

Entwicklung einer großen Invardraht-Maßverkörperung zur Anwendung in der Industriephotogrammetrie

OLIVER KAHMEN¹ & THOMAS LUHMANN¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird eine Arbeit vorgestellt, die es als Ziel hatte, eine Maßverkörperung zu entwickeln, welche speziell bei Projekten großer Volumina höchste Genauigkeiten photogrammetrischer Vermessungen ermöglicht. Sie soll die Genauigkeit herkömmlicher Referenzmaßverkörperungen übertreffen und möglichst den Einsatz eines kostspieligen Lasertrackers zur Erzeugung eines Referenzpunktfeldes überflüssig machen. Die Entwicklung der 21 m langen Invardraht-Maßverkörperung unter Berücksichtigung physikalischer Materialeigenschaften bildet den Kern der Arbeit. Verschiedene Maßverkörperungen werden an einem praktischen Beispiel hinsichtlich ihrer Qualität untersucht, um einen Überblick des tatsächlichen Nutzens der neu entwickelten Maßverkörperung gegenüber herkömmlichen Systemen zu gewinnen.

1 Einleitung

Die industrielle Messtechnik bildet in vielen Sektoren der modernen Fertigung und Qualitätssicherung einen wichtigen Bestandteil. In interdisziplinärer Anwendung hat die optische 3D-Messtechnik höchste Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen und bedarf daher individueller Lösungen auf hohem Niveau. Eine individuelle Lösung für großvolumige Objekte wurde in dieser Arbeit im Hause der sigma3D GmbH in Gescher erarbeitet und an der Jade Hochschule Oldenburg zum Abschluss des Studiengangs *Angewandte Geodäsie (B.Sc.)* vorgelegt.

In der Photogrammetrie stellt die Aufgabe der absoluten Skalierung einen wesentlichen Qualitätsfaktor dar. Die Skalierung maßstabsloser 3D-Punktwolken wird in der Praxis durch standardisierte CFK-Maßverkörperungen namhafter Hersteller realisiert. Diese werden mit sehr hoher Güte hergestellt und üblicherweise in Längen von 0,5-2 m vertrieben. Da sich Kalibrier- und Messgenauigkeiten einer Maßverkörperung fortpflanzend in dem Gesamtergebnis widerspiegeln, sind kleine Maßverkörperungen für Messobjekte großer Ausdehnung nur bedingt geeignet. Eine große Maßverkörperung kann daher im Anwendungsfall von Projekten großer Volumina Genauigkeitsvorteile mit sich bringen. Die Entwicklung einer Invardraht-Maßverkörperung soll neben einem Genauigkeitserfolg zusätzlich den Kostenfaktor gering halten, um mit herkömmlichen Referenzkörpern bzw. Instrumenten zur Erzeugung von Passpunktfeldern in Wettbewerb treten zu können.

2 Theoretische Genauigkeitsbetrachtung

Die mathematische Modellierung der Bündelblockausgleichung auf Grundlage der Kollinearitätsgleichungen stellt sich wie folgt dar:

¹ Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Ofener Straße 16/19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: oliver.kahmen@posteo.de, luhmann@jade-hs.de

$$\begin{aligned}
 x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\
 y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Durch die Einführung einer Bedingungsgleichung kann eine Streckenbeobachtung in der Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden. Die Beobachtungsgleichung für Strecken im Raum lautet:

$$s = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \tag{2}$$

Liegen Referenzpunkte vor, können die sieben Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Maßstab) des Datums über die Informationen der Referenzpunkte gelöst werden. Liegen keine Passpunkte in einem übergeordneten System vor, wird die Ausgleichung nach dem Prinzip der freien Netzausgleichung gerechnet.

Die bekannte Streckeninformation fließt als beobachtete Größe mit einem ihrer Genauigkeit entsprechenden Gewicht in den Ausgleichungsprozess ein und legt den Maßstab als Datumparameter fest. Die Strecke wird als Maßverkörperung physisch definiert und wirkt wie folgt nach der folgenden schematischen Darstellung auf die Bündelblockausgleichung ein.

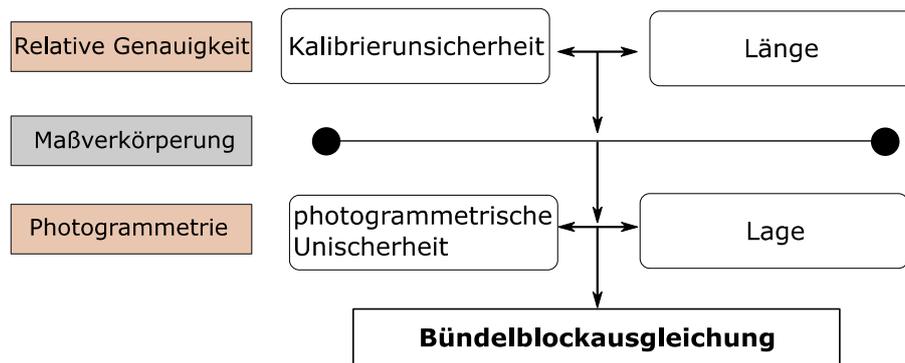


Abb. 1: Definition und Wirkung einer Maßverkörperung (KAHMEN 2015: 20)

Nach Abb. 1 wird die Maßverkörperung mit einer relativen Genauigkeit definiert, die von Kalibrierunsicherheit und Länge abhängt. Die Maßverkörperung wird dann mit einer von der Lage im Objektraum und photogrammetrischen Messunsicherheit abhängigen Güte in den Ausgleichungsprozess als übergeordnete Streckenbeobachtung eingeführt. Bei diesem Ansatz der Verwendung der Bündelblockausgleichung sind also vier Parameter bzgl. der Maßverkörperung von Bedeutung, die das Resultat beeinflussen:

1. Kalibrierunsicherheit
2. Länge
3. Photogrammetrische Unsicherheit
4. Lage im Objektraum

Die Unsicherheit der gemessenen Maßstabspunkte bei kurzen Maßverkörperungen wirkt sich auf extrapolierende Weise auf die Objektkoordinaten aus, wohingegen große Maßverkörperungen

keine extrapolierende Fehlerfortpflanzung aufweisen, da diese das gesamte Messvolumen im Idealfall umschließen.

Da die photogrammetrische Unsicherheit mit zunehmender Objektdimension und Aufnahmedistanz größer wird, wirkt sich die Kalibrierunsicherheit nur noch sekundär auf die Unsicherheit der Maßstabspunkte aus. Die Unsicherheit durch die Photogrammetrie selbst liefert also einen höheren Anteil am Unsicherheitsbudget als die Kalibrierunsicherheit der Maßverkörperung. Es kann daher folgende Hypothese aufgestellt werden:

„Große Maßverkörperungen können unter Umständen, auch mit vergleichsweise hoher Kalibrierunsicherheit, bessere Ergebnisse erzielen, als kleine Maßverkörperungen mit geringer Kalibrierunsicherheit.“

3 Entwicklung der Invardraht-Maßverkörperung

Seit vielen Jahrzehnten sind Drähte in der Geodäsie als zuverlässiges Mittel zur Bestimmung von Strecken und Streckenänderungen bekannt, wie es KAHMEN (2005: 148ff) für den Anwendungsfall der hochgenauen Streckenmessung zeigt. Nach dem Vorbild des Distometer ISETH (KERN 2016) wird eine Konstruktion entwickelt, die eine physische Länge von 21 m realisiert. Dazu wird ein Draht an einem Punkt fixiert und an einem Gegenpunkt linear verfahrbar gelagert. Bei dem Aufbau der Konstruktion muss der Draht zunächst am Fixpunkt an einem 360° drehbaren Kopf fixiert werden. Durch das Anbringen einer definierten Zugkraft am verfahrbaren Gegenpunkt wird dieser dann auf Spannung gebracht. Der Draht ist in eine Drahtkupplung geklemmt, welche wiederum an den drehbaren Kopf arretiert werden kann. Durch den drehbaren Zylinder kann sich das System selbstständig zur Zugkraftichtung ausrichten.

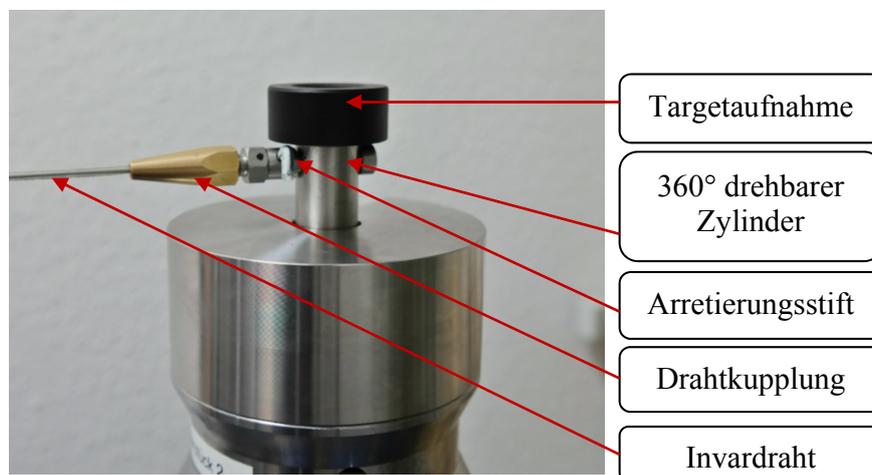


Abb. 2: Fixiertes Drahtende

Die Targetaufnahme ermöglicht die Messung des Punktes sowohl durch ein 1,5“ SMR (Spherically Mounted Reflector) mittels Lasertracker, wie auch durch photogrammetrische Methoden mit Hilfe einer 1,5“ Photogrammetrie-Halbkugel.

Die Lineareinheit auf der Gegenseite ermöglicht die Realisierung eines definierten Abstandes. Durch die angebrachte Zugkraft kann sich der 360° kugelgelagerte Linearzylinder vor und zurück bewegen, bis sich die Länge des Drahtes je nach herrschender Zugspannung stabil eingependelt

hat. Das Stativ, auf dem die Lineareinheit angebracht ist, muss dabei lediglich auf ± 5 cm genau, im Abstand von 21 m aufgestellt werden.

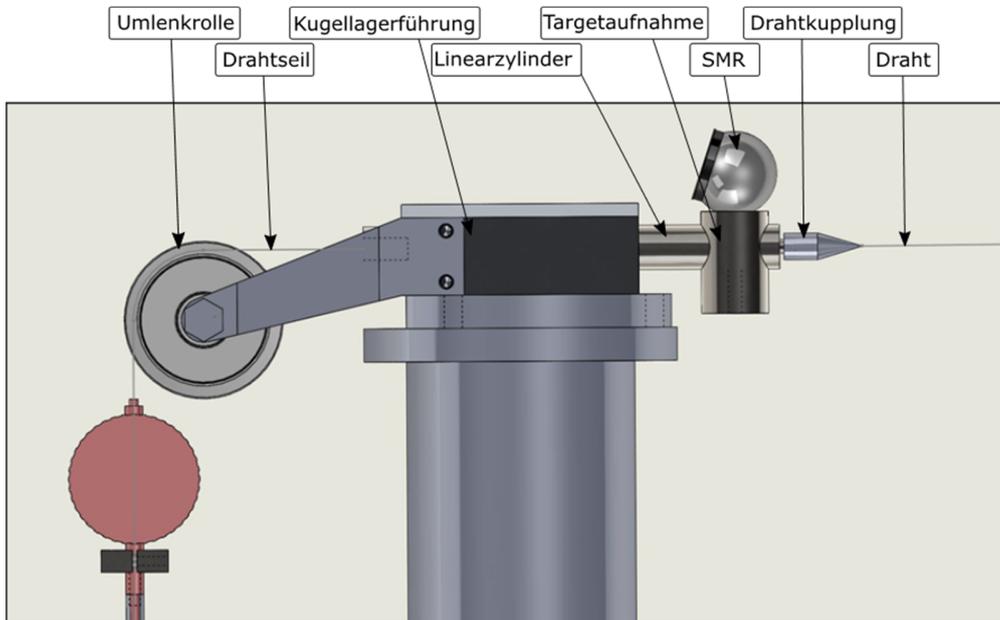


Abb. 3: Seitenansicht des linear verfahrenen Drahtendes

Eine Umlenkrolle, welche mit dem Linearzylinder verbunden ist, ermöglicht die Kraftanbringung über ein Spannsystem.

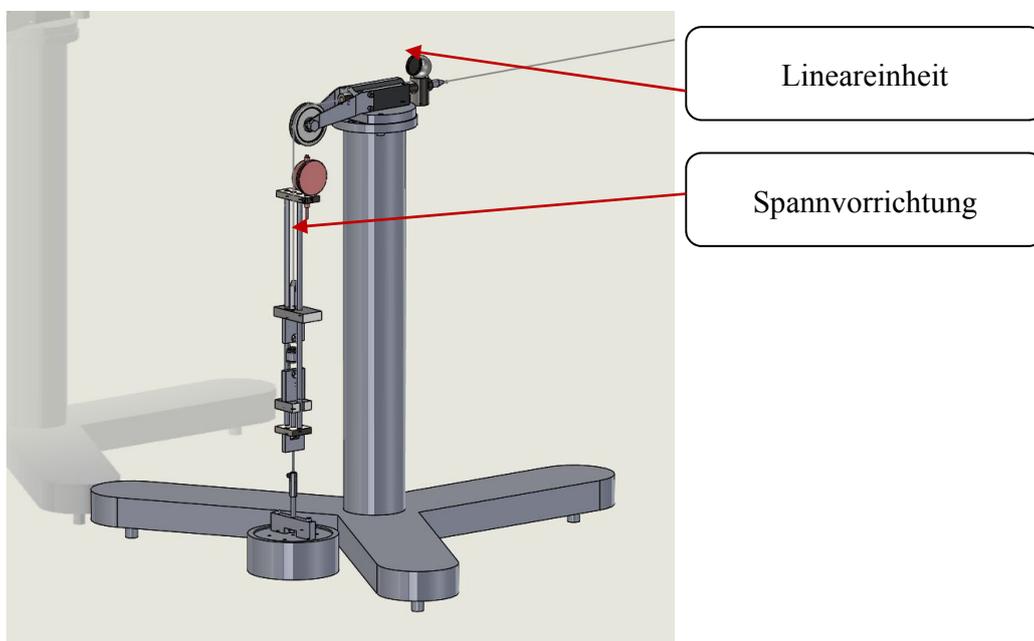


Abb. 4: 3D-Ansicht des Statives mit Lineareinheit und Spannvorrichtung

Die eigens konstruierte Spannvorrichtung ermöglicht die Erzeugung einer konstanten Zugkraft. Ein reibungsarmer PTFE-Block gleitet je nach Spannkraft auf einem Rundstahl auf und ab. Eine handelsübliche Messuhr greift dann den Stand des Blocks ab, woraufhin sich die geometrische Messgröße aufgrund bekannter Zugfederparameter in eine physikalische Zugkraft umrechnen lässt. Die Spannkraft, die größtmögliche Stabilität des gesamten Systems schafft, ohne dabei die Elastizitätsgrenze des Invardrahtes mit 1 mm Durchmesser zu überschreiten, beträgt 80 N. Die absolute Kraft ist dabei weniger interessant als ihre Reproduzierbarkeit.

Die absolute Drahtlänge kann im Labor mit hoher Güte durch interferometrische Lasertracker-Messungen (IFM) nach dem Abbe'schen Prinzip kalibriert werden. In der eigentlichen Anwendung wird der Draht dann vor Ort gespannt und kann aufgrund seiner bekannten kalibrierten Länge als Maßstab eingeführt werden.

4 Praktische Genauigkeitsuntersuchung

Zunächst wird die Invardraht-Maßverkörperung im Labor unter konstanten Temperaturbedingungen kalibriert, und damit in ihrer Länge definiert. Die Kalibrierung erfolgt mit einem übergeordnet genauen Messsystem. Das qualitativ höhere Messinstrument ist ein Lasertracker der Fa. Faro (ION). Mit einer Streckenmessgenauigkeit von $4 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m/m}$ (Maximal Permissible Error) im IFM-Modus (FARO 2012), bestimmt der Lasertracker eine 21 m lange Strecke theoretisch mit einer Genauigkeit von 0,021 mm. Die Messung, bestehend aus 20 Einzelmessungen, brachte folgendes Ergebnis für die Maßverkörperung hervor:

Länge: 20834,374 mm Standardabweichung: 0,026 mm

Die erreichte Standardabweichung liegt mit 0,026 mm geringfügig über dem theoretischen Genauigkeitsniveau des Kalibriersystems, lässt aber dennoch auf einen stabilen und reproduzierbaren Aufbau der entwickelten Maßverkörperung schließen.

In einem Bildverband soll nun die Wirkung der großen Invardraht-Maßverkörperung hinsichtlich der absoluten Genauigkeit der Objektkoordinaten untersucht werden. Dazu wird ein Testfeld von 10x15 m geschaffen. Das Testfeld wird im Stil einer Luftbildphotogrammetrie hoch redundant photogrammetrisch vermessen. Verschiedene Maßstabsreferenzen sollen nun autonom in den Ausgleichungsprozess integriert werden und dadurch unterschiedliche praktisch denkbare Konfigurationen darstellen. Die verschiedenen Maßstabsreferenzen welche jeweils als Referenzinformation dienen sind die folgenden:

1. Invardraht-Maßverkörperung diagonal durch das Testfeld
2. 2 kurze CFK-Verkörperungen im Zentrum des Testfeldes
3. 5 kurze CFK-Verkörperungen räumlich verteilt im Testfeld
4. Passpunkt-Referenz aus Lasertracker-Messungen als 4x4 Gitter im Testfeld

Die Passpunkte aus den Lasertracker-Messungen dienen als Qualitätsmerkmal für die Auswertung. Die Längenmessabweichungen (LME) aller 120 Streckenkombinationen der 4x4 Passpunkte werden in jeder der 4 Variationen analysiert. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass die große Maßverkörperung, genau wie die Variante der Passpunkt-Referenz bessere Ergebnisse liefert, als die herkömmlichen kurzen Maßverkörperungen aus CFK (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Statistik der LME verschiedener Maßstabskonfigurationen

PP Referenz			Invardraht		
Min	-0,117	mm	Min	-0,339	mm
Max	0,175	mm	Max	0,453	mm
Spanne	0,292	mm	Spanne	0,791	mm
Mittel	0,031	mm	Mittel	0,077	mm
Stabw.	0,064	mm	Stabw.	0,160	mm

2xCFK			5xCFK		
Min	-0,876	mm	Min	-0,832	mm
Max	0,882	mm	Max	0,827	mm
Spanne	1,757	mm	Spanne	1,659	mm
Mittel	-0,223	mm	Mittel	-0,195	mm
Stabw.	0,390	mm	Stabw.	0,363	mm

Trotz der vergleichsweise geringen Kalibrierqualität der Invardraht-Maßverkörperung ist die äußere Genauigkeit der Objektkoordinaten höher als die der hochgenau kalibrierten CFK-Maßstäbe. Die erzielten Ergebnisse stützen die Hypothese aus Abschnitt 2 und zeigen, dass die Investition in Länge signifikante Genauigkeitssteigerungen bei photogrammetrischen Projekten großer Volumina mit sich bringen kann und die Kalibriergüte hingegen an Relevanz verliert.

5 Fazit und Ausblick

Aus theoretischen Überlegungen entstand zunächst eine Hypothese, die die Idee der Entwicklung einer großen Maßverkörperung mit sich brachte. Die Entwicklung einer großen 21 m langen Invardraht-Maßverkörperung kann als gelungen betrachtet werden. Auch die Validierung hinsichtlich der physischen Stabilität des Systems ist durch die Kalibriermessung belegt. Der Effekt und statistische Größen wurden in einem ersten Versuch untersucht und unterstützen die vorangestellte Hypothese. Dennoch sind dahingehend weitere Untersuchungen anzustellen, um die Ergebnisse weiterführend zu evaluieren und variierende Versuchsaufbauten zu betrachten.

Die Arbeit zeigt, dass es nicht trivial ist, die Maßstabsreferenz bzgl. den Parametern Länge, Lage, Qualität und Anzahl festzulegen. Für große Messobjekte kann eine Invardraht-Maßverkörperung als eine gute Alternative zur Referenzpunkt-Erstellung mittels Lasertracker dienen, ohne dabei einen hohen Genauigkeitsverlust zu verursachen. Insbesondere in wirtschaftlicher Hinsicht könnte eine günstige Draht-Konstruktion den kostspieligen Lasertracker in einigen Anwendungen ersetzen.

Es sind Folgeuntersuchungen anzustellen, die den Effekt variierender Maßverkörperungsparameter im Bildverband validieren. Hier sind Simulationen wie z.B. Monte-Carlo-Simulationen denkbar, um die Statistik frei von praktisch nicht kontrollierbaren Einflüssen zu berechnen.

Das Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Oldenburg stellt weiterführende Untersuchungen zu dem hier vorgestellten Thema an. Erste Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten können aus REZNICEK et al. (2016: 286ff) entnommen werden.

6 Danksagung

Ein besonderer Dank geht an das Unternehmen sigma3D GmbH, welches durch kompetente Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Insbesondere Herrn Frank Mönsters danken die Autoren für die tolle Betreuung seitens des Betriebs. Dem Photogrammetrie-Team des IAPG danken die Autoren für das Engagement und die gute Zusammenarbeit seitens der Jade Hochschule.

7 Literaturverzeichnis

- KAHMEN, H., 2006: Angewandte Geodäsie. Vermessungskunde. 20., völlig neu bearbeitete Auflage, Walter de Gruyter (De Gruyter Lehrbuch), Berlin.
- KAHMEN, O., 2015: Entwicklung einer großen Invardraht-Maßverkörperung zur Anwendung in der Industriephotogrammetrie. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Jade Hochschule Oldenburg.
- KERN, 2016: Distometer ISETH: www.kern-aarau.ch/fileadmin/user_upload/Aldo/Prospekte/Distometer_ISETH.pdf, letzter Zugriff 05.02.2016.
- FARO, 2012: Technisches Datenblatt FARO ION. www.faro.com, letzter Zugriff 05.02.2016.
- REZNICEK, J., EKKEL, T., HAESTADT, H., LUHMANN, T., KAHMEN, O. & JEPPIING, C., 2016: Zum Einfluss von Maßstäben in photogrammetrischen Projekten großer Volumina. Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, Luhmann, T. & Schumacher, C., (Hrsg.), Wichmann, 286-295.