

---

# Tachymetrisches 6DOF-Messverfahren

Bernhard-Julian SCHESTAUER, Andreas WAGNER, Wolfgang WIEDEMANN und  
Thomas WUNDERLICH

## Zusammenfassung

In der Industrievermessung sind Lasertracker als Messwerkzeug nicht mehr wegzudenken. Neben der hochgenauen Einzelpunkterfassung von Prismen können zusätzlich über Passmarken und Videoauswertung auch die sechs Freiheitsgrade (6DOF) von Messwerkzeugen erfasst werden. D. h. es wird nicht nur die 3D-Position, sondern auch die Raumlage des Messwerkzeugs ermittelt. Dieses Messprinzip kann kostengünstig auch mit modernen, bildgebenden Totalstationen (IATS) umgesetzt werden.

Eine dreidimensionale Zieltafel (Messtaster), bestehend aus mehreren (passiven) Zielmarken und einem zentrisch angebrachten Miniprisma, wird mit den Standardanwendungen einer modernen Totalstation automatisch verfolgt. Im Messbild der coaxialen Tachymeterkamera werden die Zielmarken mittels Bildverarbeitungsalgorithmen automatisch extrahiert. Über einen räumlichen Rückwärtsschnitt lässt sich die relative Lage des Messtasters zur Kamera bestimmen. Die 6 Freiheitsgrade des Messtasters ergeben sich aus verschiedenen aufeinanderfolgenden Transformationen: vom lokalen System der Zieltafel über das Kamera- in das Tachymeter-Koordinatensystem. Je nach Stationierung des Instruments kann eine weitere Transformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem erfolgen.

Verschiedene Versuchsreihen, wie Vergleichsmessungen mit einem Lasertracker oder die Bestimmung eines fixen Punktes mit unterschiedlichen Orientierungen des Tasters, bestätigen die allgemeine Eignung des Systems für geodätische Anwendungen bei geringen Genauigkeitseinbußen, die teilweise der Einfachheit des Messtaster-Prototyps geschuldet sind.

Die Messmethoden eines Tachymeters werden mit dem vorgestellten System von reinen dreidimensionalen Koordinaten zu 3D-Raumvektoren erweitert. Damit entfällt beispielsweise der Zwang, den Lotstab senkrecht zu halten oder unzugängliche Punkte können – ähnlich einem Kanalmessstab – mit einer einzigen Messung erfasst werden. Mit vertretbaren Genauigkeitseinbußen werden im Gegensatz zu Lasertracker-Systemen die Kosten deutlich reduziert, die Mobilität erhöht und der Arbeitsbereich auf den Außenraum erweitert.

## 1 Einleitung

Lasertracker verfolgen Ziele in Echtzeit mit sehr hoher Genauigkeit und sind in der Industrie nicht mehr wegzudenken. Jedoch beschränkt sich der Funktionsumfang in der Basisversion auf die Bestimmung der Position eines Prismas, welches den Laser reflektiert. Um die Messmethoden der Geräte zu erweitern, stellte *Leica* im Jahr 2004 die T-Probe vor. Dieser Messtaster ermöglicht in Verbindung mit der *Leica* T-Cam – einer Kamera als Aufsatz für den Lasertracker – die Messung von 6 Freiheitsgraden. Diese setzen sich aus den 3 Koordinatenwerten der Position des Prismas und den 3 Rotationen ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) des Messtasters zusammen.

An der *Leica* T-Probe können Tastspitzen unterschiedlicher Länge angebracht und diese während des Betriebs ausgetauscht werden. Das Messsystem ermöglicht die Abtastung von Punkten, wie z. B. Bauteilen während der Fertigung, ohne dass eine direkte Sichtverbindung zwischen Objektpunkt und Lasertracker vorhanden sein muss. Dies beschleunigt die Messung von Punkten da der Lasertracker nicht neu positioniert werden muss um die Ziele in das Sichtfeld zu bringen und vor allem das Messen an schwer zugänglichen Stellen wie z. B. in Bohrungen.

Das o. g. Messverfahren kann 1:1 auf eine moderne Image Assisted Total Station (IATS) übertragen werden und somit zusätzliche Arbeitsfelder erschlossen werden. Moderne Totalstationen verfügen über sehr genaue Distanzmesseinheiten und teilweise über zwei hochauflösende Kameras: einer Übersichtskamera und einem koaxial verbauten Sensor, der die Sicht durch das Teleskop aufnimmt. Dies ermöglicht es, ähnliche Messtaster zu verwenden, wie sie für Lasertracker entwickelt wurden.

Im Folgenden wird eine derartige Umsetzung beschrieben, bei der ein – der T-Probe ähnlicher – Messtaster entwickelt wurde und dessen 6 Freiheitsgrade über die Distanzmesseinheit und eine photogrammetrische Bildauswertung der koaxialen Kamera bestimmt werden.

## 2 Instrumentarium

### 2.1 IATS

Die Anzahl an Totalstationen mit einer oder mehreren integrierten Kameras am Markt steigt stetig. Im Allgemeinen werden diese Geräte als Videotachymeter oder Image Assisted Total Stations bezeichnet. Eine Auflistung und ein Vergleich der Geräte finden sich beispielsweise in WAGNER (2016). Drei Geräteserien (*Leica* Multistation, *Topcon* IS, *Trimble* SX) enthalten dabei nicht nur Übersichtskameras mit großem Gesichtsfeld, sondern auch Teleskopkameras, die den Blick durch das Fernrohr abbilden.

Genauigkeitsuntersuchungen im Vorfeld zeigten, dass für eine möglichst genaue Anwendung und einen möglichst kleinen Messtaster die Teleskopkamera einer IATS verwendet werden sollte. Durch die koaxiale Anordnung zur Zielachse einer solchen Kamera wird die optische Vergrößerung des Teleskops genutzt, was zu einer hohen Auflösung, d. h. geringen räumlichen Ausdehnung eines Pixels, führt.

Für die Versuche zu vorliegendem Artikel wurde eine *Leica* MS60 verwendet. Die Teleskopkamera besitzt eine Auflösung von 5 Megapixeln ( $2560 \times 1920$  Pixel) und einen Öffnungswinkel von  $1,5^\circ$ . Die Distanzmesseinheit des Geräts verfügt über einen Arbeitsbereich von 1,5 m bis 10.000 m, wobei dieser bei Verwendung der automatisierten Zielerfassung und Zielverfolgung auf 1.000 m begrenzt wird. Die Genauigkeit liegt mit der Verwendung eines Prismas bei  $1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$  (LEICA GEOSYSTEMS AG 2015).

### 2.2 Messtaster

Die Infrarot-LEDs einer *Leica* T-Probe werden mit der Kamera des Lasertracker synchronisiert, indem diese sequenziell aufleuchten (LOSER & KYLE 2003). Um diese Vorgehensweise

auf eine Standard-IATS zu übertragen, wären aufwendige Hardware-Erweiterungen notwendig. Im vorliegenden Fall wurde daher ein eigener (passiver) Messtaster-Prototyp konstruiert, der mit allen bildunterstützten Totalstationen verwendet werden kann.

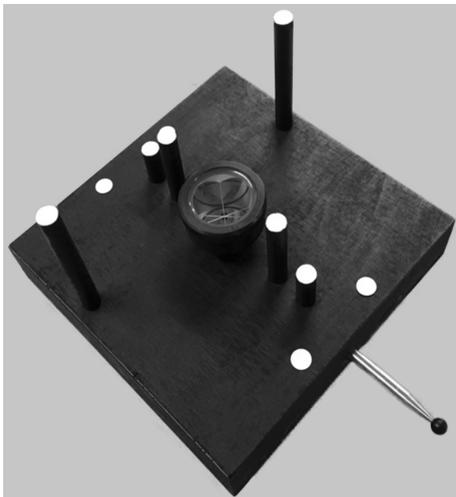
Um eine hohe Genauigkeit der Punktbestimmung zu gewährleisten, wurden im Vorfeld folgende Kriterien für den Messtaster festgelegt:

- Abdecken eines möglichst großen Messbereichs, ausgewogen nach handhabbarer Größe der Zieltafel und erreichbarer Genauigkeit.
- Große dreidimensionale Ausdehnung/Passmarkenverteilung.
- Hohe Redundanz durch mehrere räumlich verteilte Passmarken (überbestimmter Rückwärtsschnitt).
- Der Messtaster soll mindestens 1/3 des Messbildes ausfüllen um eine stabile Berechnung des Rückwärtsschnitts zu garantieren (Bedingung für max. Distanz).
- Es müssen immer alle Passmarken im Bild sichtbar sein (Bedingung für min. Distanz).

Aus diesen Kriterien für einen Messtaster und den Eigenschaften der Teleskopkamera der *Leica MS60* resultieren folgende Eigenschaften:

- Verteilung der Passmarken auf einem Volumen von  $12\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ .
- Verwendung von 8 mm großen Passmarken.
- Ähnliche Passmarken-Anordnung wie bei einer *Leica T-Probe*.
- Miniprisma in der Mitte als Zentrum des lokalen Koordinatensystems.
- Arbeitsbereich von ca. 7 bis 21 m (Resultat aus Passmarkenvolumen und o. g. Bedingungen der min. und max. Messdistanzen).

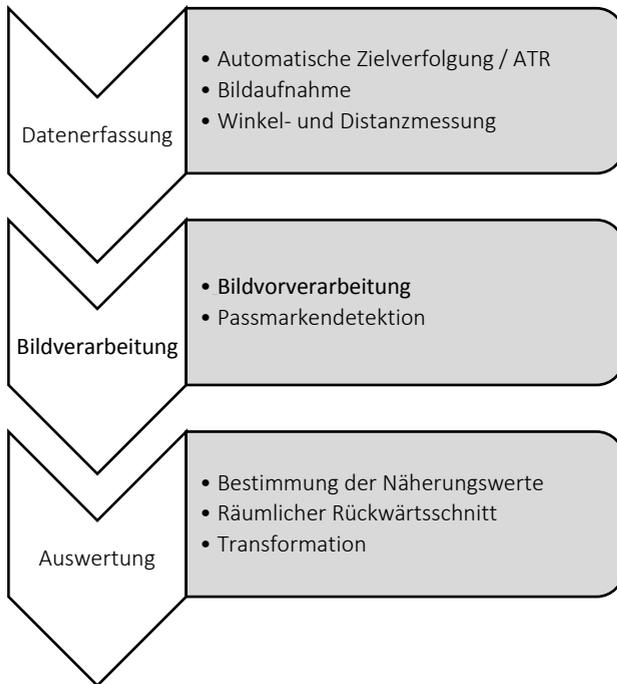
Abb. 1 zeigt den ersten Prototypen des Messtasters. Um das Bauteil so einfach wie möglich zu halten wurde es aus dem Werkstoff Holz gefertigt. Die Passmarken sind mit weißer Farbe gekennzeichnet. Um den Kontrast zu erhöhen wurde der Messtaster mit schwarzer Farbe überzogen. In der Mitte der Tafel wurde ein Standard-Miniprisma angebracht.



**Abb. 1:**  
Zieltafel-Prototyp in Anlehnung an eine *Leica T-Probe*

### 3 Methodik

Die Vorgehensweise, um die 6 Freiheitsgrade des Messtasters zu bestimmen, wird in Abb. 2 in Form eines Programmablaufplans dargestellt. Er umfasst drei verschiedene Verarbeitungsschritte, bzw. Module, die sequenziell abgearbeitet werden.



**Abb. 2:** Programmablaufplan zur Bestimmung der 6 Freiheitsgrade des Messtasters

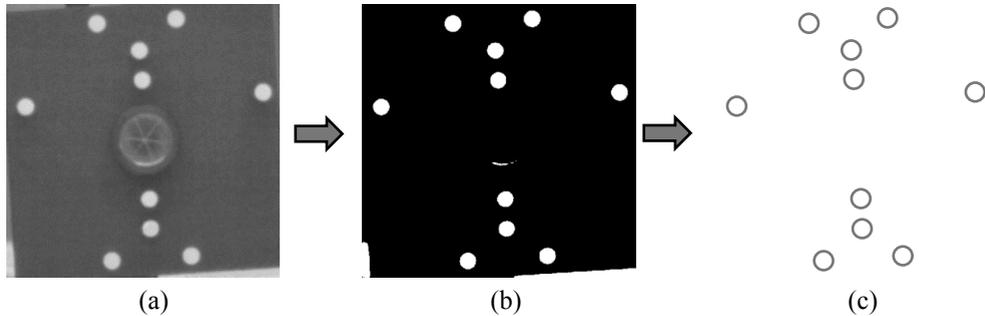
Da der Messtaster im Zentrum mit einem Miniprisma ausgestattet ist, kann er mithilfe der Standardmethoden moderner Totalstationen automatisch verfolgt werden. Die eigentliche Datenerfassung beginnt dann mit einer automatischen (Fein-)Anzielung des Prismas (ATR), der Bildaufnahme und der Registrierung des entsprechenden Horizontal- und Vertikalwinkels ( $H_z, V$ ), sowie der Bestimmung der Distanz  $d$ .

Zur weiteren Verarbeitung werden das aufgenommene Bild und die dazugehörigen Messelemente auf einen externen PC übertragen. Dort wird das Bild zuerst auf den Bereich von Interesse zugeschnitten, der sich aus der radialen Ausdehnung des Messtasters  $r$ , der gemessenen Distanz  $d$  und dem konstanten Öffnungswinkel  $\alpha$  eines Pixels berechnet. Zur Sicherheit wird ein Faktor 1,1 an die Größe der Zieltafel angebracht:

$$ROI = \frac{r \cdot 1,1}{2 \cdot \text{atan}(\alpha/2) \cdot d} \quad (1)$$

In den weiteren Bildvorverarbeitungsschritten wird das aufgenommene Farbbild in ein Grauwertbild umgewandelt und mit einem Gauß-Filter geglättet (Abb. 3a). Ein darauffolgender

Schwelldoperator erzeugt anschließend ein Binärbild (Abb. 3b). In diesem ist es einfach möglich die eigentlichen Passmarken und deren Bildkoordinaten zu extrahieren, wie in Abb. 3c) angedeutet. Mittels morphologischen Operatoren werden die Ränder der kreisförmigen Elemente extrahiert und die Mittelpunkte der verbleibenden Kreise geschätzt.



**Abb. 3:** Bildvorverarbeitung und Passmarkendetektion: a) geglättetes Grauwertbild  
b) Binärbild c) extrahierte Passmarken (kreisförmige Objekte)

Im Auswertungsmodul wird die unsortierte Koordinatenliste der Kreismittelpunkte aus der Bildverarbeitung zunächst sortiert, evtl. Ausreiser entfernt und Näherungswerte für die Zieltafelorientierung (Rotationen  $\omega$ ,  $\varphi$  und  $\kappa$ ) ermittelt. Dazu werden die Koordinaten virtueller Zieltafeln berechnet, die in allen plausiblen Ausrichtungen<sup>1</sup> im Raum (in der gemessenen Distanz  $d$ ) gedreht sind. Zu jeder Koordinate jeder virtuellen Zieltafel wird die Distanz zum nächsten Nachbarn der gemessenen Kreismittelpunkte bestimmt und deren L2-Norm berechnet. Die Parameter des virtuellen Bildes mit minimalen Abstand zu den gemessenen Passmarken dienen als (notwendige) Näherungswerte für eine anschließende Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes. Dies ist ein nichtlinearer und iterativer Prozess, der in einer Ausgleichung im Gauß-Helmert-Model berechnet wird (LUHMANN 2003). Die genau gemessene Distanz  $d$  wird dabei in der Berechnung durch folgende zusätzliche Verbesserungsgleichung berücksichtigt, vgl. SCHESTAUER (2016):

$$d + v_d = f_d = \sqrt{\hat{X}_0^2 + \hat{Y}_0^2 + \hat{Z}_0^2} \quad (2)$$

Das Ergebnis des räumlichen Rückwärtsschnittes ist die Position  $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$  und Orientierung der Kamera in Bezug auf ein lokales Koordinatensystem, dessen Ursprung auf der Zieltafel liegt. Um die gesuchte Position der Tastspitze und die Orientierung der Zieltafel im Tachymetersystem zu angeben, ist eine Transformation mithilfe der gemessenen Distanz  $d$ , der Winkel  $H_z, V$  und des Offsets der Tastspitze vom Ursprung des lokalen Koordinatensystems (Zentrum Miniprisma) notwendig. Der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem kann mittels einer geeigneten Stationierung des Tachymeters hergestellt werden.

<sup>1</sup>  $\omega \in \{-45^\circ; 45^\circ\}, \varphi \in \{-45^\circ; 45^\circ\}, \kappa \in \{0^\circ; 360^\circ\}$

## 4 Experimente

### 4.1 Einmessen einer Stahlplatte

Die Funktionsweise und Genauigkeit der implementierten Methode wurde u. a. mit Vergleichsmessungen zu einer *Leica* T-Probe in Verbindung mit einem Lasertracker getestet. In einem Versuch wurden 6 Bohrungen einer ca.  $60 \times 60$  cm großen Stahlplatte mit beiden Systemen eingemessen. Die Stationen des Lasertrackers und der IATS lagen dicht nebeneinander in einer Entfernung von ca. 14 m zum Messobjekt. Die Bohrungen wurden mit beiden Systemen in den jeweiligen lokalen Gerätekoordinatensystemen eingemessen und dann ineinander transformiert. Die Auswertung dieser Starrkörper-Transformation zeigt die innere Genauigkeit der Messergebnisse und ist nicht von externen Einflüssen, z. B. Fehler in den Stationierungen, überlagert. Die jeweiligen Messtaster wurden wie im täglichen Messeinsatz nach Augenmaß auf das Messinstrument ausgerichtet, d. h. es wurde nicht in Extremlagen gemessen. Tabelle 1 zeigt die Residuen nach der Starrkörper-Transformation, die alle im Bereich eines Millimeters oder darunter liegen.

**Tabelle 1:** Residuen nach der Starrkörper-Transformation

Messpunkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
1	0,4	-0,6	0,0	0,7
2	0,6	0,0	0,0	0,4
3	0,0	-0,4	0,0	0,2
4	0,2	1,0	0,0	1,1
5	-1,1	-0,3	-0,1	1,0
6	-0,2	0,2	0,0	0,2

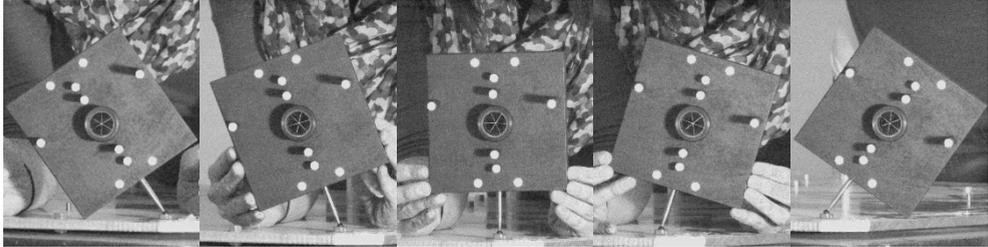
### 4.2 Drehung des Messtasters um denselben Punkt

Ein zweiter Versuchsaufbau vergleicht die berechnete Position der Tastspitze bei unterschiedlichen Orientierungen des Messtasters. Die Tastspitze wurde in ein Trackerkugel-Nest gesetzt und die Zieltafel in verschiedene Raumlagen gedreht. Abbildung 4 zeigt einen Teil der aufgenommenen Zieltafelausrichtungen des Versuchs, in Abbildung 5 sind die ausgewerteten Messergebnisse als Rekonstruktion in Form virtueller Messtaster dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind nur die Rotationen um die y-Achse abgebildet.

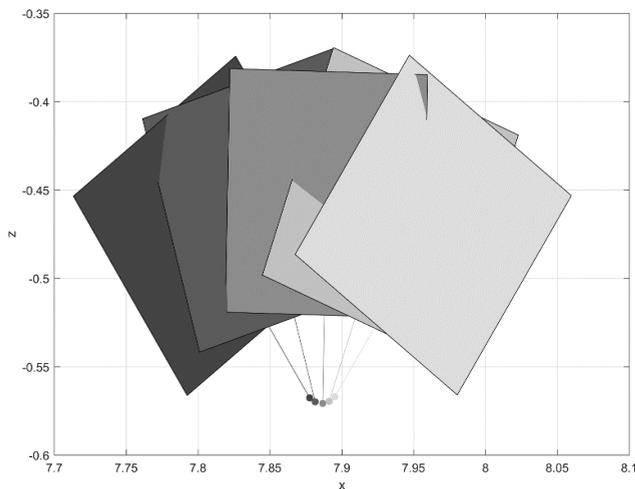
Es ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Raumlagen des Messtasters gut bestimmt werden konnten, die Position der Tastspitze allerdings leicht variiert. Die Standardabweichung aller gemessenen Orientierungen beträgt in der Lage 5 mm, in der Höhe 2 mm. Insbesondere in den Extremlagen, in denen alle Passmarken der Zieltafel gerade noch im Kamerabild sichtbar sind, ergeben sich die maximalen Abweichungen vom Mittelwert: in Lage von 15 mm, in Höhe 4 mm.

Die besseren Ergebnisse in der Höhe (wie auch im vorherigen Versuch) lassen sich durch die Ungenauigkeiten in der Orientierungsbestimmung erklären. Nach der Berechnung des Rückwärtsschnitts wird der Messtaster um den Ursprung des lokalen Koordinatensystems (Mittel-

punkt des Miniprismas) gedreht. Für unterschiedliche Winkel bewegt sich dabei die Position der Tastspitze auf einem Teil einer Kugelschale. Kleine Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Orientierungswinkel wirken sich in dieser Messanordnung stärker auf die Lagegenauigkeit, als auf die resultierende Höhe aus. Natürlich hängt diese Tatsache von der Ausrichtung des Objekts im übergeordneten Koordinatensystem ab und ist nicht immer (wie in diesem Fall) auf die Lage und Höhe übertragbar.



**Abb. 4:** Aufnahmen der unterschiedlichen Zieltafel ausrichtungen (nur Rotation um y-Achse)



**Abb. 5:** Rekonstruierte Zieltafelpositionen und -ausrichtungen (nur Rotation um y-Achse)

## 5 Fazit

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass es möglich ist, mit dem sehr einfach gestalteten, selbst angefertigten Messtaster und mithilfe einer modernen bildgebenden Totalstation 6DOF-Probleme zu lösen. Die Abweichung der Einmessung der Stahlplatte liegt im Millimeterbereich. Die Koordinatenfehler während der Drehungen um denselben Punkt sind höher, aber in Bezug auf die Einfachheit der Zieltafel hinnehmbar. Die Zieltafel hatte einen Materialaufwand von wenigen Euro (abgesehen von dem Miniprisma, das meist beim Kauf eines Tachymeters als Standardzubehör mitgeliefert wird); die Fertigung in unserer Feinmechanischen Werkstatt benötigte eine Arbeitszeit von wenigen Stunden.

Die Vorteile des Einsatzes von 6DOF-Zieltafeln, bzw. Messtastern, in Verbindung mit einer IATS liegen in der Erweiterung der Messmethoden und -möglichkeiten. Zusätzlich zu Aufgaben in der Industrievermessung – ähnlich denen eines Lasertrackers – muss beispielsweise ein mit Passmarken bestückter Lotstab nicht mehr senkrecht gehalten werden, da der Raumvektor bestimmt werden kann. Somit können z. B. Absteckungsarbeiten schneller durchgeführt werden, da das genaue Horizontieren des Lotstabs mit der Libelle entfallen kann. Im weiteren Sinne stellt das vorgestellte Messverfahren (IATS & 3D-Zieltafel) auch eine Realisierung des in JURETZKO (2004) beschriebenen Extrapolationsstabes (SCHERER et al. 2003) dar. Dieser mit codierten Zielmarken und LEDs versehene Stab ermöglicht es – ähnlich einem Kanalmesstab – verdeckte Punkte einzumessen.

Nachteile des derzeitigen Prototyps sind die Konstruktion aus Holz, das sich je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit ausdehnen kann, sowie die Verwendung von passiven Zielmarken. Insbesondere unter schwierigen Beleuchtungsbedingungen wird die automatische Erkennung der weißen Markierungen fehlschlagen. Abhilfe würden LED bringen, die idealerweise im Infrarotbereich arbeiten und durch eine Unterbelichtung der Szene klar vor dem Umgebungslicht getrennt werden können (WAGNER et al. 2013). Die Genauigkeit eines Lasertrackers wird allerdings nie erreicht werden, da einerseits die Distanzmessung nach einem anderen Messprinzip arbeitet und keine vergleichbaren Genauigkeiten liefert. Andererseits wird in Lasertrackern eine Kamera mit variablem Zoom verwendet, die eine konstante vollständige Ausfüllung der Passpunkte des Kamerabildes sicherstellt (LOSER & KYLE 2003). Die Genauigkeit der ermittelten Parameter (Position und Rotation) ist daher bei einem Lasertracker im gesamten Messbereich nahezu konstant, während sie im vorgestellten Verfahren mit zunehmender Messentfernung abnimmt.

## Literatur

- JURETZKO, M. (2004): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- LEICA GEOSYSTEMS AG (2015): Leica Nova MS60 – Datenblatt. Heerbrugg, Schweiz.
- LOSER, R. & KYLE, S. (2003): Concepts and components of a novel 6DOF tracking system for 3D metrology. In: GRÜN, A. (Ed.): Optical 3-D measurement techniques VI, Zürich, Schweiz, S. 55-62.
- LUHMANN, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg.
- SCHERER, M., JURETZKO, M. & WASCHKE, D. (2003): Extrapolationsstab und Verfahren zur Bestimmung von Raumkoordinaten. Patentschrift DE 10143165 C2.
- SCHESTAUEER, B.-J. (2016): 6 DOF-IATS Messsystem. Bachelor's Thesis. Technische Universität München.
- WAGNER, A. (2016): A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images. In: Measurement, 82, S. 64-74.
- WAGNER, A., WASMEIER, P., REITH, C. & WUNDERLICH, T. (2013): Bridge Monitoring by Means of Video-Tacheometer – A Case Study. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 120 (8-9), S. 283-292.