

# Berührungslose Positionsbestimmung von spiegelnden Kugeln mit Methoden des maschinellen Sehens

Philipp Atorf, Arno Heidelberg, Martin Schlüter und Kira Zschiesche

## Zusammenfassung

Die Raumstrecken zwischen den Mittelpunkten spiegelnder Kugeln werden mit einem theodolitbasierten Industriemesssystem hochgenau bestimmt. Dabei werden die Theodolitokulare durch je eine Adapteroptik samt Industriekamera ersetzt. So kommt ein ausschließlich auf Methoden des Machine Vision aufbauender, automatisierter Workflow zum Einsatz, bei dem die Zielpunktdefinition und die einzelnen Theodolitzielungen erfolgreich voneinander entkoppelt werden, ähnlich wie bei der automatischen Zielpunkterkennung von geodätischen Tachymetern auf Vermessungsreflektoren.

## Summary

*The spatial distances between the centers of reflecting spheres are precisely determined using a theodolite-based industrial measuring system. The theodolite eyepieces are each replaced by an adapter optic including an industrial camera. For the first time, an automated workflow based exclusively on Machine Vision methods is used, in which the target definition and the individual theodolite targetings are successfully decoupled from each other, similar to the automatic target recognition of geodetic tachymeters towards survey reflectors.*

**Schlüsselwörter:** Videotachymeter, Modularer Digitalkamertachymeter, Mikrocomputertomographie, Bündelausgleich, Selbstkalibrierung

## 1 Hintergrund

Bei den Messobjekten handelt es sich um geometrische Kalibrierkörper für die Mikrocomputertomographie, also eine 3D-Röntgenbildgebung. Diese Methode entspricht den in Kliniken eingesetzten CT-Scans, wobei die vergleichsweise kleineren Systeme der Mikrocomputertomographie eine stark erhöhte Auflösung aufweisen. Sie stellen die interne Struktur von Objekten zerstörungsfrei als dreidimensionales Bild mit sehr feiner Auflösung dar. Zur geometrischen Kalibrierung dieser Tomographen werden Prüfkörper, sogenannte *Phantoms*, verwendet. Diese Phantoms bestehen aus einem filigran aufgebauten Kunststoffträger mit daran verklebten, spiegelnden, metallischen Kugeln (Abb. 1). Relevant sind die Raumstrecken zwischen den Kugelmittelpunkten mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich und die Rückführbarkeit auf ein international genormtes Längennormal.

Die berührungslose Bestimmung der Abstände der Kugelmittelpunkte gelingt mittels Industrietheodoliten nach



Abb. 1: Kalibrierkörper für die Mikrocomputertomographie, ein sogenanntes Phantom

dem Prinzip des Vorwärtsschneidens. Die bisher händisch durchgeführten Kalibrierungen der Phantoms werden nun durch modulare Digitalkameratheodolite auf Basis der Motortheodoliten Leica TM5100 automatisiert durchgeführt. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung werden auf den spiegelnden, metallischen Kugeln gezielte Reflexionen bzw. ihr virtuelles Bild, stützend auf der geometrischen Optik, hochgenau bestimmt.

Die bereits 1987 realisierten Industriemesssysteme, beruhend auf Videotheodoliten und Vorwärtsschnitten, haben sich in der direkten Konkurrenz zu Lasertrackern nicht am Markt durchgesetzt (vgl. Gottwald 1987 und Wagner et al. 2014). Wir greifen hier ausnahmsweise auf dieses äußerst flexibel nutzbare, aber vielfach vergleichsweise unwirtschaftliche Konzept zurück, weil sowohl die taktile Vermessung mit einem stationären Koordinatenmessgerät (KMG) als auch die berührungslose Vermessung mittels optischem 3D-Scanning auf Basis von Streifenprojektion keine ausreichenden Ergebnisse erbrachten. Die Gründe dafür liegen im filigranen Aufbau der Phantoms einerseits und in den spiegelnden Reflexionseigenschaften der einzelnen Kugeln andererseits. Möglich ist dieser Rückgriff – ohne spezielle neue Entwicklungsarbeiten – durch die in der Vergangenheit im i3mainz erfolgreich abgeschlossenen Entwicklungsarbeiten zum Einsatz von Digitalkameratheodoliten in der Luft- und Raumfahrttechnik und durch laufende Entwicklungsarbeiten hinsichtlich hochfrequenter optischer Zielungen mit handelsüblichen Totalstationen (Schlüter et al. 2009, Hauth et al. 2013, Schlüter und Hauth 2015).

Inspiriert wurden unsere Arbeiten u.a. durch das Design des Lasertrackers mit einer stationären Referenzkugel als Referenzspiegel für das Interferometer (Schwenke et al. 2008). Inhaltliche Bezüge bestehen ferner zu den messtechnischen Konzepten der in den letzten zehn Jahren zur Marktreife gelangten Deflektometrie (Schuth 2017).

## 2 Messtechnische Hardware

Hardwareseitig kommen zwei Motortheodolite Leica TM5100 mit je einer panchromatisch aufzeichnenden 5MP Industriekamera IDS Imaging UI-3480LE-M-GL zum Einsatz (Abb. 2). Die Kameras zeichnen sich durch ein geringes Gewicht von etwa 40 g inkl. Gehäuse aus, USB 3.0 ermöglicht Taktraten zwischen 25 MHz und 104 MHz.

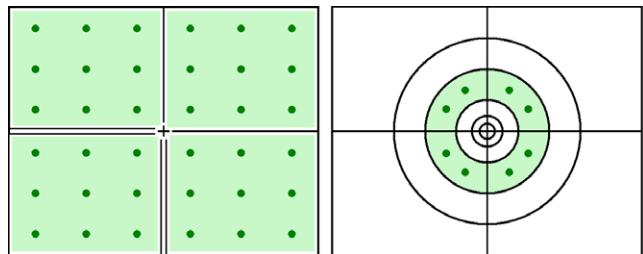


**Abb. 2:**  
Prototyp des  
Digitalkamera-  
theodolits  
inkl. zwei ex-  
zentrischen  
LED-Leuchten,  
Okularadapter  
und C-Mount  
Industriekamera.  
Nicht darge-  
stellt sind die  
Zugentlastung  
des USB-Kabels  
und die Gegen-  
gewichte zur  
Kamera.

Zur Maßstabsfestlegung wird stets ein Keramiknormal der Firma GOM verwendet, für das zwei Distanzen à 65 mm zwischen je zwei ringförmig codierten Zielmarken mit einer Genauigkeit von  $\pm 1,8 \mu\text{m}$  bei einer Messunsicherheit von 95 % vorliegen. Beide Distanzen sind zurückgeführt auf nationale Normale, mit denen die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI) darstellt.

## 3 Automatisierte Messung und Selbstkalibrierung

Die Selbstkalibrierung eines Digitalkameratachymeters erfolgt, indem ein feststehender Zielpunkt fokussiert wird und das Tachymeter anschließend mehrere Winkelstel-



**Abb. 3:** Selbstkalibrierraster (exemplarisch) für die Selbstkalibrierung des kompletten Blickfelds eines Tachymeters (links) und Selbstkalibrierraster für einzelne hochgenaue Zielungen mit Industrietheodoliten (rechts). Dargestellt sind die Strichkreuze, die scheinbaren Orte des Zielpunkts (dunkelgrün) und der zugehörige Gültigkeitsbereich der resultierenden Kalibrierparameter (hellgrün).

lungen anfährt, sodass der Zielpunkt an unterschiedlichen Stellen im Bild erscheint (vgl. Abb. 3). Das Anfahren erfolgt vollautomatisch auf Basis von zunächst nur grob angenäherten Startwerten für die Kalibrierparameter. Die abschließend erzielte Genauigkeit ist *nicht* von einem exakten Anfahren der Sollpositionen abhängig, ein grob angenähertes Anfahren ist stets ausreichend. Pro Sollposition werden Kompensator- und Teilkreisablesungen vorgenommen und im zugehörigen Messbild erfolgt direkt die subpixelgenaue Bildkoordinatenbestimmung für den Zielpunkt mittels digitaler Bildkorrelation.

Die Selbstkalibrierung von Digitalkameratachymetern auf Basis geodätischer Totalstationen wird auf der Grundlage folgender Modellierung zwischen einem Vektor  $\mathbf{X}$  im Objektraum und einem Vektor  $\mathbf{x}'$  im Bildraum berechnet:

$$\mathbf{X} = D \cdot \mathbf{R}_{IP} \cdot \mathbf{R}_{IA} \cdot \mathbf{R}_{IP}^T \cdot [\mathbf{R}_{Zd} \cdot \mathbf{R}_{Hz}]^T \cdot \mathbf{R}_K \cdot \frac{\mathbf{x}'}{|\mathbf{x}'|} \quad (1)$$

mit

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' + \Delta x \\ c \\ y' + \Delta y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Dabei steht  $D$  für die in der Regel reflektorlos gemessene Raumstrecke zum Objektpunkt. Mit den Rotationsmatrizen  $\mathbf{R}_{IP}$  und  $\mathbf{R}_{IA}$  werden nicht-kompensatorkorrigierte Theodolitablessungen in kompensatorkorrigierte Theodolitablessungen überführt, mit  $\mathbf{R}_{Zd}$  und  $\mathbf{R}_{Hz}$  werden nicht-kompensatorkorrigierte Theodolitablessungen, also Horizontalrichtungen Hz und Zenitwinkel Zd in die zugehörigen Rotationsmatrizen überführt (vgl. die ausführlichen Darstellungen in Walser (2004) und Schlüter et al. (2009)). Bildraumseitig werden über die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_K$  drei mögliche Rotationen des Kameraperspektivsensors bezüglich des Referenzstrichkreuzes modelliert, der Vektor  $\mathbf{x}'$  enthält die verzeichnungskorrigierten Bildkoordinaten  $x'$  und  $y'$  sowie die insgesamt aus allen optischen Komponenten resultierende Kamerakonstante  $c$ .

Für die Verzeichnungskorrekturen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  werden ausgewählte Korrekturfunktionen aus dem standardisierten Satz photogrammetrischer Korrekturfunktionen nach Luhmann (2017) verwendet, und zwar  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  für die radialsymmetrische Verzeichnung;  $B_1$ ,  $B_2$  für die radial-asymmetrische und die tangentiale Verzeichnung;  $C_1$ ,  $C_2$  für Affinität und Scherung. Vereinfachend werden bislang alle Theodolit- und Kompensatorablesungen als fehlerfrei in das Modell eingeführt, nur den Bildkoordinaten  $x'$  und  $y'$  werden Residuen zugeordnet. Der einer Selbstkalibrierung zugeordnete Parametersatz umfasst insgesamt bis zu elf Parameter, die oben aufgeführten drei Rotationen, eine Kamerakonstante und sieben Verzeichnungsparameter. Dieser Parametersatz gilt streng genommen nur für die zugehörige Fokusstellung und deckt in der Regel das komplette Bildfeld ab (vgl. Abb. 3 links).

Für Digitalkameratheodolite werden mit  $D = 1$  lediglich normierte Richtungswinkel bestimmt, da keine Streckenmessung durchgeführt wird. Für die im Folgenden dargestellten, automatisiert durchgeföhrten Zielungen muss das Kamerablickfeld nicht vollständig kalibriert werden. Vielmehr empfiehlt sich die Nutzung eines Selbstkalibrierschemas gemäß Abb. 3 (rechts), bei dem die Zielpunkte näherungsweise an Positionen mit einem etwa einheitlichen radialen Abstand zum Bildmittelpunkt platziert werden. Gemäß dieser Voraussetzung werden keine Verzeichnungsparameter in Abhängigkeit des radialen Abstands angesetzt, sondern es wird mit dem vereinfachten Ansatz

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{IP} \cdot \mathbf{R}_{IA} \cdot \mathbf{R}_{IP}^T \cdot [\mathbf{R}_{Zd} \cdot \mathbf{R}_{Hz}]^T \cdot \frac{\mathbf{x}'}{|\mathbf{x}'|} \quad (3)$$

gearbeitet, wobei die Bildkoordinaten  $x'$  und  $y'$  nun mittels der acht Parameter einer ebenen Projektivtransformation anstatt der oben aufgeführten elf Parameter korrigiert werden. Die Rotationsmatrix und die Kamerakonstante  $c$  entfallen, der Vektor  $\mathbf{x}'$  wird wie oben auf die Länge Eins normiert. Die konkreten Formeln finden sich erneut bei Luhmann (2017). Pro Zielpunkt werden vollautomatisch acht Zielungen in beiden Fernrohrlagen durchgeföhr. Aus insgesamt 32 Beobachtungen pro Zielpunkt werden jeweils acht Parameter der Selbstkalibrierung sowie die ausgeglichenen Horizontalrichtungen und Zenitwinkel in jeder der beiden Fernrohrlagen durch vermittelnde Ausgleichung kalkuliert. Die acht Parameter der Selbstkalibrierung gelten stets nur für eine Fokuseinstellung, aber für beide Fernrohrlagen.

#### 4 Zielungen auf spiegelnde Kugeln

Die interaktive Anzielung spiegelnder Kugeln ist mit hoher Genauigkeit möglich, aber es handelt sich bei spiegelnden Kugeln keineswegs um ideale Ziele (vgl. Abb. 4).

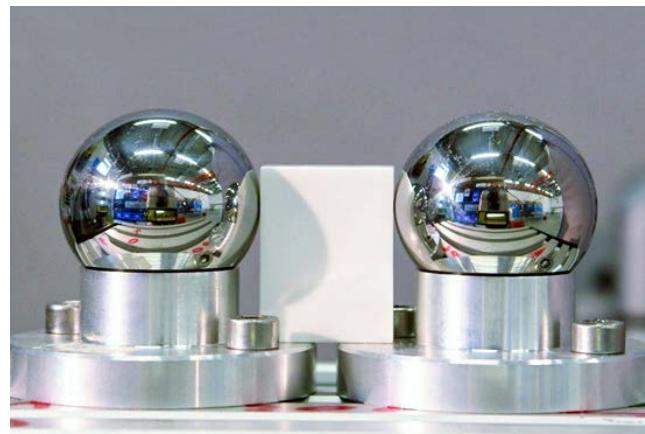


Abb. 4: Improvisierter Sollmaßstab aus zwei Stahlkugeln mit Durchmessern von 1,5" in Magnetnestern und einem keramischen Parallelendmaß der Länge 30 mm

Das Spiegelbild erscheint je nach Umgebung stark heterogen. Deshalb ist die automatisierte, subpixelgenaue Ermittlung des Kugelaßenrandes im digitalen Bild mittels Kantenfindung nicht trivial (Bürki et al. 2010). Vor diesem Hintergrund untersuchte Zschiesche (2016), ob sich das Spiegelbild von exzentrisch über und unter dem Theodolitfernrohr montierten LED-Leuchten (vgl. Abb. 2) für die vollautomatische Vermessung spiegelnder Kugeln eignet.

Die beiden LED-Leuchten befinden sich dabei in etwa gleichem Abstand oberhalb und unterhalb des Fernrohrs.

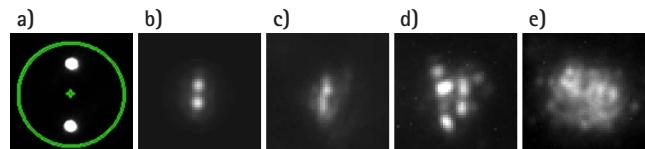


Abb. 5: (a) Abbild der Leuchten auf einer Stahlkugel mit Durchmesser von 1,5". (b) Abbild der Leuchten auf einer Kugel mit Durchmesser von 1 mm. (c)–(e) Abbild der Leuchten auf einer Kugel mit Durchmesser von 1 mm bei Störungen durch Verschmutzungen oder Korrosion

Wird eine spiegelnde Kugel angezielt, sind die beiden Reflexionen der Leuchten auf der Kugel als virtuelles Bild zu erkennen (vgl. Abb. 5a und 5b). Alle Zielungen erfolgen aus einer Entfernung von etwa 0,7 m, bedingt durch die kürzeste mögliche Zielweite der Theodoliten Leica TM5100.

Im Idealfall fällt der Schwerpunkt der Lichtquellen mit dem Achsenzentrum des Theodolits zusammen. Der Schwerpunkt der beiden virtuellen Leuchtpunkte liegt dann auf dem Strahl vom Achsenzentrum des Theodolits zur Kugelmitte. In der Praxis verbleiben Exzentrizitäten durch nicht ideal positionierte Leuchten – diese Exzentrizitäten werden grundsätzlich durch die konsequente Messung in beiden Fernrohrlagen eliminiert. Rechentechnisch entspricht dies einer gruppenweisen Bestimmung von Zielachs- und Höhenindexabweichungen. Zschiesche (2016) zeigt darüber hinaus mittels Ray Tracing und

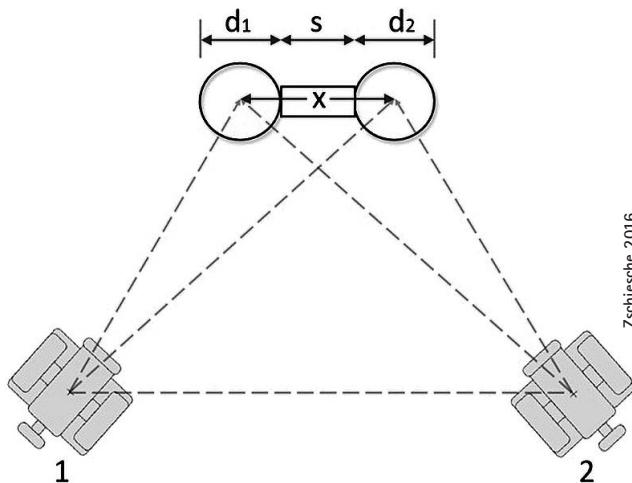


Abb. 6: Schematischer Laboraufbau zur Bestimmung des Mittelpunktabstandes  $x$  zweier Stahlkugeln

Tab. 1: Ergebnisse der Mittelpunktabstandsmessungen

	Abstand der Kugelmittelpunkte	Abschätzung Genauigkeit
Sollmaße	68,100 mm	$\pm 0,001$ mm
Mikrometer	68,098 mm	$\pm 0,001$ mm
Theodolit-IMS	68,105 mm	$\pm 0,004$ mm

den Lehrbuchformeln zur geometrischen Optik (Demtröder 1999) auf, dass bereits eine zentimetergenaue Positionierung der beiden Leuchten ausreicht, um geometrische Korrekturbeträge für die virtuellen Bilder von kleiner einem Mikrometer am Objekt zu erzielen. Dabei wirkt sich positiv aus, dass das virtuelle Bild stark verkleinert wird, und zwar umgekehrt proportional zum Kugeldurchmesser, bei konstantem Betrachtungsabstand.

Diese Annahmen wurden durch die Bestimmung eines improvisierten Sollmaßstabs mit vergleichsweise sehr großen Stahlkugeln messtechnisch experimentell verifiziert (vgl. Abb. 4 und Abb. 6). Die Genauigkeit des Mittelpunktabstands wird aus den Herstellerangaben mittels Varianzfortpflanzung abgeschätzt, wobei das keramische Parallelendmaß als quasi fehlerfrei eingeführt wird, vgl. Tab. 1. Die Herstellerangaben wurden durch Einzelmessungen aller drei Komponenten mit einer digitalen Bügelmessschraube Mitutoyo MDC-50MJ je zehn Mal an unterschiedlichen Positionen überprüft. Die Genauigkeitsangabe des Herstellers der Bügelmessschraube spiegelt sich in Wiederholgenauigkeiten von besser als einem Mikrometer für die einzelnen Komponenten wider. Die Genauigkeitsangabe für das Gesamtergebnis aus den Mikrometermessungen wird erneut mittels Varianzfortpflanzung abgeschätzt (Tab. 1).

Die Bestimmung der Mittelpunktabstände mit dem theodolitbasierten Industriemesssystem erfolgt nach dem Prinzip des räumlichen Vorwärtseinschneidens. Die in Tab. 1 angegebene Standardabweichung resultiert aus

der freien Netzausgleichung mit Gesamtspurminimierung (vgl. Abb. 6). Dabei werden alle Richtungsbeobachtungen und Zenitwinkel mit einer a priori Standardabweichung von je  $\pm 0,3$  mgon eingeführt, ferner die beiden 3D-Strecken des keramischen Kalibriernormals mit je  $\pm 1,8 \mu\text{m}$ . Das Kalibriernormal wurde direkt hinter den Kugeln platziert und ist nicht in Abb. 6 dargestellt.

Diese Ergebnisse aus Zschiesche (2016) werden als plausibel bewertet, zumal eine nicht optimale Platzierung von Kugeln und Parallelendmaß zueinander sowie etwaige Einflüsse durch Fett oder Staub erwarten lassen, dass der tatsächliche Abstand der Kugelmitten eher größer ist als die Summe aus den einzelnen Komponenten.

## 5 Automatisierte Vermessung von Phantoms

Im Herbst 2018 wurde erstmals eine Kleinserie von Phantoms ausschließlich nach dem oben dargestellten Konzept vermessen. Es zeigte sich, dass die Messaufgabe sehr gute Voraussetzungen für die Wiederverwendbarkeit von einmalig interaktiv festgelegten Templates für die automatische Zielpunkterkennung bietet. Pro ringkodierter Zielmarke der Kalibrierplatte reicht je ein Template aus, für saubere Kugeln ist grundsätzlich ein insgesamt geeignetes Template wiederverwendbar. Jedes interaktiv definierte Template kann stets vollautomatisch auch in der zweiten Fernrohrlage genutzt werden.

Die Fehlersituation ist etwas günstiger als für die in Abschnitt 4 dargestellte Situation, da die Raumstrecken zwischen den zu vermessenden Kugeln im Bereich von 15 mm bis 20 mm liegen und damit nur noch etwa ein Viertel der beiden maßstabsgebenden Referenzstrecken betragen (vgl. Abb. 7). Die 3D-Netzausgleichung mit Teilspurminimierung auf die drei Kugelmittelpunkte lässt nun, je nach konkreter Ausrichtung des Phantoms im Raum, Standardabweichungen von  $\pm 3 \mu\text{m}$  bis  $\pm 4 \mu\text{m}$  erwarten.

Um eine möglichst durchgreifende Kontrolle zu erhalten, werden die Phantoms in vier unterschiedlichen Ausrichtungen automatisiert vermessen, anschließend werden zunächst die Raumstrecken aller vier Messepochen separat voneinander ausgewertet und verglichen: Grundsätzlich bleiben die Beträge der Verbesserungen zu allen einzelnen Raumstrecken unter  $5 \mu\text{m}$ , Wiederholungsmessungen fallen nicht an, abgesehen von dem unerwarteten Mehraufwand durch die unten diskutierte Korrosionsproblematik.

Die modulare Montage der externen Okularkamera erfordert eine aktive Strichkreuzverfolgung während des gesamten Messprozesses. In Abb. 8 und Abb. 9 sind exemplarisch die auftretenden Strichkreuzbewegungen während eines Tages von etwa 11.00 bis 17.00 Uhr mit 600 Einzelzielungen aufgetragen. Es ist offensichtlich, dass Änderungen der Strichkreuzpositionen ausschließlich nach längeren Pausen und überwiegend nach dem

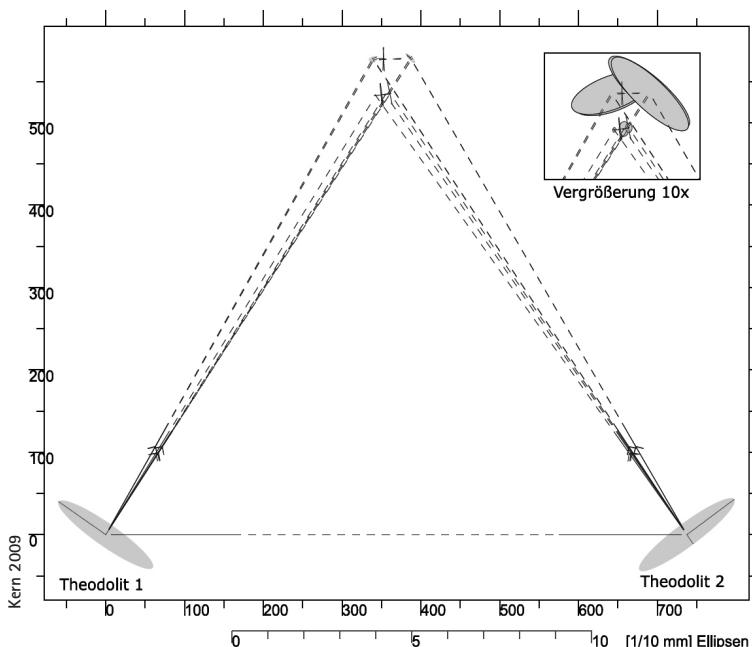


Abb. 7: Fehlerellipsen der 3D-Netzausgleichung mit Teilspurminimierung auf drei Objektpunkte

Wechsel der Fernrohrlage auftreten. In der hier eingesetzten Kamerakonfiguration entspricht die Länge eines Pixels bei großen Distanzen nur knapp 0,2 mgon. Bedingt durch die deutlich geringere Vergrößerung des panfokalen Fernrohrs der Leica TM5100 bei kurzen Zielweiten, beträgt die Winkeländerung bei den hier genutzten Zielweiten von etwa 0,7 m nur noch 0,6 mgon. Die Korrektur der Strichkreuzbewegung erfolgt über eine 2D-Ähnlichkeitstransformation auf ein anfangs aufgenommenes Referenzbild der Strichkreuzebene. Die Schnittpunkte der

fünf konzentrischen Ringe des Industriestrichkreuzes mit den beiden Strichlinien sowie der zentrale Schnittpunkt beider Strichlinien werden dabei im Sinne eines Réseaugitters verwendet: Insgesamt bietet das Industriestrichkreuz einundzwanzig markante Schnittpunkte an (vgl. Abb. 3 rechts). Je nach Bildhintergrund werden hier stets mindestens sechs, im Mittel jedoch sechzehn der insgesamt einundzwanzig markanten Linienschnittpunkte mittels Kreuzkorrelation erfolgreich mit einer Genauigkeit von besser als  $\pm 0,2$  Pixel detektiert.

Die verhältnismäßig langen Pausen zwischen den einzelnen Messblöcken in den Abb. 8 und 9 haben ihre Ursache darin, dass während dieser Messkampagne immer wieder Probleme mit Mikrokorrosion oder lokalen Verschmutzungen der Kugeloberfläche auftraten. Nur wenn alle drei Kugeln eines Phantoms von beiden Theodoliten aus gesehen je ein klares Spiegelbild ähnlich der Abb. 5b liefern, kann ein erfolgreicher Messzyklus gestartet werden. Hier mussten stets vorab alle Positionen angefahren und visuell kontrolliert werden, da bei einzelnen Sichten immer wieder Spiegelbilder wie in Abb. 5c-e auftraten, woraufhin die aktuelle Ausrichtung des Phantoms verworfen und ggf. wiederholt korrigiert werden musste, bis die genannte Bedingung erfüllt war. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber sollte sich dieses bislang unbekannte, aber zeitraubende Problem zukünftig durch Verwendung stets fabrikneuer Kugeln und Sauberkeit beim Verkleben vermeiden lassen.

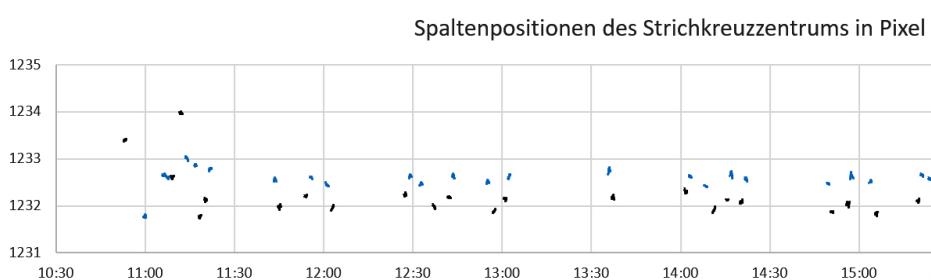


Abb. 8: Strichkreuzbewegung in Pixeln während mehrerer Phantomvermessungen im Verlauf eines Tages

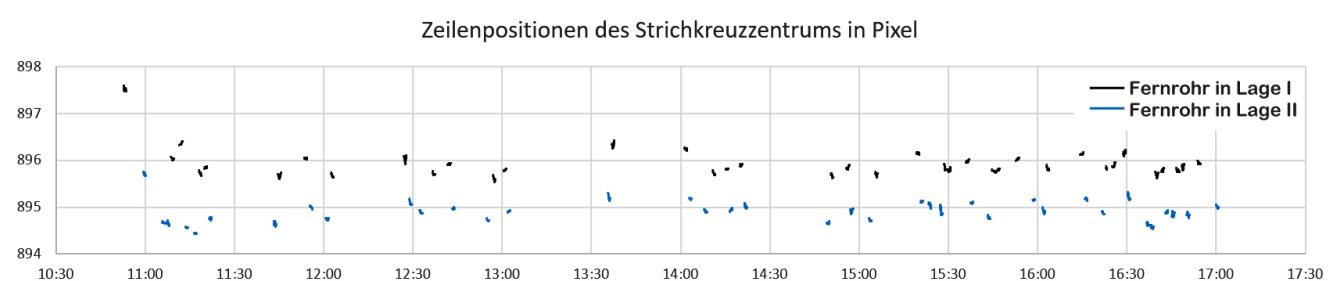


Abb. 9: Strichkreuzbewegung in Pixeln während mehrerer Phantomvermessungen im Verlauf eines Tages

## 6 Bewertung und Ausblick

Die berührungslose Vermessung sog. Phantoms für Mikrocomputertomographen hat uns über mehrere Jahre hinweg immer wieder punktuell die Möglichkeit eröffnet, den aktuellen Stand der Software für Modulare Digitalkameratachymeter MoDiTa 2.0 hinsichtlich Bedienerfreundlichkeit und Ergebnisqualität auf den Prüfstand zu stellen. Primär zielt MoDiTa mit den seitens Heppe (2015) und Heidelberg (2016) angestoßenen Arbeiten auf die präzise, reflektor- und berührungslose, hochfrequente Erfassung von benutzerseitig im digitalen Bild vorgegebenen Zielpunkten. Damit werden die bekannten Trackingoptionen von geodätischen Tachymetern auf Vermessungsreflektoren erweitert für reflektorlose Zielungen, ohne dass die Bedeutung der nun zeitabhängigen Einzelpunktkoordinate (wie beim 3D-Scanning) verlorengeht.

Wir erwarten von den Modularen Digitalkameratachymetern wertvolle Impulse als Ad-hoc-Werkzeug für das optisches Structural Health Monitoring von technischen Anlagen und Bauwerken. Hier bietet die geodätische Herangehensweise bekannte Vorteile, erstens durch die absolute Georeferenzierung und zweitens durch die Option zur absoluten, zeitlichen Referenzierung mittels GPS-getriggerten, hochfrequent aufgezeichneten Messbildern.

Denkbar ist der Einsatz der hier dargestellten Messstrategie auch im Zusammenhang mit Sondervermessungen in der Luft- und Raumfahrttechnik, wo Autokollimationstheodolite nach wie vor erfolgreich eingesetzt werden. Kugeldurchmesser von 0,5" und 1,5" sind Standard in der Welt der Lasertracker, spiegelnde Stahlkugeln sind auch in höchster Qualität erheblich preiswerter erhältlich als kugelförmige Präzisionsreflektoren – interessante Voraussetzungen sind also erfüllt, um 3D-Netze unter Einbeziehung von Industrietheodoliten und Lasertrackern neu zu denken und zu realisieren.

### Dank

Besonderer Dank gebührt Margaritha Vogt M. Eng. für die gelungenen fotografischen Abbildungen. Bei Stefan Boes, Torsten Walter, Matthias Mayer, Sebastian Kuhlke, Jens Grünke bedanken wir uns für Geduld und Sorgfalt bei der händischen Vermessung der Phantoms in den Jahren 2013 bis 2015.

### Literatur

- Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P., Oesch, H.-P. (2010): DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for Total Stations. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zürich, IEEE.
- Demtröder, W. (1999): Experimentalphysik 2. Springer, Berlin.
- Gottwald, R. (1987): Kern E2-SE – Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avN), 98, 4, 147–154.
- Hauth, S., Schlüter, M., Thiery, F. (2013): Schneller und ausdauernder als das menschliche Auge: Modulare Okularkameras am Motortachymeter. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avN), 120(2013)6, 210–216.
- Heidelberg, A. (2016): Anwendungsorientierte Integration von Sonderfunktionen digitaler Industriekameras für Modulare Digitalkameratachymeter. Bachelorarbeit B0207, Hochschule Mainz, nicht veröffentlicht.
- Heppe, M. (2015): Erweiterung der Multistation Leica MS50 zum Modularen Digitalkameratachymeter. Bachelorarbeit B0173, Hochschule Mainz, nicht veröffentlicht.
- Kern, F. (2009): [www.xdesy.de](http://www.xdesy.de), letzter Zugriff 11.01.2019.
- Schlüter, M., Hauth, S. (2015): Modulare Digitalkameratachymeter. Schlussbericht im Rahmen des BMBF-Programms Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen. Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover (TIB/UB).
- Schlüter, M., Hauth, S., Heß, H. (2009): Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkameratheodolite für technische Präzisionsmessungen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2009, 134. Jg., 22–28.
- Schuth, M., Buerakov, W. (2017): Handbuch Optische Messtechnik. Hanser, München.
- Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F. (2008): Geometric error measurement and compensation of machines – An update. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008), 660–675.
- Wagner, A., Wasmeier, P., Wunderlich, T., Ingensand, H. (2014): Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avN), 121(2014)5, 171–180.
- Walser, B. H. (2004): Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Diss. ETH no. 15773, Zürich.
- Zschiesche, K. E. (2016): Automatisierte Kalibrierung von Prüfkörpern für Mikro- und Nanotomographen. Masterarbeit KM078, Hochschule Mainz, nicht veröffentlicht.

### Kontakt

Philipp Atorf M. Sc.  
Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz,  
Hochschule Mainz  
Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55128 Mainz  
[philippatorf@gmail.de](mailto:philippatorf@gmail.de)

Arno Heidelberg M. Sc.  
infraView GmbH, Mainz  
[arno.heidelberg@infraview.net](mailto:arno.heidelberg@infraview.net)

Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter  
Hochschule Mainz – University of Applied Sciences  
Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55128 Mainz  
[martin.schlüter@hs-mainz.de](mailto:martin.schlüter@hs-mainz.de)

Kira Zschiesche M. Sc.  
e-netz Südhessen GmbH & Co. KG  
[kira.zschiesche@web.de](mailto:kira.zschiesche@web.de)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodesie.info](http://www.geodesie.info).