

# Nivellieren mit bildunterstützten Totalstationen

Wolfgang WIEDEMANN, Andreas WAGNER und Thomas WUNDERLICH

*Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als „peer reviewed paper“ angenommen.*

## 1 Einleitung

Nahezu alle Hersteller von Totalstationen verfügen heutzutage über Instrumente mit integrierten Kameras in ihrem Produktportfolio. Diese Geräte werden im Allgemeinen als bildunterstützte Totalstationen bzw. Image Assisted Total Stations (IATS) bezeichnet. Derzeit werden die Bilder der integrierten Kameras nur bedingt für die Gewinnung tatsächlicher Messwerte herangezogen; meist dienen diese nur zur Dokumentation und zur ergonomischeren Gestaltung der alltäglichen Messabläufe. Die Onboard-Applikationen erlauben es, in einer Art Augmented Reality, die Bilder bzw. das Live-Video mit Mess- und Planungsdaten zu überlagern. Dies ist möglich, da die Bilder über die Stationierung des Instrumentes und die Winkelabgriffe – eine sorgfältige Kalibrierung vorausgesetzt – direkt georeferenziert und orientiert sind. Die Aufnahmen der IATS lassen sich auch an eine Fernsteuerung übertragen, wodurch die Bedienung im Ein-Personen-Betrieb erheblich erleichtert wird.

Neben den Funktionen, die von den Herstellern bereitgestellt werden, ermöglichen die hochauflösenden Farbbilder einer IATS die Entwicklung neuer Messmethoden, die Informationen aus den Bildern ableiten und nutzen. Die Aufnahmen einer Teleskopkamera, welche die Sicht durch das Fernrohr auf einen Kamerachip abbilden, sind dabei besser geeignet als die Bilder einer Übersichtskamera. Die starke optische Vergrößerung durch das Teleskop ermöglicht ein höheres Auflösungsvermögen im Bild, d. h. eine geringere räumliche Fläche auf dem Objekt, die auf einem Pixel abgebildet wird. Die Anwendungsfelder von IATS reichen von Geo-Monitoring (WAGNER et al. 2014), über Structural Health Monitoring (EHRHART & LIENHART 2015) bis zu industrieller Messtechnik (GUILLAUME et al. 2012).

Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode zum Ablesen digitaler Nivellierlatten mittels IATS präsentiert. Im Bild der Teleskopkamera wird nach mehreren Vorverarbeitungsschritten die Nivellierlatte mit einem Ausgleichungsverfahren über Kantenpositionen hochgenau abgelesen. Startwerte für die unbekannte Höhe und Skalierung liefert ein vorgeschaltetes Korrelationsverfahren. Mit dieser Methode, die universell für alle gängigen Nivellierlatten-codes eingesetzt werden kann, erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten und Messmethoden einer IATS. So lassen sich z. B. die Höhe des Instrumentenhorizonts gegenüber einem Bezugspunkt hochgenau bestimmen und Ablesefehler minimieren. Ebenfalls werden die Möglichkeiten für Überwachungsmessungen erweitert. Hier bieten die motorisierten Achsen der Totalstation einen Vorteil gegenüber Standardnivellieren, da es diese erlauben, automatisiert Ziele unter verschiedenen Richtungen exakt anzufahren. Des Weiteren schafft die flächenhafte Auswertung des Nivellierlattenbildes zusätzliche Robustheit bei der Höhenbestimmung. Das Lattenbild kann – anders als bei der punktuellen Messung auf Prismen – auch bei teilweiser Verdeckung decodiert werden.

## 2 Digitalnivelliere

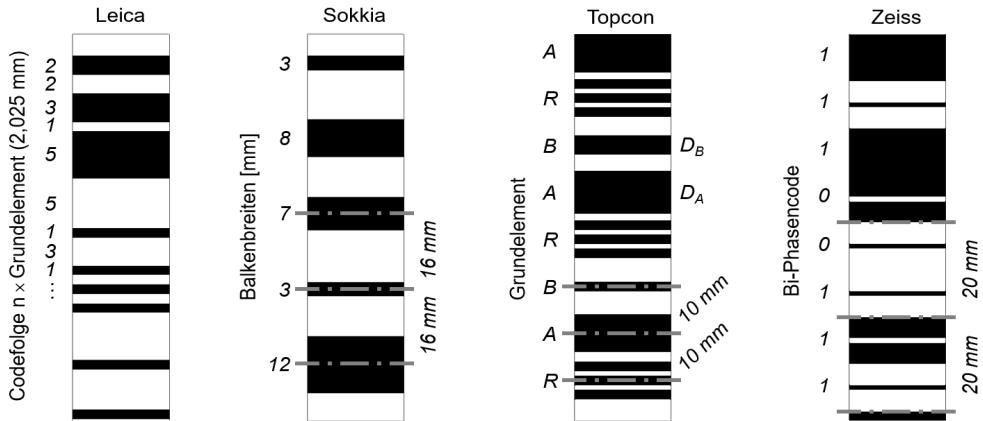
Das Nivellement ist das Standardverfahren, um hochgenaue Höhenübertragungen zu realisieren. Verwendet wird dazu ein Nivellier, das im Wesentlichen aus einem Teleskop besteht und über eine optisch-mechanische Neigungskompensation eine sehr exakt horizontierbare Ziellinie erzeugt. Digitale Nivelliere beinhalten zusätzlich einen Sensor zur Bildaufnahme (meist einen CCD-Zeilensensor) und elektronische Komponenten für die Bildanalyse, die das automatische Ablesen von digitalen Barcode-Nivellierlatten ermöglichen. Die klassische (analoge) E-Einteilung wird dabei durch einen vom Hersteller abhängigen digitalen Barcode ersetzt.

Für Nivellements erster Ordnung oder für andere hochgenaue Ingenieurvermessungsprojekte kommen Präzisionsnivelliere in Kombination mit präzisen Nivellierlatten zum Einsatz, deren Genauigkeit mit einer Standardabweichung von  $\leq 0,5$  mm/km Doppelnivellement angegeben wird. Um diese Genauigkeit erreichen zu können, wird der Lattencode üblicherweise auf einen Invarstreifen aufgebracht, der einen minimalen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $< 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) aufweist. Zur Gewährleistung hochgenauer Ergebnisse und/oder im Rahmen von Qualitätsmanagementanforderungen wie der DIN EN ISO 9001 ist eine regelmäßige Inspektion der Messausrüstung erforderlich. Nationale und internationale Standards, z. B. DIN ISO 12858-1, definieren Parameter, die in periodischen Kalibrierungen zu untersuchen sind. Für Invar-Nivellierlatten sind dies beispielsweise der Lattenmaßstab, die Lattenteilung (Einzelstrichverbesserungen), der Nullpunktfehler und der Temperatureausdehnungskoeffizient. Diese Parameter können mittels spezieller Kalibriereinrichtungen, wie z. B. die des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München (WASMEIER & FOPPE 2006), bestimmt werden. Mit der in diesem Beitrag vorgestellten Methode lassen sich diese in Prüfeinrichtungen bestimmten Korrekturwerte bei der Auswertung berücksichtigen.

Nachfolgend werden – zur Abgrenzung gegenüber dem hier vorgestellten Algorithmus – die Verfahren der gängigen Gerätehersteller vorgestellt.

### 2.1 Digitale Nivellierlatten

Jeder Hersteller digitaler Nivellierausrüstungen benutzt ein eigenes Modulations- und Analyseverfahren und verwendet dazu ein eigenes Barcodemuster auf der Nivellierlatte. Hauptgründe hierfür liegen in Patentrechten an den einzelnen Lösungen (INGENSAND 2005), aber auch in wirtschaftlichen Gründen, z. B. durch den zusätzlichen Verkauf der entsprechenden Nivellierlatten bzw. der Lizenzrechte zur Fertigung. Zurzeit sind vier verschiedene Ausführungen auf dem Markt erhältlich: digitale Nivellierlatten und Codierungen der Firmen Leica, Sokkia, Topcon und Trimble (Zeiss), die in Abbildung 1 vergleichend dargestellt sind. Die Codemuster, die in Längsrichtung auf den Nivellierlatten aufgebracht sind, werden bei einer Ablesung mit einem CCD-Zeilensensor in eine digitale Intensitäts- und Positionsinformation umgewandelt. Um eine zuverlässige Auswertung auch unter ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen zu gewährleisten, wird in jeder Realisierung eine kontrastreiche Abgrenzung der Balken vor dem Hintergrund (schwarz-weiß oder schwarz-gelb) verwendet.



**Abb. 1:** Verschiedene Nivellierlattencodierungen und deren Aufbau

Die Firma Leica Geosystems verwendet eine aperiodische pseudostochastische (binäre) Codesequenz. Die Elemente des Barcodes sind so angeordnet, dass bereits kurze Abschnitte der Codesequenz eindeutig sind. Die einzelnen Balken bestehen aus einem ganzzahligen Vielfachen eines 2,025 mm breiten Baselements (Abb. 1). Das breiteste auftretende Codeelement besteht aus 15 Baselementen, d. h. es besitzt eine Breite von 30,375 mm. Die gesamte Codefolge ist über eine Länge von 4050 mm eindeutig, wodurch auch die maximale Länge dieser Art von Nivellierlatten definiert ist.

Der Sokkia Random Bi-directional Code folgt einem konstanten Grundintervall von 16 mm zwischen den Mitten zweier benachbarter Balken (Abb. 1). Die Balkenbreiten variieren zwischen sechs verschiedenen Werten: 3, 4, 7, 8, 11 und 12 mm. Wie bei den Leica Nivellierlatten ist die Codefolge so gewählt, dass bereits ein kurzer Bereich den Lattenabschnitt eindeutig definiert. Für größere Entfernungen werden nur noch drei verschiedene Breiten in der Auswertung unterschieden, da nicht mehr zwischen den nahe beieinanderliegenden Breiten (3 und 4 mm, usw.) unterschieden werden kann.

Digitale Nivellierlatten der Firma Topcon sind mit einer Codierung versehen, die aus drei verschiedenen Grundelementen – *R*, *A* und *B* – besteht. Das Referenzmuster *R* ist ein sich wiederholendes Balkentripel konstanter Breite (Abb. 1). Die Balkenbreiten (1 – 10 mm) der benachbarten Codeelemente *A* und *B* entsprechen den Amplituden zweier Sinusfunktionen unterschiedlicher Wellenlängen mit einem zusätzlichen Phasenversatz zwischen *A* und *B*. Das resultierende Gesamtmuster ist bis 11,4 m eindeutig.

Der Lattencode der Firma Zeiss (jetzt Trimble) besteht aus einem regelmäßigen Grundintervall von 20 mm breiten weißen (gelben) bzw. schwarzen Elementen (Abb. 1). Diese werden vom sog. Bi-Phasencode überlagert, der – je nach Wertigkeit – in der Mitte jedes Elements einen zusätzlichen Hell-Dunkel-Wechsel einführt (Null-Bit) oder das Grundelement unverändert lässt (Eins-Bit). Die ergänzende Information ist vergleichbar mit der Nummerierung auf analogen Nivellierlatten und dient der Intervallzuordnung. Für Zielweiten unter 6 m ist ein zusätzlicher Feincode mit 1 mm breiten Balken vorhanden.

Weitere Details zu den Codierungen sind u. a. in DEUMLICH & STAIGER (2002) oder INGENSAND (2005) zu finden.

## 2.2 Decodierung

Über die Decodierung des Lattenbildes wird der horizontalen Ziellinie des Instruments eine Höhenablesung zugeordnet, sowie die Zielweite ermittelt. Codierungen mit einem konstanten Grundabstand  $p$  (Sokkia, Topcon & Zeiss) können aus dessen Abbildungsgröße  $p'$  Maßstab und Entfernung der Nivellierlatte berechnen. Die Auswerteverfahren von Sokkia und Trimble bestimmen anschließend in einer Feinmessung das Intervall, auf welches das Pixel des Strichkreuzes zeigt. Diese Höhenzuordnung erfolgt über Zusatzinformation aus dem Bi-Phasencode, bzw. aus der Codierung mittels der Strichbreiten. Digitalnivelliere der Firma Topcon verwenden eine Fast Fourier Transformation (FFT), um die Frequenz und Phasenlage der aufgebrauchten Sinusfunktionen und damit die Höhe zu ermitteln. Die Distanz kann aus der Bildgröße des Grundabstands oder der Frequenz des Referenzcodes  $R$  berechnet werden. Leica Nivelliergeräte nutzen ein Korrelationsverfahren zur Lösung der Unbekannten. Die Stellung der Fokussierlinse liefert einen ersten Näherungswert für die Entfernung. In einer Grobkorrelation wird das aufgenommene auf 1-Bit reduzierte Messsignal mit einem bekannten Referenzmuster verglichen. Eine nachfolgende Feinoptimierung ermittelt dann in einem reduzierten Suchbereich im 8-Bit Signal in feinerem Raster das Maximum der Korrelationskoeffizienten.

## 3 Methodik

Das Messprinzip der Digitalnivelliere ist auf bildunterstützte Totalstationen (IATS) übertragbar und erweitert deren Anwendungsmöglichkeiten. Als Unterschiede zwischen beiden Geräteklassen verbleiben allerdings das Arbeitsprinzip des Kompensators und das bewegliche Teleskop. Im Fall eines Nivelliers wird das Fernrohr annähernd horizontal ausgerichtet; ein am Schwerfeld ausgerichteter mechanischer Kompensator sorgt für eine horizontale Zielachse. Im Fall der IATS erlaubt das Teleskop eine zusätzliche Rotation der Zielachse in der Vertikalebene und damit auch nicht-horizontale Visuren. Die Neigung des Teleskopes lässt sich über den Vertikalwinkelabgriff erfassen. Mit aktiviertem elektronischen Kompensator beziehen sich diese ausgelesenen Winkel ebenfalls auf die Lotrichtung.

Das hier vorgestellte Verfahren mit IATS basiert auf dem Vergleich der im Bild detektierten Barcodekanten (Hell-Dunkel-Wechsel) mit den Sollhöhen des Referenzcodes. Das Verfahren ist universell für alle gängigen Nivellierlattencodes einsetzbar, solange der Referenzcode bekannt ist. Der Messablauf besteht im Wesentlichen aus den gleichen Arbeitsschritten wie mit einem Nivellier:

1. Datenerfassung
2. Bildvorverarbeitung
3. Decodierung
4. Berechnung des Höhenunterschieds

Die Datenerfassung besteht aus der Bildaufnahme der Nivellierlatte und dem Auslesen zusätzlich relevanter Sensorwerte (Kap. 3.1). In der Bildvorverarbeitung werden die geometrischen Abbildungsfehler der Kamera und eine eventuelle perspektivische Verzerrung des Bildes korrigiert, sowie die relevanten Informationen aus der Aufnahme extrahiert (Kap. 3.2). Die anschließende Decodierung ist für eine effiziente Berechnung in einen zweistufigen Prozess geteilt. Mit einer korrelationsbasierten Grobsuche (Kap. 3.3) wird der im Bild sichtbare

Codeausschnitt bestimmt. In einem zweiten Schritt werden subpixelgenau Kanten im Grauwertbild berechnet und mit den Sollkanten des Referenzmusters verglichen (Kap. 3.4). Dies erfolgt in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Näherungswerten aus der korrelationsbasierten Grobsuche. Da die Aufnahmen nicht zwingend in horizontaler Fernrohrlage erfolgen, ist für die Bestimmung der endgültigen Höhenablesung noch eine zusätzliche trigonometrische Korrektur in Abhängigkeit von Objektdistanz und Vertikalwinkel notwendig (Kap. 3.5).

Die einzelnen Prozessierungsschritte, um aus den IATS-Daten zu einer Höhenablesung zu gelangen, werden im Folgenden detailliert beschrieben.

### 3.1 Datenerfassung

Für die Bildaufnahme muss die IATS auf die Nivellierlatte ausgerichtet werden. Dies erfolgt im einfachsten Fall durch manuelles Anzielen; bei bekannter Lattenposition – z. B. bei dauerhaftem Monitoring – kann dies auch vollautomatisch durch Anfahren der entsprechenden Winkelwerte mit den motorisierten Achsen der Totalstation erfolgen. Anschließend wird das Fernrohr auf die Nivellierlatte fokussiert. Dies kann ebenfalls manuell durch den Bediener oder vollautomatisch über die Autofokus-Funktion des Instrumentes erfolgen. Die Stellung der Fokussierlinse wird im Gerät abgefragt und gespeichert, da die Kalibrierparameter der Teleskopkamera abhängig von der Fokussstellung sind (KNOBLACH 2009; WASMEIER 2009). Im Gegensatz zu (Leica-) Digitalnivellieren wird dieser Wert nicht zur Berechnung einer Näherungsdistanz verwendet. Stattdessen wird die Zielweite mittels reflektorloser Distanzmessung bestimmt, die eine höhere Genauigkeit von ca.  $\pm 2$  mm liefert. Eine Bildaufnahme bei gleichzeitiger Ablesung und Speicherung des Vertikalwinkels schließt den Prozess der Datenerfassung ab. In Kombination mit den a priori bestimmten Kalibrierparametern der Kamera und den erfassten Daten Fokussstellung, Horizontaldistanz und Vertikalwinkel ist das Bild vollständig im Raum orientiert.

### 3.2 Bildvorverarbeitung

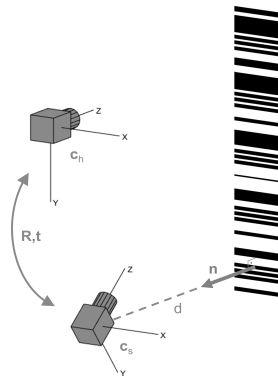
Eine Verzeichnung des Bildes, hervorgerufen durch geometrischer Abbildungsfehler des optischen Systems, wird mit a-priori bestimmten Kalibrierparametern korrigiert. Werden die Bilder unter einer nicht-horizontalen Ausrichtung der IATS (Vertikalwinkel  $\zeta \neq 100$  gon oder  $\zeta \neq 300$  gon) aufgenommen, wird der Lattencode zusätzlich perspektivisch verzerrt auf dem Kamerasensor abgebildet. Dieser Verzerrungseffekt kann durch eine Homographie  $\mathbf{H}$  (projektive Transformation) beschrieben werden. Ein Punkt  $\mathbf{p}_s$ , aufgenommen von der Kameraposition  $\mathbf{c}_s$  mit nicht-horizontaler Fernrohrausrichtung, wird im Bild einer virtuellen horizontalen Kamera  $\mathbf{c}_h$  an der Position  $\mathbf{p}_h$  abgebildet, vgl. HARTLEY & ZISSERMAN (2010):

$$\mathbf{p}_h = \mathbf{K} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{p}_s \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{R} - \frac{1}{d} \mathbf{t} \mathbf{n}^T \quad (2)$$

Mit der – aus einer Kamerakalibrierung – bekannten inneren Orientierung der Kamera  $\mathbf{K}$ , dem Normalenvektor  $\mathbf{n}$  (senkrecht zu einer perfekt ausgerichteten Nivellierlatte), der Horizontalstrecke  $d$ , sowie der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und dem Verschiebungsvektor  $\mathbf{t}$  zwischen re-

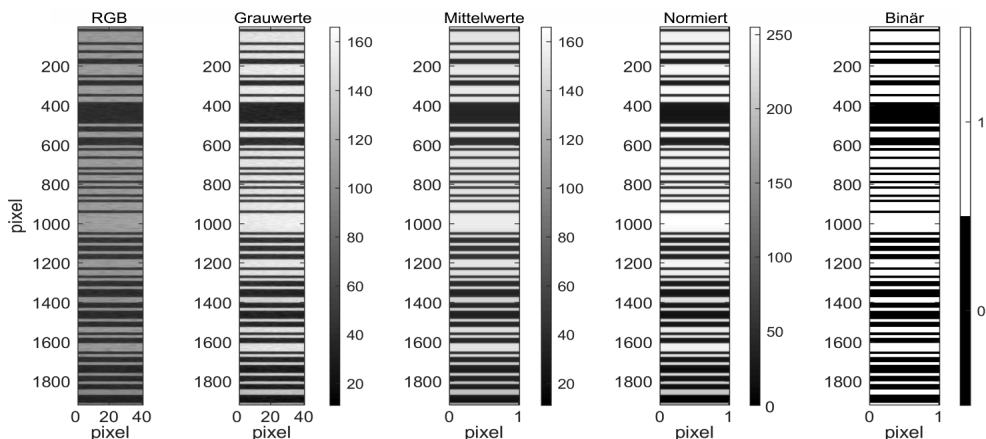
aler und virtueller Kameraausrichtung kann das Bild so entzerrt werden, wie es für eine horizontal ausgerichtete Kamera erscheinen würde (Abb. 2). Die o. g. Parameter werden aus dem abgegriffenen Vertikalwinkel, der gemessenen Distanz zur Nivellierlatte und den Kalibrierwerten berechnet. Es sei darauf hingewiesen, dass sich diese Korrektur nur auf die perspektivische Verzerrung bezieht, die von der Kameraposition hervorgerufen wird. Verzerrungen, die auf eine verdrehte (Rotation um die vertikale Achse) oder verkippte Nivellierlatte zurückzuführen sind, bleiben unberücksichtigt.



**Abb. 2:**

Entzerrung des Nivellierlattenbildes: notwendige Parameter zur Berechnung der Homographie

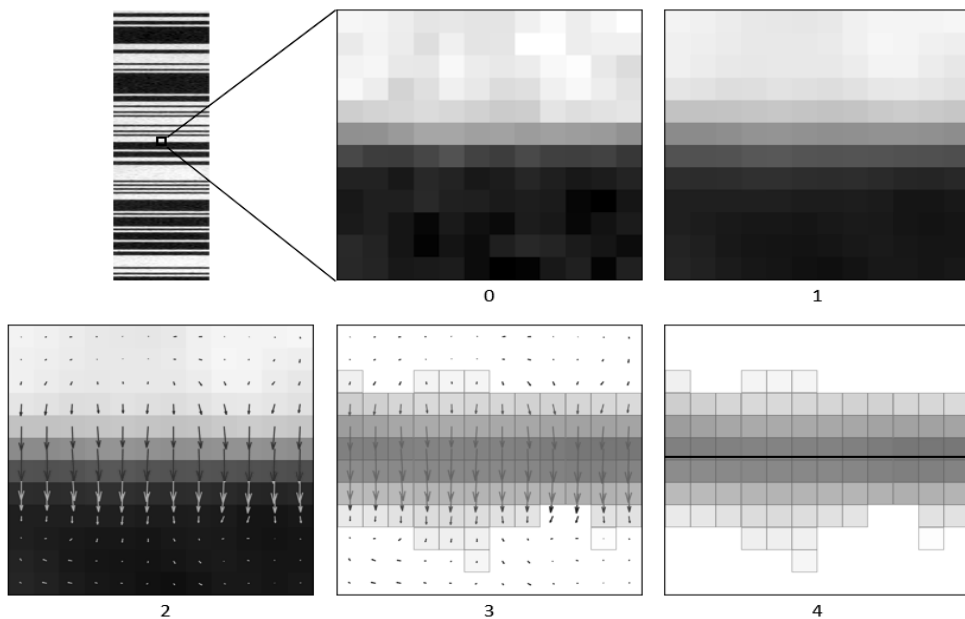
Aus dem entzerrten Farbbild (RGB) wird ein vertikaler Streifen um die Bildmitte extrahiert, der den Barcode enthält. Die Größe des auszuschneidenden Bereiches wird aus bekannter Invarstreifenbreite, gemessener Distanz und der Brennweite der Teleskopkamera berechnet. Zur weiteren Verwendung werden die RGB-Informationen zuerst in 8-Bit-Graustufen umgewandelt. Aus diesem Bild werden später die subpixelgenauen Kanten für die abschließende Ausgleichung extrahiert. Für die vorausgehende korrelationsbasierte Grobsuche muss das Graustufenbild zunächst in ein binäres Signal weiterverarbeitet werden.



**Abb. 3:** Bildvorverarbeitungsschritte zur Decodierung des digitalen Nivellierlattenbildes – vom 2D-Ausschnitt des Farbbildes zum binären 1D-Signal

Abbildung 3 zeigt die Schritte der Binärcodegenerierung für das Korrelationsverfahren. Zur Rauschminimierung wird das zweidimensionale Grauwertbild geglättet, indem jede Zeile zu jeweils einem einzelnen Pixel gemittelt und der Wertebereich aller Mittelwerte auf den vollen 8-Bit-Bereich gespreizt wird. Mittels eines Schwellwertoperators wird anschließend ein Binär-Signal erzeugt, welches im Weiteren für die schnelle Suche eines Näherungswertes für die Lattenablesung dient (Kap. 3.3).

In den Grauwertbildern werden die Kanten des Barcodes subpixelgenau bestimmt, welche anschließend für eine präzise Höhenablesung dienen. Für die Kantendetektion wird ein Ansatz gewählt, der im Wesentlichen auf dem Prozedere von BURNS et al. (1986) beruht. Der Algorithmus gliedert sich in vier Teilschritte, siehe Abb. 4: Zuerst wird das gesamte Bild mit einem Gauß-Filter geglättet, um das Rauschen zu minimieren (1). Danach werden mithilfe eines Sobel-Operators Gradientenrichtung und -stärke für jeden Pixel bestimmt (2). Anhand der Richtungen lassen sich die Pixel klassifizieren und in zusammenhängende Bereiche mit ähnlichen Winkelwerten gruppieren (3). Im vorliegenden Fall werden nur Pixelgruppen gebildet, deren Gradienten in Längsrichtung des Lattencodes zeigen, d. h. im Weiteren werden nur annähernd horizontale Strukturen berücksichtigt. Gruppen, deren Pixelanzahl einen entfernungsabhängigen Schwellwert unterschreiten, werden ebenfalls von der Berechnung ausgeschlossen. Durch jeden der verbleibenden Bereiche wird eine ausgleichende Gerade nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt (4). Die jeweiligen Pixelpositionen werden dabei anhand ihrer Gradientenstärke gewichtet. Da trotz der o. g. perspektivischen Korrektur die Geraden nicht zwingend horizontal verlaufen müssen (aufgrund einer verdrehten oder verkippten Nivellierlatte) werden die endgültigen Kantenpositionen auf die Bildmittelachse bezogen, die bei korrekter Anzielung der Mitte der Nivellierlatte entspricht.



**Abb. 4:** Kantendetektion: (0) Grauwertbild, (1) Glättung mit Gauß-Filter, (2) Gradientenrichtung und -stärke, (3) Gruppierung, (4) Schätzung von ausgleichenden Geraden

### 3.3 Korrelation

Ähnlich der Decodierungsmethode, die in Leica-Instrumenten Anwendung findet, lässt sich der sichtbare Nivellierlattenabschnitt und die entsprechende Höhenablesung über eine Korrelationsfunktion ermitteln. Der Korrelationskoeffizient  $C_{PQ}$  wird an jeder Stelle  $h_L$  aus dem Binärcode  $Q(y)$  des Bildes und dem verschobenen, auf Bildgröße skalierten, Referenzcode  $P(y - h_L)$  berechnet:

$$C_{PQ}(h_L) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{Q_k(y) \oplus P_k(y - h_L)} \quad (3)$$

Das Maximum dieser Korrelationsfunktion liefert einen ausreichend guten Näherungswert der Höhenablesung  $h_L$  für die weitere Prozessierung. Für eine effiziente Implementierung wird die Korrelation auf Basis des 1-Bit Codes mithilfe eines XNOR-Operators berechnet. Eine mehrmalige Korrelation mit unterschiedlichen Skalierungsstufen (Verfahren nach Leica) ist nicht nötig; die entsprechende Skalierung ist durch die reflektorlose Distanzmessung zur Nivellierlatte und die Parameter der Kamera bereits ausreichend genau bestimmt.

### 3.4 Höhenablesung

Die tatsächliche Höhenablesung basiert ausschließlich auf den im Bild detektierten Kanten und deren Sollpositionen auf der Nivellierlatte. Letztere sind durch die herstellereinspezifischen Codes gegeben, bzw. können mit entsprechenden Kalibriereinrichtungen exakt bestimmt werden. Somit ist es mit dieser Methode möglich, Einzelstrichverbesserungen für jede Nivellierlatte individuell anzubringen. Der Zusammenhang zwischen den detektierten Kantenpositionen im Bild  $E_M$  und den Referenzkanten  $E_R$  ergibt sich aus:

$$E_R = m \cdot E_M + h_L \quad (4)$$

Dabei ist  $h_L$  die gesuchte Höhenablesung und  $m$  der Maßstabsfaktor. Dieses lineare Gleichungssystem lässt sich nach der Methode der kleinsten Quadrate lösen. Das Ergebnis der Grobkorrelation wird genutzt, um die paarweise Zuordnung zwischen Soll- und Istkanten zu realisieren; dies geschieht über eine Vorwärts-Rückwärts-Suche der nächsten Nachbarn in beiden Vektoren. Mit einem zusätzlichen Ausreißertest und einem Distanz-Filter werden falsch detektierte bzw. verdeckte Kanten herausgefiltert.

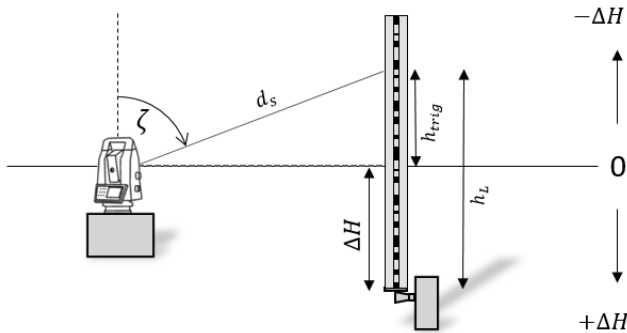
### 3.5 Trigonometrische Korrektur

Da die Zielung auf die Latte nicht zwingend in horizontaler Fernrohrlage erfolgt, muss die abgelesene Höhe an der Nivellierlatte  $h_L$  noch um den auftretenden trigonometrischen Höhenunterschied  $h_{trig}$  korrigiert werden (Abb. 5). Dieser ist abhängig vom Vertikalwinkel  $\zeta$  und der Schrägdistanz  $d_s$  zur Nivellierlatte. Der endgültige Höhenunterschied  $\Delta H$  zwischen Lattenfußpunkt und Instrument ergibt sich zu:

$$\Delta H = h_L - h_{trig} = h_L - d_s \cdot \cos \zeta \quad (5)$$

Die Vorzeichen werden in diesem Fall so gewählt, dass diese mit den Ablesungen eines Nivelliers übereinstimmen (vgl. Abb. 5).





**Abb. 5:** Höhenbestimmung mit der IATS: Definition der Messgrößen und des Bezugssystems

### 3.6 Genauigkeitsbetrachtung

Die Genauigkeit der Höhenübertragung mit IATS und digitalen Nivellierlaten hängt von verschiedenen Parametern ab. Dazu zählen die Genauigkeit der Vertikalwinkelablesung und der Streckenmessung, Instrumentenfehler, Kalibrierparameter der Kamera, atmosphärische Einflüsse, Nivellierlatenfehler und Ungenauigkeiten der Lattenablesung. Die ersten Werte beschreiben die Genauigkeit des trigonometrischen Anteiles und können aus den Angaben des Instrumentenherstellers berechnet werden. Die Auswirkungen der Instrumentenfehler und Kameraparameter lassen sich mit geeigneten Kalibrierverfahren minimieren, z. B. durch kombinierte Ansätze (WALSER 2004, VOGEL 2006, WASMEIER 2009). Einflüsse der Refraktion und Fehler der Nivellierlaten werden durch die vom Nivellement bekannten Regeln (z. B. Nivellieren aus der Mitte, Verwenden der gleichen Latte auf Anfangs- und Endpunkt etc.) minimiert. Die Unsicherheit der Lattenablesung kann im vorliegenden Fall vernachlässigt werden, da die subpixelgenaue Kantendetektion im Bereich  $1/10$  Pixel (entspricht ca. 0.06 mgon) und genauer erfolgt (REITERER & WAGNER 2012) und somit weit unter der Winkelmessgenauigkeit des Instruments anzusiedeln ist.

Als dominierender Fehlereinfluss bleibt somit der trigonometrische Anteil  $h_{trig}$  der Höhenübertragung:

$$h_{trig}(\zeta, d_s) = d_s \cdot \cos \zeta \quad (6)$$

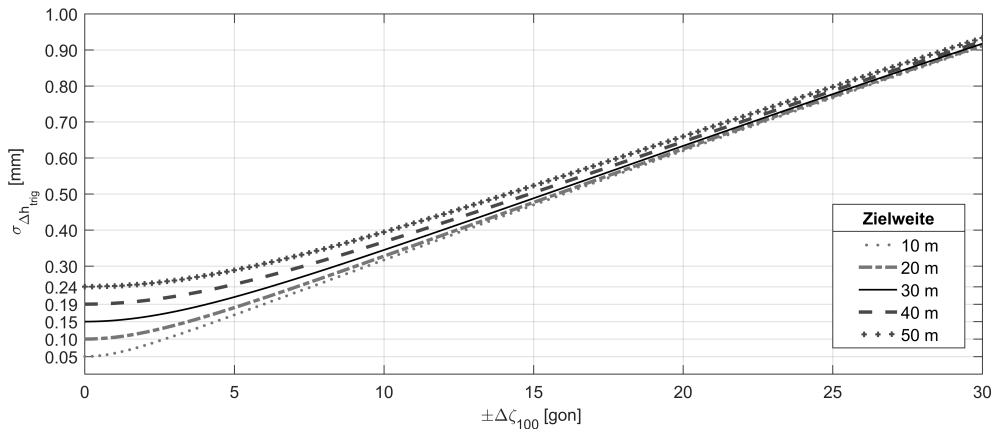
Dieser wird von der Genauigkeit des Vertikalwinkels  $\sigma_\zeta$  und der Streckenmessung  $\sigma_{d_s}$  beeinflusst. Die Unsicherheit des trigonometrischen Anteiles wird nach den Gesetzen der Varianzfortpflanzung über die partiellen Ableitungen berechnet:

$$\sigma_{h_{trig}}^2 = \sigma_{d_s}^2 \cdot \left( \frac{\partial h_{trig}}{\partial d_s} \right)^2 + \sigma_\zeta^2 \cdot \left( \frac{\partial h_{trig}}{\partial \zeta} \right)^2 \quad (7)$$

Daraus ergibt sich:

$$\sigma_{h_{trig}}^2 = \sqrt{\sigma_{d_s}^2 \cdot (\cos \zeta)^2 + \sigma_\zeta^2 \cdot (\sin \zeta \cdot d_s)^2} \quad (8)$$

Der erste Term der Gleichung – die Unsicherheiten aus der Streckenmessung – geht für horizontale Visuren gegen null. Der zweite Term – Unsicherheiten aus der Winkelmessung – ist maßgeblich von der Streckenlänge  $d_s$  abhängig und wird maximal für horizontale Visuren. Abbildung 6 zeigt die zu erwartenden Genauigkeiten für einen 1'' Tachymeter, dessen reflektorlose Distanzmessung eine Genauigkeit von 2 mm + 2 ppm bietet. In praktischen Versuchen (Kap. 4) zeigt sich, dass sich bei sorgfältig kalibrierten Instrumenten deutlich bessere Werte erzielen lassen. Offensichtlich ist aber, dass auch beim Nivellement mit einer IATS eine horizontale Visur bevorzugt werden sollte, da die Unsicherheiten aus der Streckenmessung bei Auslenkung des Fernrohrs aus der Horizontalebene schnell überwiegen.



**Abb. 6:** Genauigkeitsabschätzung der trigonometrischen Höhenübertragung ( $\sigma_\zeta = 1''$ ,  $\sigma_{d_s} = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ )

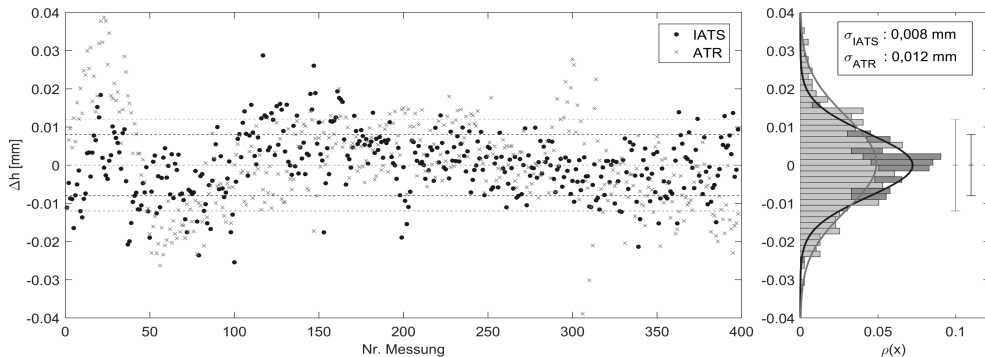
## 4 Versuche

Um die vorgestellte Methode und deren Genauigkeit zu verifizieren, werden verschiedene Experimente durchgeführt. Dabei kommt als IATS eine Leica MS60 zum Einsatz, deren Teleskopkamerabilder an einen externen Rechner übertragen und dort verarbeitet werden. Als Nivellierlatten werden Präzisionslatten aus Invar unterschiedlicher Länge mit Leica-Code verwendet.

### 4.1 Laborversuche

Um die Wiederholbarkeit der Messungen zu untersuchen, werden verschiedene Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt. In einem statischen Aufbau mit festem, aber unbekanntem Höhenversatz, werden Nivellierlatte und Instrument auf stabilen Pfeilern aufgebaut (Zielweite ca. 15,5 m). Zum Vergleich wird neben der Nivellierlatte ein Prisma befestigt, welches mit der automatischen Zielerfassung (ATR) der Totalstation angezielt werden kann. Nach einer mehrstündigen Aufwärmzeit des Instruments (vgl. REITERER & WAGNER 2012), werden über einen Zeitraum von ca. 3 Stunden nacheinander 400 ATR-Messungen und 400 Aufnahmen der Nivellierlatte unter annähernd horizontaler Visur (Vertikalwinkel  $\zeta \approx 100$  gon) ausgeführt. Das Fernrohr bleibt während des gesamten Versuches auf das Prisma aus-

gerichtet und wird nicht für jede Messung neu positioniert. Für die Auswertungen werden nur die Abweichungen der ermittelten Höhenunterschiede zu ihren Mittelwerten betrachtet (Abb. 7), da kein Sollhöhenunterschied bekannt ist. Die Standardabweichung ( $1\sigma$ ) der Messwerte beträgt 0,008 mm. Dies stellt gegenüber der ATR-Messung (Standardabweichung in der Höhenkomponente 0,012 mm) eine geringfügige Verbesserung dar und zeigt, dass die Lattenablesungen reproduzierbar erzeugt werden können.



**Abb. 7:** Streuung der Messwerte der ATR-Messungen (hell dargestellt) und Lattenablesung mit IATS (dunkel), rechts: Histogramm und Normalverteilung

Im gleichen Versuchsaufbau wird ebenfalls eine 1 m Invar-Nivellierlatte unter verschiedenen Vertikalwinkeln angezielt. Vom oberen Ende der Nivellierlatte bis zum Lattenfuß werden mehrere Ablesungen an unterschiedlichen Codeausschnitten durchgeführt, die alle zu einem identischen Ergebnis führen sollten. Hierbei wirken sich allerdings die Ungenauigkeiten der Strecken- und Winkelmessung mit auf die Ergebnisse aus. Die Standardabweichung eines derartigen Versuchs mit 15 Messung (Vertikalwinkel im Bereich  $\pm 2,5$  gon aus der Horizontalen) beträgt durch die zusätzlichen Unsicherheiten 0,021 mm.

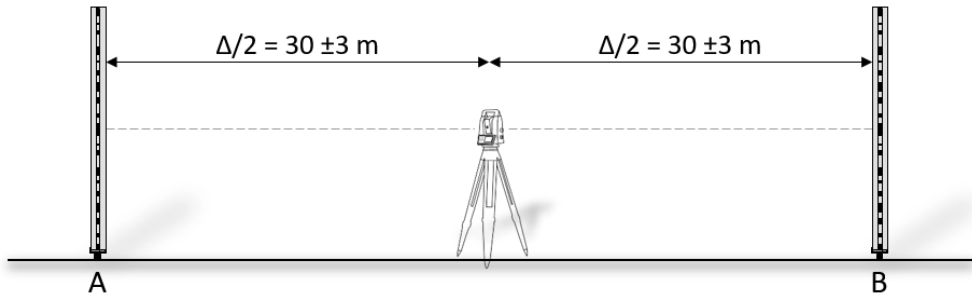
Beide Versuche demonstrieren, dass mit der hier vorgestellten Auswertemethode Nivellierlatten reproduzierbar abgelesen und Höhenunterschiede mit großer Präzision erfasst werden können.

## 4.2 Feldversuche

### Genauigkeitsuntersuchung nach ISO 17123-2

Um die Genauigkeit von Nivelliergeräten zu spezifizieren, geben die Hersteller meist die Standardabweichung für ein 1-km-Doppelnivellement an, welche über ein Feldverfahren nach ISO 17123-2 „full test procedure“ ermittelt wird. Dabei werden zwei Nivellierlatten in einer Distanz von ca. 60 m auf stabilen Punkten aufgestellt (Abb. 8); das Nivellement erfolgt aus der Mitte in zwei Sätzen mit je 20 Vor- und Rückblicken. Nach zehn gemessenen Höhendifferenzen innerhalb eines Satzes wird die Aufnahmereihenfolge von Vor- und Rückblick umgekehrt. Zusätzlich werden die Nivellierlatten zwischen den beiden Sätzen getauscht. Nach der Messung jedes Höhenunterschiedes muss das Gerät angehoben und neu horizontalisiert werden. Aus den  $2 \times 20$  Höhenunterschieden wird die Abweichung von ihrem

Satzmittel und daraus die Standardabweichung für den einzelnen Höhenunterschied berechnet. In Zusammenhang mit der Zielweite ergibt sich daraus die Standardabweichung für ein 1-km-Doppelnivellement  $\sigma_{1km}$  nach den Formeln der ISO-Norm.



**Abb. 8:** Versuchsaufbau nach ISO 17123-2 „full test procedure“

Der Versuch nach ISO 17123-2 wird mit dem hier vorgestellten Algorithmus und einer Leica MS60 durchgeführt. Zum Vergleich und zur Validierung des Versuchsaufbaus wird zur selben Zeit die Standardabweichung (nach ISO 17123-2) mit den Digitalnivellierern Leica DNA03 und Leica LS15 bestimmt. Für alle Geräte werden identische 3 m Invar-Nivellierlaten mit Leica Codierung verwendet. Die Ergebnisse für zwei unabhängige Testreihen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Standardabweichungen für ein 1-km-Doppelnivellement nach ISO 17123-2

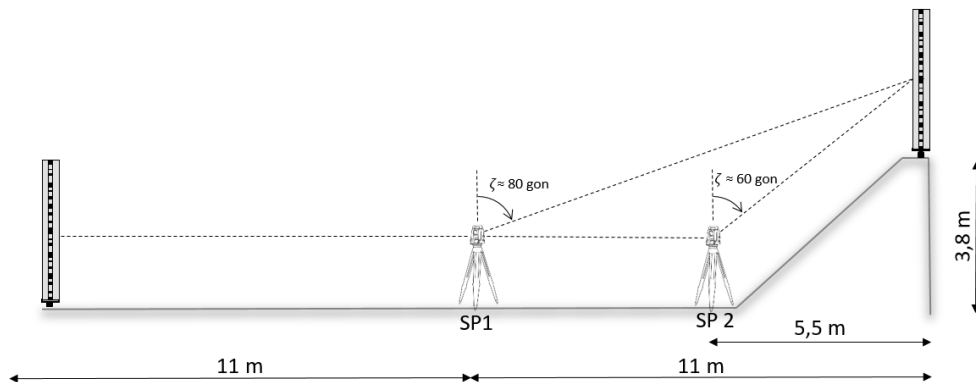
Instrument	1. Testreihe: $\sigma_{1km}$ [mm]	2. Testreihe: $\sigma_{1km}$ [mm]
Leica MS60	0,35	0,25
Leica DNA03	0,33	0,26
Leica LS15	0,25	0,22

Durch das Nivellieren aus der Mitte werden die Einflüsse von Refraktion und Ziellinienfehler gering gehalten, lassen sich aber nicht gänzlich eliminieren. Die ermittelten Standardabweichungen unterliegen, je nach Messatmosphäre und Umgebung/Untergrund, deutlichen (signifikanten) Schwankungen (vgl. 1. und 2. Testreihe). Unter Laborbedingung können hier erheblich bessere Werte (z. B. MS60  $\sigma_{1km} < 0,1$  mm) erzielt werden, die aber nicht die Genauigkeit im tatsächlichen Gebrauch widerspiegeln.

### Höhenübertragung mit steilen Visuren

Der Hauptvorteil des Nivellierens mit einer IATS ist die Möglichkeit nicht-horizontaler Visuren. Dies erlaubt es prinzipiell, mit einer Messung große Höhenunterschiede zu überbrücken, was in einem weiteren Versuchsaufbau überprüft wird. In diesem tritt zwischen zwei Höhenbolzen im Abstand von 22 m ein Höhenunterschied von ca. 3,8 m auf (Abb. 9). Dieser wird mit einer Nivellierausrüstung mithilfe eines Doppelnivellements bestimmt. Dazu sind für Hin- und Rückweg jeweils 4 Aufstellungen nötig. Dieser Höhenunterschied lässt sich mit der IATS-Nivellementmethode mit einer einzelnen Aufstellung überbrücken. Die Messung

wird zweimal durchgeführt: einmal aus der Mitte (Standpunkt 1) und einmal in stark asymmetrischer Aufstellung (Standpunkt 2), um steile Visuren (Vertikalwinkel  $\zeta \sim 60$  gon) zu simulieren. In jeder Aufstellung werden neun unabhängige Höhendifferenzen mit der IATS gemessen.



**Abb. 9:** Versuchsaufbau zur Höhenübertragung mit steilen Visuren

Die Ergebnisse des Versuchs (Tabelle 2) zeigen eine sehr hohe innere Genauigkeit der IATS Messungen, ähnlich der Genauigkeitsuntersuchung nach ISO 17123-2. Im Vergleich zum klassischen Präzisionsnivellement fällt allerdings eine signifikante Abweichung in der absoluten Höhendifferenz von bis zu 0,5 mm auf. Wie in Kap. 3.6 gezeigt, entsteht beim IATS-Nivellement ein Großteil des Fehlereinflusses durch den trigonometrischen Anteil der Höhenübertragung (vgl. Abb. 6). Insbesondere spielt der Einfluss der reflektorlosen Streckenmessung eine entscheidende Rolle in der asymmetrischen Messanordnung mit sehr steiler Visur. Eine Korrektur der gemessene Schrägstrecke um 0,7 mm würde bereits eine Übereinstimmung der absoluten Höhendifferenzen ergeben. Dies entspricht in etwa der Standardabweichung der im Versuch mehrmals gemessenen Distanz zur Nivellierlatte. Das Ergebnis liegt somit vollständig im zu erwartenden, abgeschätzten Bereich (vgl. Kap. 3.6).

**Tabelle 2:** Ergebnisse des Versuchs zur Höhenübertragung mit steilen Visuren

Versuch	$\Delta H$ [mm]	$\sigma$ [mm]
IATS SP 1	3826,18	0,23
IATS SP 2	3825,92	0,21
Leica DNA 03	3826,41	0,07

Die Ergebnisse der Feldversuche zeigen, dass ein Nivellement mittels IATS mit nur geringen Genauigkeitseinbußen gegenüber Digitalnivellieren durchgeführt werden kann, solange horizontale Visuren verwendet werden. Weitere Untersuchungen mit ähnlichen Ergebnissen finden sich in LICHTENBERGER (2015) und WAGNER et al. (2016).

## 5 Fazit

Die hier vorgestellte Methode zum Ablesen von digitalen Nivellierlatten und die gezeigten Versuche weisen nach, dass eine IATS prinzipiell für das Ablesen von digitalen Nivellierlatten und die Durchführung von Nivellements geeignet ist. Bei horizontaler Visur müssen dabei lediglich sehr geringe Genauigkeitseinbußen in Kauf genommen werden, wie die Genauigkeitsbestimmung nach ISO 17123-2 zeigt. Mit dem hier vorgestellten Algorithmus lassen sich herstellerunabhängig Nivellierlatten mit hoher Präzision decodieren. Die Ablesegenauigkeit des Lattencodes liegt weit über den sonstigen Messeinflüssen und -unsicherheiten. Der Algorithmus ermöglicht es, Verbesserungen für die einzelnen Codekanten, die sich in entsprechenden Kalibriereinrichtungen bestimmen lassen, bei der Auswertung zu berücksichtigen. Standard-Nivelliere bieten diese Möglichkeit nicht. Die flächenhafte Auswertung des Nivellierlattenbilds über die gesamte Höhe des Teleskopgesichtsfelds erlaubt es, Höhen auch bei teilweiser Verdeckung des Codes auszuwerten. Dies kann einen Vorteil gegenüber einer rein trigonometrischen Höhenübertragung auf ein Prisma bieten.

Wie gezeigt verringert sich bei nicht-horizontalen Visuren die Genauigkeit mit zunehmendem bzw. abnehmendem Vertikalwinkel, sowie der Entfernung. Der trigonometrische Teil der Höhenübertragung stellt dann den dominierenden Faktor des Unsicherheitbudgets, was auch durch eine geänderte Auswertung des Zielzeichens nicht beeinflusst werden kann. Im Vergleich einer Übertragung mit einem Prisma sorgt nur die höhere Fertigungsqualität der Nivellierlatte anstelle des Prismenstabs für eine Genauigkeitssteigerung, während gleichzeitig die verminderte Streckenmessgenauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung selbige verringert.

Der vorgestellte Ansatz erweitert die Anwendungsmöglichkeiten und Messmethoden einer IATS und bildet eine gemeinsame Schnittstelle zwischen den beiden geodätischen Grundverfahren Nivellement und Tachymetrie. Die derzeitige Prozessorleistung der Instrumente sowie die Einfachheit des Verfahrens ermöglichen eine Implementierung On-Board. Eine derartige Funktion sollte von jedem Hersteller angeboten werden.

## Literatur

- BURNS, J. B., HANSON, A. R. & RISEMAN, E. M. (1986): Extracting Straight Lines. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI, 8 (4), S. 425-455.
- DEUMLICH, F. & STAIGER, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Wichmann, Heidelberg.
- DIN ISO 12858-1:2016-04: Optik und optische Instrumente – Zubehör für geodätische Instrumente – Teil 1: Präzisions-Nivellierlatten (Invarlatten) (ISO 12858-1:2014). Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 9001:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015. Beuth, Berlin.
- EHRHART, M. & LIENHART, W. (2015): Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station. In: Journal of Applied Geodesy, 9 (3), S. 174-182.

- GUILLAUME, S., BÜRKI, B., GRIFFET, S. & DURAND, H. M. (2012): QDaedalus: Augmentation of Total Stations by CCD Sensor for Automated Contactless High-Precision Metrology. In: FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage: proceedings. FIG, Rom, CD-ROM.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A. (2010): Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, Cambridge u. a.
- INGENSAND, H. (2005): Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 112 (6), S. 229-232.
- KNOBLACH, S. (2009): Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters. Dissertation, TU Dresden.
- LICHTENBERGER, C. (2015): Automatisches Ablesen digitaler Nivellierlatten mit der Okularkamera einer modernen Totalstation. Bachelor's Thesis, Technische Universität München.
- ISO 17123-2: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 2: Levels – ISO 17123-2:2001. ISO copyright office, Genf, Schweiz.
- REITERER, A. & WAGNER, A. (2012): System Considerations of an Image Assisted Total Station – Evaluation and Assessment. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119 (3), S. 83-94.
- VOGEL, M. (2006): Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen. Dissertation, TU Darmstadt.
- WAGNER, A., HUBER, B., WIEDEMANN, W. & PAAR, G. (2014): Long-Range Geo-Monitoring using Image Assisted Total Stations. In: Journal of Applied Geodesy, 8 (3), S. 223-234.
- WAGNER, A., WIEDEMANN, W. & WUNDERLICH, T. (2016): Using IATS to Read and Analyze Digital Leveling Staffs. In: PAAR, R., MARENDIĆ, A. & ZRINJSKI, M. (Eds.): Proceedings of the International Symposium on Engineering Geodesy – SIG 2016. Croatian Geodetic Society, S. 515-526.
- WALSER, B. (2004): Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Dissertation, ETH Zürich.
- WASMEIER, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, Technische Universität München.
- WASMEIER, P. & FOPPE, K. (2006): A new CCD-based Technique for the Calibration of Leveling Rods. In: Proceedings of the XXIII International FIG Congress "Shaping the Change", München, CD-ROM.