrichtung – es wurde bei den Tests ein Leica TCRP 1203 verwendet – sind hier keine

Schwierigkeiten zu erwarten. Die Erprobung der beiden Setups »Tachymeter« und »Drehmodul« fand parallel mit zwei Leica LS15 im Labor des Instituts für Geodäsie statt, um die Qualität der Ergebnisse der beiden Varianten zu evaluieren und gegenüberzustellen. In einem Zeitraum von annähernd vier Tagen wurden alle fünf Minuten drei Ziele in unterschiedlicher Entfernung gemessen, siehe Tab. 3.

Während dieses Zeitraumes gab es im Labor geringe Temperaturschwankungen von rund 1 °C. Die Nivellierlatten wurden durchgehend beleuchtet, die hinteren beiden waren auf dem Linoleum-Fußboden, die vordere auf einem Schrank aufgesetzt. Als Gerätestandpunkte wurden Messpfeiler im Labor genutzt. Während der Messungen fand teilweise der übliche sonstige Laborbetrieb durch die Mitarbeiter statt und insofern waren reale Umgebungsbedingungen gegeben.

In dem gegebenen Messzeitraum wurden durch beide Setups auf jede der drei Latten 1061 Messungen durchgeführt. Es kam dabei zu keinerlei Ausfällen bzw. Fehlmessungen. In Abb. 6 sind die Ergebnisse für das Drehmodul (D) und das Tachymeter (T) dargestellt. Die blauen Linien zeigen die Abweichungen der Messwerte gegenüber der Nullmessung, wobei die Einzelmessungen als Punkte dargestellt sind. Die durchgehende Linie ist ein gleitendes Mittel, bestehend aus 10 Messwerten. Mit der roten Linie ist die Variation der Raumtemperatur wiedergegeben, gemessen an der jeweiligen Nivellierlatte.

Die obere Darstellung der Messungen im Nahbereich mit einer Zielweite von 2,5 m zeigt kleinere Abweichungen zwischen den beiden Systemen, die jedoch mit weniger als maximal 0,01 mm bezüglich der Funktionsweisen vernachlässigbar sind. Die anderen beiden Darstellungen zeigen die Messungen auf Nivellierlatten mit Zielweiten von 15 m und 30 m. Es ist eine gewisse, in ihrer Auswirkung

Tab. 3: Messaufbau zur Erprobung im Labor

Zielweite [m]	Richtung [gon]	Typ der Barcodelatte
2,5	0,0	GWCL 60 Invar Stab
15	26,9	Folien-Barcode auf Alurahmen
30	399,0	3 m Invarlatte

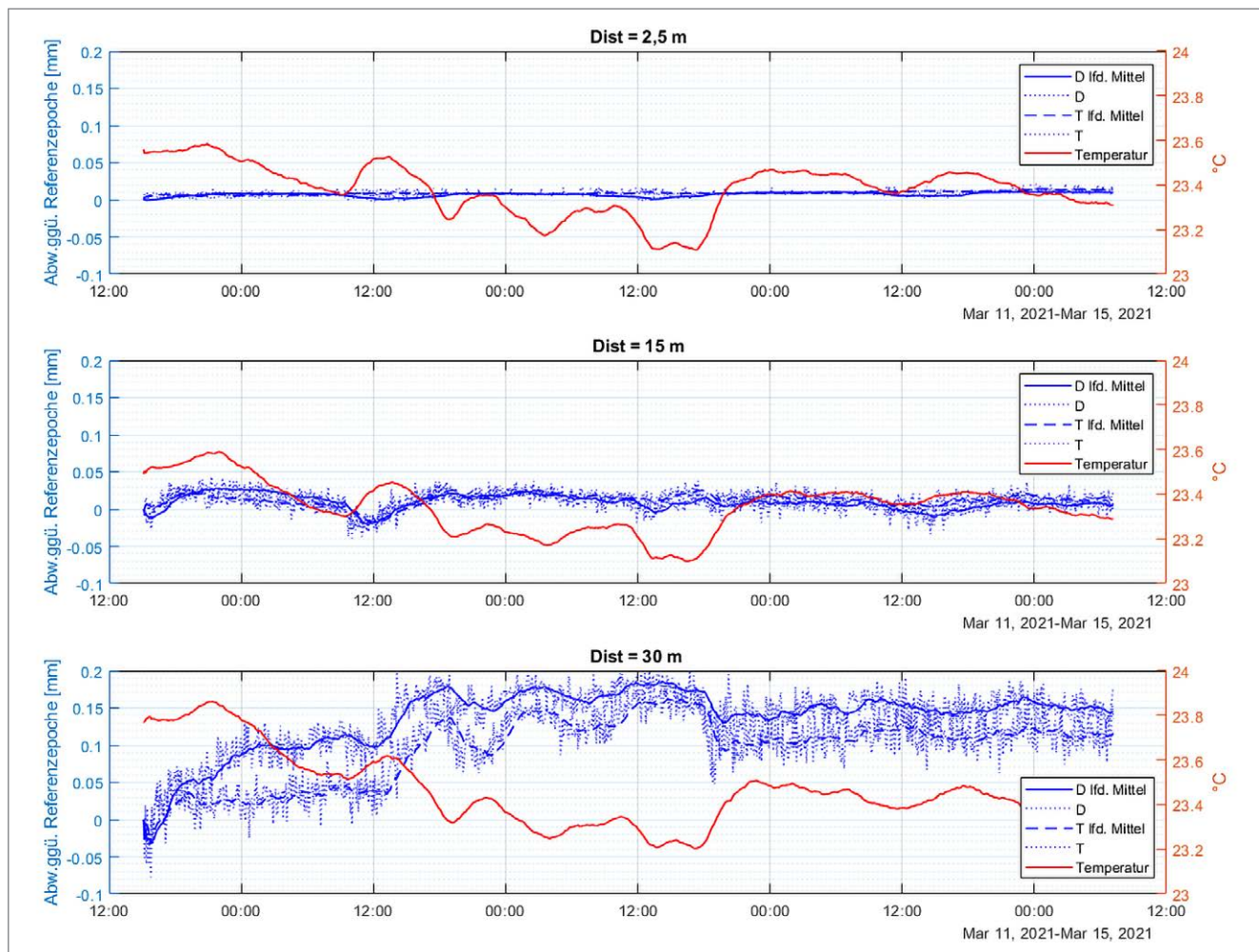


Abb. 6: Abweichungen gegenüber der Referenzepoche

jedoch geringe Korrelation zwischen der Temperatur und den Messergebnissen zu erkennen, insbesondere in der unteren Darstellung. Eine Registrierung der Temperaturverläufe bei den Anwendungen in der Praxis ist daher sehr zu empfehlen im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse. Die Versuchsmessungen zeigen zudem, dass die beiden Setups nahezu identische Ergebnisse produzieren und dass das Drehmodul gegenüber dem Tachymeter bei der Ausrichtung keine qualitativen Nachteile besitzt.

6.2 Test der beleuchteten Latten

In einem weiteren Versuchsaufbau im Labor wurde die Beleuchtung der Latten mit den LED-Streifen erprobt. Dazu wurden zwei 2m-Invar-Nivellierlatten – in Abb. 7 mit P1 und P2 bezeichnet – entsprechend bestückt. Die Tests erfolgten in einem Zeitraum von ca. 63 Stunden von Freitag bis Montag in einem Intervall von 10 Minuten. Parallel dazu wurde die ambiente Umgebungsbeleuchtung in einem Intervall von 5 Sekunden aufgezeichnet. Diese zugehörigen Messwerte sind ohne Einheiten und liefern lediglich eine Aussage über die Lichtverhältnisse im Sinne von hell (hohe Werte) und dunkel (niedrige Werte, insbesondere während der Nacht).

In Abb. 7 sind die Ergebnisse für die Höhenmessungen zusammengestellt. Der gesamte Zeitraum ist oben dargestellt. Es wurden 381 Messwerte bei unterschiedlichen Umgebungslichtverhältnissen aufgezeichnet, da in den Raum über Fenster Tageslicht einfiel. Dabei kam es zu keinen Messausfällen oder erkennbaren Unterschieden bezüglich des Streuverhaltens, was die Funktionalität der Lattenbeleuchtung bestätigt. Die untere Darstellung in Abb. 7 zeigt den Ausschnitt der Messreihen über 11 Stunden von 20.00 Uhr bis 07.00 Uhr am 18.04. Hier ist zu erkennen, dass die Umgebungsbeleuchtung während der Nacht leicht ansteigt, sobald die Lattenbeleuchtung für eine Messung kurzzeitig eingeschaltet ist.

7 Fazit

Es wurde ein System zur automatisierten Überwachung von Höhenveränderungen mit einem Digitalnivellier entwickelt und unter Laborbedingungen getestet. Mit einer Beleuchtung über LED-Streifen bietet das System die Möglichkeit, auch bei Dunkelheit Messungen durchzuführen. Ein Drucken des Barcodes auf Folien ermöglicht es, für viele Anwendungen Barcodelatten in frei wählbarer

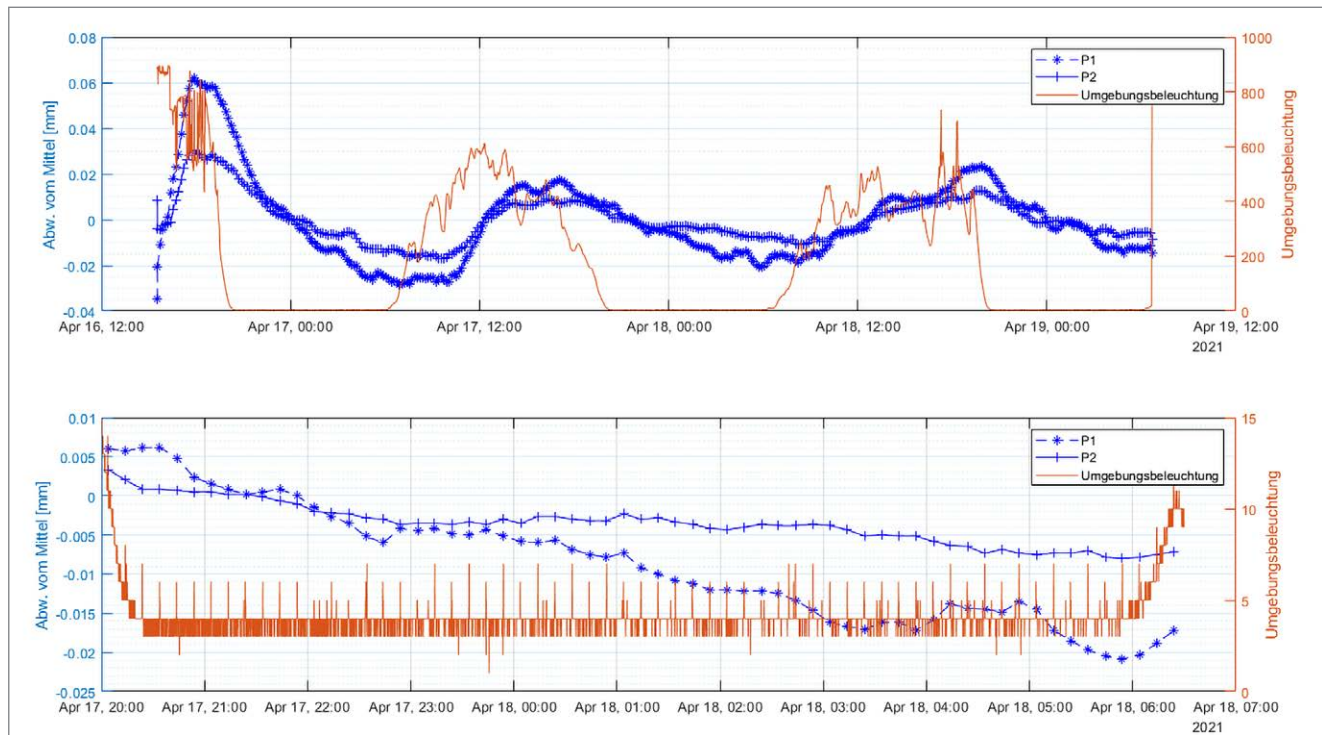


Abb. 7: Messungen mit beleuchteten Nivellierlatten

Breite und Länge kostengünstig herstellen zu können. Ein Druck des Barcodes auf Papier oder Folie bedeutet zwar das äußerst kostengünstige Herstellen von Latten, jedoch bestimmt das Anwendungsszenario mit seinen Genauigkeitsanforderungen und Umgebungsbedingungen, ob mit solchen einfachen Barodelatten eine Überwachung sinnvoll gestaltet werden kann. Hierzu sind weitergehende Untersuchungen der Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf solche Latten durchzuführen.

Die Installation und Messanlage des Systems NivMon bietet eine vergleichbare Flexibilität wie bei einem motorisierten Tachymeter. Anders als bei einem Tachymeter sind die Reichweiten auf maximal ca. 50 m zu begrenzen, jedoch erreicht man für Höhenunterschiede bessere Genauigkeiten als bei der Tachymetrie. Die Genauigkeit der Bestimmung eines Höhenunterschiedes vom Gerätestandpunkt zu einem Messpunkt entspricht der eines Seitenblicks beim Nivellement. Es ist eine vergleichbare Genauigkeit zu erreichen, wie sie mit automatisierten Schlauchwaagen möglich ist. Die Anzahl der Messpunkte ist beliebig festzulegen, bestimmt aber die Dauer eines Messzyklus. Die Messwerte werden wie bei motorisierten Tachymetern sequenziell, also nicht streng synchron erfasst. Der Messbereich zur Feststellung von Höhenänderungen wird allein durch die Länge der Barodelatten beschränkt. Für Bewertungen und etwaige Warnungen stehen die Messwerte unmittelbar, de facto in Echtzeit, zur Verfügung.

Literatur

- Geolaser Messtechnik (2021): Laserempfänger LE-72. <https://geo-laser.de/de/product/le-72/>.
- Heister, H. (2002): Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 11-12, 380–385.
- Leica Geosystems (2015): Leica LS Digitalnivelliere – Datenblatt. <https://leica-geosystems.com/de-de/products/levels/digital-levels/leica-ls15-and-ls10>.
- Pink, S. (2008): Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieurgeodätische Überwachungsnetze. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der UniBw München, Heft 83.
- Solexperts AG (1999): www.solexperts.com/images/PDF_DEUTSCH/02_geot_DE/de_16_geo_mot_dini_zeiss_v1.pdf.
- Wiedemann, W., Wagner, A., Wunderlich, T. (2017): Nivellieren mit bildunterstützten Totalstationen. Beiträge zum 18. Int. Kurs für Ingenieurvermessung. Graz, Herbert Wichmann Verlag, 47–61.

Kontakt

Julian Pimpi, M.Sc. | Andreas Wehner, M.Sc. |
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg
julian.pimpi@unibw.de
andreas.wehner@unibw.de
otto.heunecke@unibw.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.