

# Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen

**Maria Hennes**

## 1 Einleitung

Nicht nur im Vermessungswesen ist Qualitätssicherung eine wichtige Komponente des Qualitätsmanagements. Insbesondere Prüfprozesse in der Fertigungstechnik müssen immer enger werdenden Toleranzen gerecht werden. Daher wird der Messtechnik ein immer geringer werdender Unsicherheitsbeitrag zugestanden. Gerade hier wird die enge Verzahnung zwischen Qualitätssicherung des Objekts und der damit verbundenen Qualitätssicherung der Messtechnik selbst deutlich (vgl. z. B. DIN EN ISO 14253-1, 1999). Die in den Prüfprozessen involvierten Messmittel unterliegen also hohen Qualitäts- und damit Kalibrieransprüchen.

Eine erfolgreiche Qualitätssicherung kann nur durch die gemeinsame Betrachtung von Messmittel **und** Messprozess und somit auch von Prüfmittel und Prüfprozess erfolgen. Hier leistet die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel (GKGM e. V.) einen wertvollen Beitrag, da sie Prüf- und Kalibrier**prozesse** im geodätischen Umfeld unter Beachtung der Prinzipien der Rückführung überwacht, beispielsweise durch gegenseitige Kontrollen mittels Ringversuchen. Jede beteiligte Institution muss zumindest für einen Messmitteltyp oder einen Messprozess Kalibrierexpertise nach den höchsten Qualitätsmaßstäben sowie entsprechende Einrichtungen in einem funktionsgerechten Labor nachweisen. Das GIK bedient hierbei den Schwerpunkt der kinematischen Kalibrierung, eine zukünftig vermehrt nachgefragte Aufgabe, der der Prozessgedanke implizit innewohnt. Es folgt damit dem Paradigmenwechsel von der statischen Vermessung zur kinematischen Vermessung. Darüber hinaus widmet sich die

Arbeitsgruppe hierbei konsequent den hohen Genauigkeitsanforderungen der Large Volume Metrology (Hennes, 2016).

Mit diesen zusätzlichen Anwenderfeldern sind dem klassischen Vermessungswesen bisher wenig geläufige Begrifflichkeiten verknüpft, die im folgenden Abschnitt dargelegt werden. Auch in Bezug auf die Kalibriereinrichtungen fokussiert dieser Beitrag auf interdisziplinäre Anwendungsfelder, wobei zunächst statische Prüfverfahren vorgestellt werden, die in den letzten Jahren am GIK implementiert wurden. Auch wenn noch klassische Prüfungen wie Additionskonstante und Frequenzprüfung sowie andere Feldverfahren durchgeführt und weiterentwickelt werden (vgl. Juretzko, 2013), liegt der Fokus des Mess- und Kalibrierlabors des GIK auf der Kinematik und Präzisionsmesstechnik.

## **2 Relevante Aspekte**

### **2.1 Messunsicherheit und Genauigkeitsmaße nach Herstellerangaben**

Hersteller nicht-geodätischer Instrumente und Sensoren verwenden ein breites Spektrum hinsichtlich Genauigkeitsangaben, das von einer unspezifischen allgemeinen Standardabweichung über sehr detaillierte Angaben über Wiederholgenauigkeit, Reproduzierbarkeit, Linearität, Drifterscheinungen unterschiedlicher Genese usw. reicht. Dies wäre auch für geodätische Instrumente wünschenswert, weil nur dies die optimale Verwendung eines Instruments in spezifischen Messanordnungen garantiert. Stattdessen ziehen sich die Hersteller geodätischer Instrumente in der Regel auf allgemeine Genauigkeitsangaben zurück, die jedoch immer dann Vergleichbarkeit garantieren, wenn sie gemäß den Feldprüfverfahren der DIN-ISO 17123-Reihe ermittelt worden sind (ISO 17123, 2001). Diese Angabe kann natürlich nicht die in einer spezifischen Verwendung erzielte Messgenauigkeit abdecken. Hier ist die Messunsicherheit (vgl. BIPM (2012) oder als deutsche Fassung DIN EN ISO 13005 (1999)) die einzig wirklich belastbare Größe – auch wenn sie sich in der Geodäsie nur recht zaghaft durchsetzt (vgl. Hennes, 2013, 2007b; Hennes und Heister, 2007). Prüf- und Kalibrierprozesse sollen den einzelnen Beiträgen zur Messunsicherheit Rechnung tragen.

## 2.2 Kalibriertypen

Über viele Jahre konzentrierten sich die Kalibrieraktivitäten im Vermessungswesen auf einzelne Komponenten von Messmitteln; die Komponentenkalibrierung galt als das Maß aller Dinge. Mit der Diskussion um die Kalibrierung von Nivellierlatten, die stark in den Vorläufergremien der GKGM geführt wurde, fand die Systemkalibrierung Akzeptanz, bei der das Zusammenwirken von schwierig trennbaren Prozessen in Instrumenten und Messmitteln betrachtet wird. Heute ist bei der Wahl des angemessenen Kalibriertyps die Tendenz zur zielorientierten Einzelfallentscheidung deutlich (vgl. Hennes und Ingensand, 2000).

Mit zunehmendem Anspruch an die Kalibrierleistung wird die Bereitstellung ausreichend stabiler Referenzen immer schwieriger. Simultankalibrierungsverfahren basieren auf geometrischen Restriktionen und erlauben es, gleichzeitig mit der Kalibrierung des Prüflings auch Referenzwerte zu bestimmen. Derartige Verfahren werden am GIK entwickelt, vgl. die Beispiele in den Abschnitten 3.8 und 3.6. Der Wunsch des Praktikers, dass eine Kalibrierung völlig ohne zusätzliche Einrichtung erfolgt, wird durch die Selbstkalibrierung erfüllt, wie beispielsweise durch Zwei-Lagen-Messung. Selbstkalibrierungsansätze basieren in der Regel auf eine oder mehreren geometrischen Restriktionen, siehe unten.

## 2.3 Rückführung

Unter Rückführung versteht man den Vergleich des Messwertes einer Messeinrichtung oder einer Maßverkörperung mit dem nationalen Normal in einem oder mehreren Schritten. Diese Schritte beinhalten den Vergleich mit abgeleiteten Normalen, also Referenzmesseinrichtungen oder Maßverkörperungen, die letztendlich vom nationalen Normal abgeleitet sind. Auf die Rückführung wird insbesondere in Messprozessen des Maschinenbaus Wert gelegt. Das Wörterbuch der Metrologie ((VIM), Brinkmann, 2012) definiert das Kalibrieren als eine *„Tätigkeit zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen den ausgegebenen Werten eines Messmittels [...] und den bekannten Werten der Messgröße unter bekannten Bedingungen.“* Dabei wird der bekannte Wert der Messgröße von einem Normal höherer Ordnung abgeleitet. Kalibrierung stellt lediglich die Abweichung des individuellen Messmittelexemplars in Bezug auf die bekannten Bedingungen fest. Damit also ist weder eine Verifikation der Spezifikationskonformität gegeben noch eine Aussage für abweichende Messbedingungen oder auftretende Driften getroffen worden, siehe oben.

## 2.4 Geometrische Restriktionen

Das Normal höherer Ordnung kann auch in einer geometrischen Restriktion bestehen, zum Beispiel, dass die Winkelsumme in einem Dreieck 200 gon ergibt. Kreise, Ebenen oder Kugeln definieren ebenfalls geometrische Restriktionen, wobei der Vorteil in einer meist einfachen oder einfacheren technischen Realisierung der Figur liegt. Nachteilig kann die Beschränkung auf kleine Ausschnitte des Arbeitsbereiches des Messmittels wirken.

## 2.5 Latenzzeiten und Synchronisation

Die raum-zeitliche Erfassung von Objekten bekommt einen immer größeren Stellenwert. Deswegen sind Prüf- und Kalibrierverfahren zu entwickeln, die speziell auf das richtige Zusammenwirken der räumlichen und zeitlichen Messwerte abzielen. Neu wird nun nicht eine einzelne Messgröße betrachtet, sondern ein Quadrupel aus drei Raumkoordinaten und einer Zeitkoordinate (4D) oder gar die Pose mitsamt Zeitkoordinate (7D). Jede der geometrischen Koordinaten muss synchron, also zeitgleich mit der Zeitkoordinate oder zumindest exakt zeitgleich in Bezug auf ein definiertes (Trigger-)Signal, erfasst werden. Dies bedeutet, dass diese Zeitgleichheit nun auch ein Prüf- bzw. Kalibrierkriterium ist. Werden Zeitstempel (anstelle des Triggersignals) verwendet, muss sichergestellt sein, dass die Uhren der Zeitstempelgeber exakt synchron laufen. Für die Prüfung bedeutet dies, dass auch diese Forderung geprüft werden muss, und weiterhin, dass das Prüfmittel mit dem eigentlichen Messprozess synchronisiert sein muss. Unabhängig davon, ob das Messgerät aufgrund von Triggern eine Messung auslöst oder ob es Messungen mit Zeitstempeln versieht, ist immer die so genannte Latenzzeit zu betrachten, die sich aus den Verzögerungen zwischen Messwertanforderung (bzw. Stempelung) und der eigentlichen Messwertermittlung ergibt. Prinzipiell können die Ablagen eines kinematischen (raum-zeitlich erfassenden) Messmittels dem Raum oder der Zeit zugeschrieben werden; welche Variante gewählt wird, hängt vom Einsatzzweck des Messmittels ab.

# 3 Neue Prüfmittel und Prüfverfahren am GIK

## 3.1 Strategische Ausrichtung

In den letzten 17 Jahren wurde das Kalibrierlabor konsequent bezüglich der aktuellen und zukünftigen Erfordernisse der Messtechnik weiterentwickelt. Dem großen Bedarf an dimensionellen, aber nicht zwingend geodätischen Prüfungen und Kalibrierungen wurde Rechnung

getragen, unter anderem auch, um die Lücke zwischen den herkömmlichen geodätischen Prüflaboren und den Kalibrierinstitutionen des DAKKS und den Einrichtungen der PTB zu schließen. Insbesondere wird auf die Belange der Nahbereichsvermessung im industriellen Umfeld (Large Volume Metrology, LVM) fokussiert. Dabei konnte die geodätische Methodenkompetenz wirkungsvoll genutzt werden. Nutznießer des Kalibrier- und Prüfangebots sind sowohl geodätische als auch nicht-geodätische Hersteller bzw. Anwender, die sowohl das klassische als auch spezielles Messequipment verwenden bzw. anbieten.

Die Reflektorprüfung (Abschnitt 3.2) bedient sowohl Hersteller (von Low-cost-CCRs sowie von n2-Reflektoren) als auch den klassischen Ingenieurgeodäten, den die ausrichtungsabhängige Additionskonstante seines 360°-Prisma interessiert. Um den Nachteilen des empfindlichen n2-Reflektors und der großen Variabilität der Additionskonstanten bei 360°-Reflektoren entgegen zu wirken, entwickelten wir einen drehbaren Adapter, dessen Exzentrizitätsprüfung in Eigeninteresse erfolgte.

Die Weiterentwicklung der Encoderprüfung erfolgte weniger mit Blick auf klassische Teilkreisabgriffe, da diese aufgrund der werksinternen Kalibrierung den heutigen Anforderungen genügen und die Richtungsmessung eher durch unsachgemäße Adaption und/oder Anziehung/Bildauswertung beeinträchtigt werden. Lediglich die Interpolationsabweichung ist bei geodätischen Instrumenten von Interesse. Diese wird zweckmäßig mit elektronischen Kollimatoren bestimmt. Eine Prüfung eines solchen Kollimators ist in Abschnitt 3.8 beschrieben, um aufzuzeigen, dass Spezifikationen sehr sensibel interpretiert werden müssen. Die Untersuchung erfolgte in Eigeninteresse, eine Validierung mittels der METAS Schweiz bestätigte das in unserem Labor erzielte Ergebnis. Von Interesse ist jedoch die Encoderprüfung für Hersteller von Encodern und Drehtischen allgemein. Die im Labor des GIK entwickelte halbautomatische Methode (vgl. Abschnitt 3.8) führte zu Anerkennung im Bereich der Antriebstechnik (Depenthal, 2007).

Um den anspruchsvollen Anforderungen der statischen LVM zu genügen, muss auch für die dort eingesetzten Messwerkzeuge eine Prüfung erfolgen. Hierzu wurde ein Präzisionsdreharm entwickelt, der dem kommerziell erhältlichen ebenbürtig ist, vgl. Abschnitt 3.5. Aus den Erfahrungen dieser Entwicklung entstand schließlich A-TOM, ein low-cost-System zur hochgenauen Posenbestimmung, dessen Genauigkeit der kommerziellen T-Probe gleicht (Herrmann, 2016). Da Aufgaben im Maschinenbau häufig eine unmittelbare Rückführung erfordern, wurde das Labor des GIK mit entsprechenden Prüfmitteln ausgerüstet (vgl. Abschnitt 3.9). Trotzdem sollte die Expertise des geodätischen Vorgehens auch für diesen Bereich verfügbar sein, weswegen im Labor ein hochpräzises Testnetz installiert wurde, das gleich-

zeitig hinsichtlich der Kalibrierbarkeit von Lasertrackerparametern optimiert wurde (vgl. Abschnitt 3.6).

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Kalibriertätigkeit liegt auf kinematischen Messabläufen. Bevor eine Kalibrierung sinnvoll vorgenommen werden kann, müssen erst die bei einem Messmittel auftretenden Abweichungen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit und möglichst auch hinsichtlich ihrer Ursachen untersucht werden. Dazu wurden am GIK spezielle Untersuchungseinrichtungen entwickelt und gebaut, die zukünftig auch zur Ermittlung von Kalibriergrößen benutzt werden können. Generell wurden zwei Fälle unterschieden: Untersuchung von kinematischen Phänomenen (A) ohne zeitliche Referenzierung und (B) mit zeitlicher Referenzierung (vgl. Abschnitt 2.5). Die Einrichtungen dienen teilweise auch der statischen Kalibrierung, wie die Linearbahn PHIL (vgl. Abschnitt 3.3), die aufgrund ihrer Länge von rund 24 m hervorragend geeignet ist, die distanz- und materialabhängige Additionskorrektur bei reflektorlosen Distanzmessern einschließlich Scannern zu ermitteln. Sie wird vor allem zur Realisierung von langen Trajektorien eingesetzt. Bei der klassischen Verwendung mit Interferometer gehört sie zum Typ (A), also ohne zeitliche Referenzierung, bei Kopplung mit einem Leica-Lasertracker ist auch der synchronisierte Modus (Typ B) realisiert. Ti4CalibS ist ebenfalls zeitreferenziert und liefert kreisförmige Trajektorien in unterschiedlichen Raumlagen, vgl. Abschnitt 3.4. Dieses Prüfsystem wurde zunächst im Hinblick auf die Untersuchung der kinematischen Eigenschaften von Robottachymetern entwickelt, um deren Einsatzfähigkeit in der kontinuierlichen Bestimmung von Trajektorien bewerten zu können. Gleichwohl hat Ti4CalibS aufgrund seiner präzisen mechanischen Ausführung und damit einhergehenden hohen Genauigkeit hervorragende Dienste in der Optimierung des Präzisionsmessmittels iGPS geleistet, das von vorne herein als kontinuierlich arbeitendes räumliches Positionierungssystem der LVM konzipiert wurde. Hinsichtlich der raum-zeitlichen Präzision bildet jedoch die Präzisionslinearbahn STEVE (Spatio-Temporal Evaluation Equipment) das Highlight des Labors, weil es mit dieser gelingt, selbst Präzisionsinstrumente wie Lasertracker hinsichtlich ihrer raum-zeitlichen Messunsicherheit zu untersuchen (vgl. Abschnitt 3.2). STEVE wurde in der mechanischen Werkstatt des GIK gebaut und gehört zu den weltweit genauesten Einrichtungen dieser Art. Damit hat das GIK ein Alleinstellungsmerkmal im kinematischen Prüfen.

Lasertracker besitzen einen ähnlichen mechanischen Aufbau wie Totalstationen. Neben den dort bekannten geometrischen Kalibrierparametern kommen jedoch weitere hinzu: Beim Trackermodell mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel sind, abgesehen von hochharmonischen Encoderabweichungen, insgesamt bis zu 16 geometrische Parameter zu bestimmen. Neben den klassischen Verfahren der 2-Lagen-Messung erfordern die Kalibrierverfahren zur Bestimmung der Parameter ausgeklügelte Punktanordnungen und mechanisches Equipment,

wie die so genannte Ballbar (vgl. Abschnitt 3.5). Auch diese wurde in der mechanischen Werkstatt des GIK in besserer Qualität als vom Originalhersteller gefertigt. Um Überprüfungen in der Fertigungsumgebung ohne Störung des laufenden Betriebs zu ermöglichen, wurde zur Etablierung von Prüfanordnungen, die die möglichst unkorrelierte Bestimmung aller Kalibrierparameter erlauben, ein spezieller Algorithmus entwickelt, der aufgrund der räumlichen Situation automatisch anhand eines CAD-Plans eine optimale Punktconfiguration berechnet (vgl. Abschnitt 3.6).

Da jedes Messergebnis eine belastbare Angabe über die Messunsicherheit benötigt, wurde für die mit Lasertrackern zu ermittelnden (auch kinematischen) objektrelevanten Zielgrößen (Form-, Posen- und Bewegungsparameter) ein Algorithmus entwickelt, der auch die Varianzen aller Kalibrierparameter vollständig auf diese Zielgrößen fortpflanzt (vgl. Abschnitt 3.6). Besondere Bedeutung hat hier die Antastabweichung und die Offsetkorrektur, die ausgiebig analysiert wurde (Naab, 2016). Da in diesem Zusammenhang insbesondere auch die Kenntnis der Reflektorqualität bedeutsam ist, entwickeln wir Prüfverfahren für kommerzielle Standardtypen (wie beispielsweise 360°-Reflektoren), Sonderanfertigungen und Eigenkonstruktionen wie Halterungen für n2-Reflektoren und automatisiert drehbare hochpräzise Reflektorträger ("active hubs"), (vgl. Abschnitt 3.7).

Für die Basismessgrößen Winkel und Strecken konzipierten wir eine modifizierte Winkelprüfeinrichtung (vgl. Abschnitt 3.8) und halten in Ergänzung zur Vergleichsstrecke Friedrichstaler Allee für den Nahbereich Linearmessbahnen (vgl. Abschnitt 3.2 und 3.3) und für den extremen Nahbereich einen Referenzmaßstäbe und Referenzprüfkörper (vgl. Abschnitt 3.9) vor.

### **3.2 Raum-zeitliche Präzisionslinearbahn STEVE – zur Bestimmung des Unsicherheitsbudgets raum-zeitlicher Sensoren**

Neben der Kalibrierung der statisch-geometrischen Parameter und der Latenzzeiten eines raum-zeitlichen Messmittels erhebt sich die Frage nach der Messunsicherheit, mit der eine raum-zeitliche Koordinate behaftet ist. Mit dem am GIK entwickelten k-VLT liegt zwar ein Softwaretool vor, das über Vorwärtsrechnung eine Bestimmung aus den Messunsicherheiten aller einfließenden Größen erlaubt, jedoch bleibt der Prozessgedanke noch unberücksichtigt, der das Wissen über den vorhergehenden Prozess nutzbringend einfließen lässt. Bekanntlich kann dies über Kalman-Filter erfolgen, jedoch versagen diese bei Prozessen mit nicht-stetigem Verhalten, da Kalman-Filter dann zu Überschwingern führen. Daher liegt es nahe, die Kennt-

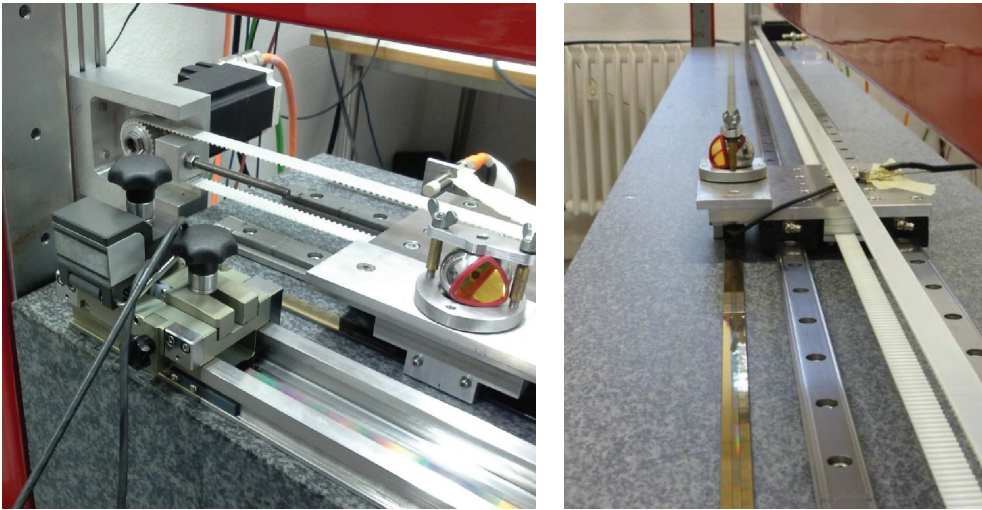


Abb. 112: Raum-zeitliche Präzisionslinearmessbahn STEVE.

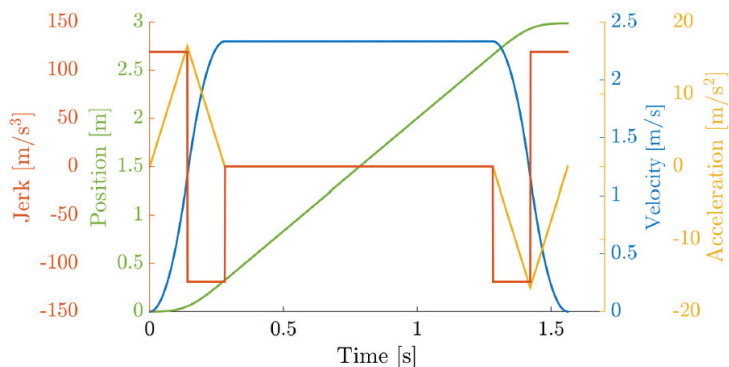
nisse über den Prozess mitsamt ihrer anhaftenden Wahrscheinlichkeit mit in die Bestimmung der raum-zeitlichen Unsicherheit einzubringen, wodurch ein Überschwingen vermieden wird. Dies gelingt mit dem Bayes-Ansatz bzw. einem hybriden Filteransatz, der es erlaubt, mehr als nur ein Systemmodell zu definieren (Ulrich, 2012, 2016). Um diesen mathematischen Ansatz zu validieren, wurde im Rahmen einer Dissertation (Ulrich, 2016) eine hochpräzise Linearbahn (STEVE) aufgebaut (vgl. Abb. 112), die die notwendigen raum-zeitlichen Untersuchungen unmittelbar für Lasertrackermessungen selbst erlaubt. Damit werden von vorneherein außerordentliche Ansprüche an die Realisierung der Referenzwerte gestellt.

Da auch die interferometrische Messeinheit des Lasertrackers zu prüfen ist und die Methode der Simultankalibrierung in diesem Fall aufgrund der Variabilität der Störeinflüsse im Ausbreitungsmedium Luft nicht sinnvoll ist, wurde ein hochpräziser Glasmaßstab gewählt, den die Firma Heidenhain dankenswerter Weise mitsamt seiner Ableseeinrichtung zur Verfügung stellte, wobei dieses im Kalibrierlabor des GIK verbaute Exemplar als eines der präzisesten weltweit gilt: laut Herstellerangaben bietet das Abgriffsystem im zweiachsigen Betrieb eine Genauigkeit von  $0,27 \mu\text{m}$  auf  $1,5 \text{ m}$ , wodurch der Glasmaßstab, der mit  $1,6 \mu\text{m}/\text{m}$  spezifiziert ist, intern bei jedem Abgriff kalibriert wird. Es kann Verfahrensgeschwindigkeiten bis zu  $8 \text{ m/s}$  verarbeiten. Durch die Wahl dieses einzigartigen Messsystems musste die nutzbare Länge auf  $2,5 \text{ m}$  beschränkt werden. Ein Granitblock von  $1,5 \text{ t}$  als Träger minimiert die Durchbiegung.



Für die Führung des Wagens wurde ein Schienensystem mit einer spezifizierten Parallelität von  $\pm 2,5 \mu\text{m}/\text{m}$  und einer Steifigkeit von weniger als  $0,5 \mu\text{m}$  verbaut, um zu garantieren, dass die Relativbewegung zwischen dem auf dem Wagen mitgeführten Prisma des Prüflings und der Ableseeinrichtung möglichst vernachlässigbar wird (das Abbe'sche Komparatorprinzip konnte konstruktionsbedingt nicht eingehalten werden, da dies unter anderem zu Ausmaßen des Trägers geführt hätten, die nicht mehr hätten im Labor installiert werden können). Der Wagen wird durch ein Zahnriemensystem angetrieben, wobei die Vermeidung von Eigenfrequenzen zu einer konstruktiven Herausforderung wurde. Die verbleibende Vibration ist vernachlässigbar in ihrer Amplitude, sie liegt bei  $21,7 \text{ Hz}$  und könnte bei Bedarf noch aus den Daten herausgefiltert werden. Auch wenn die Geradheit der Führung spezifiziert ist, lässt sich die Orientierung des Wagens durch kontinuierliche Abtastung mit dem Elcomat überwachen und korrigieren. Fasst man alle Unsicherheitsbeiträge zusammen, erhält man im kinematischen Betrieb während der Bewegung von bis zu  $5 \text{ m/s}$  eine Messunsicherheit für die Reflektorposition von  $4 \mu\text{m}$  für  $k=2$ , also einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von  $95\%$ .

Die Steuersoftware erlaubt die Generierung von beliebigen Geschwindigkeitsprofilen, wobei derzeit solche implementiert sind, die unterschiedlichen Beschleunigungsänderungen Rechnung tragen (vgl. Beispiel S-Rampe in Abbildung 113). Für ein Bewegungsprofil, das einem septischen Polynom folgt und während der Hin- und Rückfahrt je einmal Reflektorgeschwindigkeiten bis  $5 \text{ m/s}$  generiert, sind die Ergebnisse in Abbildung 114 dargestellt. Zunächst erkennt man die tatsächlichen Abweichungen des verwendeten Lasertrackers gegenüber den Sollwerten der Linearbahn (grün). Da der Lasertracker in einem seitlichen Abstand von der

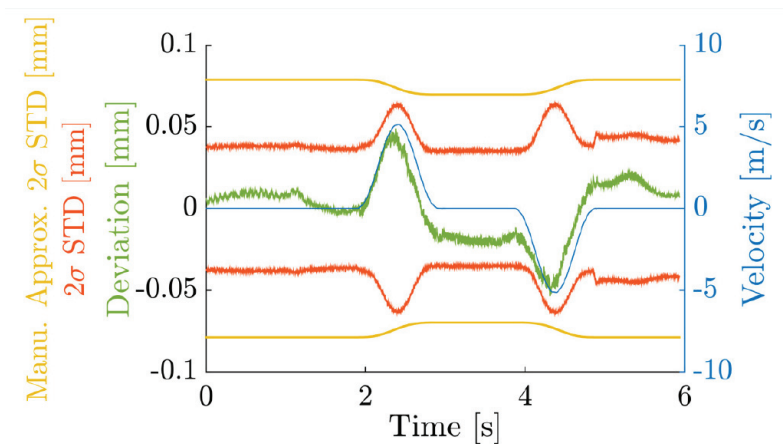


**Abb. 113:** Zeitliche Änderung von Position (grün), Geschwindigkeit (blau), Beschleunigung (orange) und Ruck (rot) bei einer S-Rampe (exemplarisch); (aus Ulrich, 2016).

Bahn von 3 m und in der Verlängerung von 1 m positioniert war, sind unterschiedliche Nachführgeschwindigkeiten des Lasertrackerkopfes erzwungen worden, die nicht symmetrisch dem Zeitverlauf folgen, wodurch sich auch die Abweichungen nicht völlig symmetrisch verhalten. Der anfänglich glatte Verlauf mit geringem Offset im Stillstand repräsentiert die Wiederholgenauigkeit des Lasertrackers (und des Referenzsystems).

Während der Fahrt werden die Abweichungen größer, beim Abstoppen verschwinden sie zunächst nicht vollends. In jedem Fall liegen die Abweichungen innerhalb der Spezifikation bzw. der vorwärts gerechneten Messunsicherheit für den kinematischen Fall (vgl. gelb eingezeichnetes Band in Abbildung 114, wobei die Distanzabhängigkeit an der Einbuchtung im mittleren Bereich deutlich zu erkennen ist).

Die Messung zeigt aber auch, dass mit dem neuen Bayes-gestützten Filtermodell sinnvollere Ergebnisse für die erreichte Messunsicherheit (Bandbegrenzung durch die rote Kurve) erzielt werden: Sie wird nicht zu pessimistisch angenommen wie bei der unmittelbaren Vorwärtsrechnung (gelb), folgt aber auch den auftretenden größeren Abweichungen während der Fahrt. Mit derartigen Versuchen, die alle dasselbe Verhalten zeigen, konnte die Tauglichkeit des neuen Ansatzes zur Unsicherheitsberechnung in kinematischen Prozessen gezeigt werden, was von entscheidender Bedeutung für die industrielle Fertigung mit immer enger werdenden Toleranzbändern ist.



**Abb. 114:** Bänder der Messunsicherheit: unmittelbare Vorwärtsrechnung (gelb), Modellierung durch hybrides Filter mit mehreren Systemmodellen (rot) bei dem in blau als Geschwindigkeit dargestellten Bewegungsprofils sowie die tatsächlichen Abweichungen (grün).

### 3.3 PHIL – Kombiwerkzeug für statisches und kinematisches Verhalten

PHIL steht für **P**recise **H**igh-speed **L**inear track, also für Präzisions-Hochgeschwindigkeits-Messbahn. Sie ist 24 m lang und interferometrisch (also für Relativdistanzen) über das HP-Interferometer Typ Agilent 5519A in Kombination mit Agilent 10885A PC Axis Board rückgeführt. Die meteorologische Korrektur wird unter anderem über mehrere ebenfalls rückgeführte Temperatursensoren abgeleitet und erreicht eine Unsicherheit von 0,1 ppm. Die geforderten Verfahrensgeschwindigkeiten von 9 m/s bei minimaler Beschleunigungsstrecke wurden durch eine gewichtsoptimierte Wagenkonstruktion sowie vor allem durch ein neues Antriebs- und Kraftübertragungssystem gewährleistet (Abb. 115). Dieses besteht aus einem doppelt geführten Zahnriemen, der an der Vorder- und Hinterkante eines gewichtsoptimierten Messschlittens angreift.

Durch diese Art der Krafteinleitung wurde die Möglichkeit der optischen Ablotung sichergestellt, wodurch der Bezug zwischen interferometrischem Nullpunkt und Zentrierung des Prüflings unter Einhaltung des Abbé'schen Komparatorprinzips hergestellt werden kann. Insgesamt kann so für die Bestimmung der Additionskorrektur eine Unsicherheit von 0,2 mm garantiert werden, wobei der Absolutbezug zur Prüflingsstehachse in der jetzigen Ausführung den größten Beitrag zum Unsicherheitsbudget liefert. Wohl deswegen wird der Stehachsbezug nur von sehr wenigen Kalibrierlaboren realisiert.

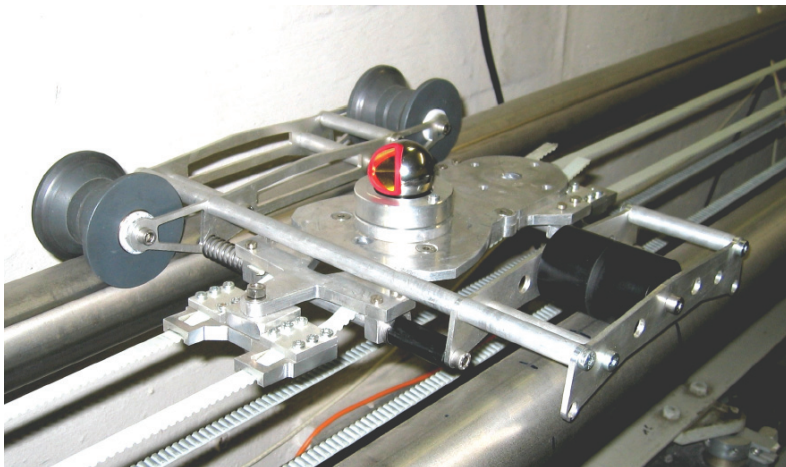


Abb. 115: Hochgeschwindigkeitsmessbahn PHIL.

Die Steuerung und die Messwerterfassung erfolgen vollautomatisch mit dem am GIK entwickelten Softwarepaket COMET-PRO (**C**ontrol and **M**Easuring **T**ool for **P**recise **R**apid **O**bject-tracking), das sowohl klassische Messabläufe mit statischer Messwerterfassung als auch kinematische Messabläufe unterstützt. Ein leicht modifiziertes Layout dieser Konstruktion wurde inzwischen für einen namhaften Hersteller vermessungstechnischer Instrumente realisiert.

In dieser Ausbaustufe ist die Untersuchung der Auswirkung der materialabhängigen Eindringtiefe bei reflektorloser Distanzmessung vollautomatisch möglich. Da die Eindringtiefe zu den limitierenden Faktoren gehört, die sich im klassischen Anwendungsfall beispielsweise bei Messungen auf Styropor in unvertretbarer Größe bemerkbar macht (vgl. Abb. 116 und Richter und Juretzko (2007)), empfiehlt sich generell die Korrektur des resultierenden systematischen, jedoch materialabhängigen Distanzmessfehlers mit einer derartig bestimmten Kalibrierfunktion. Neben Styropor sind auch andere klassische und moderne Baumaterialien wie Marmor, GFK und CFK sowie Bauschäume und Dichtmassen, als kritisch anzusehen.

In Präzisionsanwendungen (Prüfung von Rotorblättern von Windkraftanlagen, Flugzeugmontage) tauchen bei CFK-Materialien ähnliche Fragestellungen auf, allerdings in einer Genauigkeitsklasse, in der nur ein Laserradar als reflektorloses Messmittel im Bereich der LVM zum Einsatz kommen kann. Da sich die Eindringtiefe in Bezug auf die mechanische Oberfläche definiert, liegt die Herausforderung in der Gestaltung von geeigneten Testkörpern,

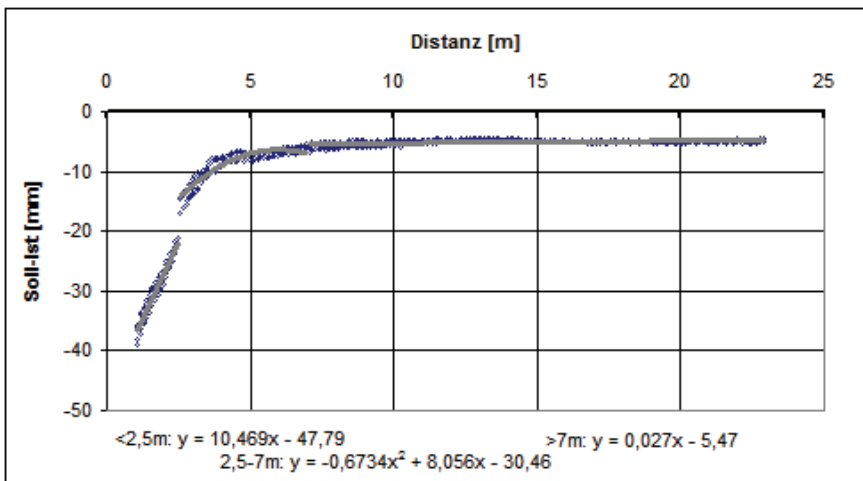
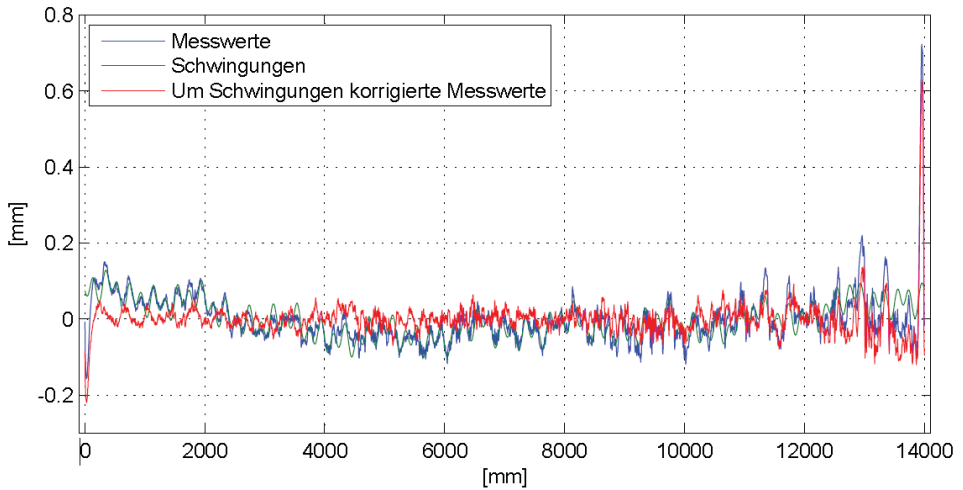


Abb. 116: Additionskorrektur reflektorlos auf Styropor.



**Abb. 117:** Positionsabweichungen bei 1 m/s in Bezug auf Lasertrackerdaten, Rohwerte (blau) und um signifikante Abweichungen (grün) korrigierte Abweichungen (rot).

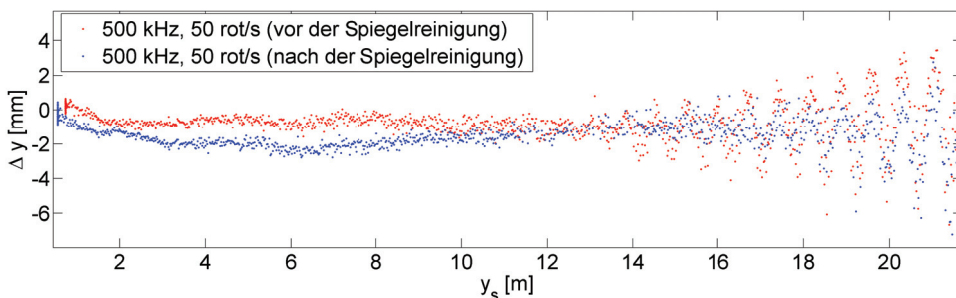
die die Verknüpfung von antastenden und berührungslosen Messprozessen im  $\mu\text{m}$ -Bereich ermöglichen (Naab, 2010; Hennes, 2007a).

Die Ansteuerung von PHIL erlaubt eine Positionierung des Wagens über den Zahnriemen, dessen Position mit einem Encoder auf der Antriebswelle gemessen wird. Es werden während der Fahrt (!) Positionsunsicherheiten ( $k=1$ ) zwischen  $60\ \mu\text{m}$  @  $0,2\ \text{m/s}$  und  $300\ \mu\text{m}$  @  $3\ \text{m/s}$  erreicht, wobei durch Optimierung der Masse und der Aufbauten (Luftwiderstand!) die Unsicherheiten weiter vermindert werden können. Ein Beispiel für die Positionsqualität (und damit der Qualität der Arbeiten der mechanischen Werkstatt) zeigt Abbildung 117 für die Verfahrensgeschwindigkeit von  $1\ \text{m/s}$ . Hierbei wurden die Abweichungen der durch PHIL gelieferten Positionsdaten zu den mittels Lasertrackermessungen erhaltenen Referenzdaten ermittelt (blau) und um signifikante (und weitgehend durch die Exzentrizität der Antriebsscheibe begründbaren) periodische Anteilen (grün) korrigiert. Die rot dargestellten Abweichungen zeigen somit die Positionsgenauigkeit ohne externe Referenz im kinematischen Betriebsmodus (vgl. Günther, 2009).

Infolgedessen liegen auch im bewegten Modus raum-zeitliche Informationen vor, die aufgrund der Zeitstempelung mit dem Prüfling synchronisiert werden können, sofern der Prüfling ebenfalls über eine Zeitstempelung verfügt und die beiden Uhren aufeinander synchronisiert sind. Ein Leica-Lasertracker erlaubt die exakte zeitlichen Referenzierung durch ein Trigger-signal. Dadurch entfällt die Interpolation zwischen Zeitstempeln. Dies wäre zwar auch mit

dem integrierten HP-Interferometer möglich, jedoch ist dieses auf 12fach geringere Verfahrensgeschwindigkeiten des Objekts beschränkt. Die Rückführung des Interferometers als auch der beiden am GIK vorhandenen Lasertracker ist durch entsprechende Herstellerzertifikate gewährleistet.

Ein Beispiel für die Untersuchung eines terrestrischen Laserscanners im kinematischen Betrieb, also bei bewegtem Objekt, (vgl. auch Vennegeerts u. a., 2010) zeigt die folgende Abbildung 118, in der die im Profilmodus auftretenden Abweichungen während einer Messfahrt über 15 m dargestellt sind. Bei Distanzen ab 10 m wird die Abweichung zur Referenzdistanz größer, wobei sie sich periodisch mit der Modulationswellenlänge von etwa 0,7 m wiederholt, sich also analog zum bekannten "zyklischen Fehler" bei EDM verhält. Diese Abweichung wird wahrscheinlich auch hier durch das vom EDM her bekannte optische Übersprechen verursacht, da sich die Abweichung nach der Spiegelreinigung verringert. Natürlich ist ein Übersprechen durch den Mixed-Pixel-Effekt gleichfalls nicht auszuschließen, wenn in den Nachbarbereichen des betrachteten Scan-Ausschnitts stark abweichende Reflexionseigenschaften herrschen. Dies zeigt sich dann auch in spiegeldrehzahl-abhängigen Amplituden des zyklischen Effekts. Ein ähnliches Phänomen, das zu distanzabhängigen zyklischen Abweichungen führte, die auf optisches Übersprechen hindeuten, wurde auch in einer praktischen Anwendung deutlich, wobei sich Objekt und Scanner in Ruhe befanden. Prüfungen oder gar Rekalibrierungen sind also in Abhängigkeit von Arbeitsbedingungen und Gebrauchszustand erforderlich, um Fehlinterpretationen in den Ergebnissen vorzubeugen – hier würde sich anstelle der tatsächlich planen Oberfläche eine gewellte zeigen (vgl. Abb. 118).



**Abb. 118:** Experiment zur Additionskorrektur am Beispiel eines Laserscanners im kinematischen Betrieb.



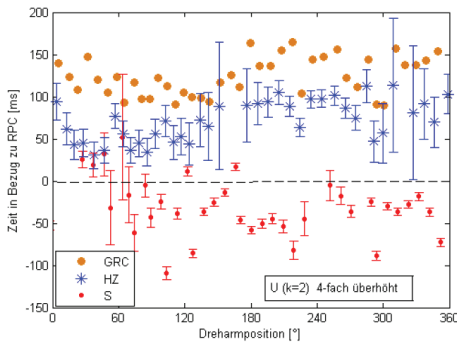
**Abb. 119:** Ti4CalibS des GIK, mit Komponenten des iGPS (oberes Ende und Mitte des Dreharms) und CCR (unteres Ende, optional, für simultane Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker).



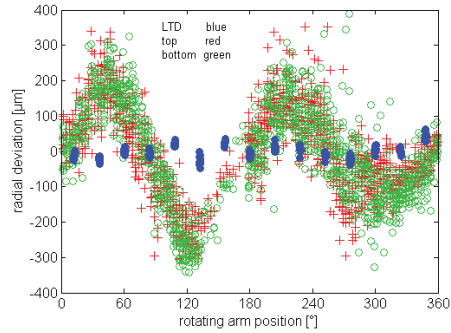
**Abb. 120:** GIK-Eigenkonstruktion der Ballbar.

### 3.4 Ti4CalibS – zur Untersuchung des zeitreferenzierten raum-zeitlichen Verhaltens und zur Kalibrierung der Latenzzeit

Das **Time-referenced 4D test and Calibration System (Ti4CalibS)** wurde am GIK entwickelt (Depenthal, 2009), um Latenzzeiten zwischen den einzelnen Messelementen eines Koordinatentripels (z. B. Richtung, Vertikalwinkel, Distanz) zu bestimmen, die eine gemeinsame 3D-Koordinate für die Position eines bewegten Objektes beschreiben. Zusätzlich sind natürlich die Verzögerungen zwischen Abfragezeitpunkt und Messzeitpunkt bzw. zwischen Messzeitpunkt und Erhalt der Messdaten von Bedeutung, denn diese Intervalle können in Abhängigkeit vom verwendeten Betriebssystem eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung annehmen. **Ti4CalibS** besteht aus einem zeitreferenzierten Dreharm von etwa 1 m Länge, dessen Winkelstellung zeitreferenziert von einem Encoder erfasst wird, sodass eine raum-zeitliche Sollkoordinate (4D) vorliegt. Der Dreharm kann mit horizontaler und vertikaler Drehachse betrieben werden, so dass die Latenzzeit zwischen jeweils zwei Komponenten des polaren



**Abb. 121:** Verzögerungszeiten der Horizontalrichtungs- und Distanzmessung sowie des Ausgabezeitpunktes (GRC=Zeitpunkt des Eintreffens des Messergebnisses) eines TCRA in Bezug zum Abfragezeitpunkt RPC.



**Abb. 122:** Radiale Abweichungen der beiden iGPS-Sensoren (grün und rot) sowie des Lasertracker-Prismas (blau) von der idealen Kreisbahn.

Koordinatentripels ohne Korrelation zur dritten Komponente untersucht werden kann. Die räumliche Messunsicherheit ist jeweils kleiner als 20 µm. Abbildung 119 zeigt den Dreharm in Schrägstellung, die Steuerelektronik ist nicht im Bild.

Das Ergebnis der Untersuchung von Robottachymetern war, dass die Verzögerungszeiten der untersuchten Geräte nicht systematisch und damit auch nicht kalibrierbar waren (vgl. Abb. 121). Andererseits konnte aufgrund von Analysen mit Ti4CalibS der Hersteller des iGPS nicht nur die raum-zeitliche Leistungsfähigkeit sowie raum-zeitliche Offsets feststellen, sondern auch die Leistungsfähigkeit des iGPS optimieren. Depenthal (2010a,b, 2012). Abbildung 122 zeigt die radialen Abweichungen von der Kreisbahn (Tangentialgeschwindigkeit etwa 2 m/s) vor der Modifizierung (rote und grüne Signatur). Für die Prüfung des Lasertrackers werden zwar die Systemgrenzen von Ti4CalibS erreicht (blaue Signatur), wie in Juretzko (2007), vor allem in Ulrich (2016) dargelegt und in Abbildung 122 ersichtlich, allerdings zeigt sich eine hohe Reproduzierbarkeit der Trajektorie für die 13 Runden.

### 3.5 Ballbar – Prüfmittel zur Kalibrierung von Lasertrackern

Lasertracker müssen als polare Messsysteme nicht nur allen herkömmlichen Justierbedingungen klassischer Tachymeter genügen, sondern auch zusätzlichen, die die Strahlage und -führung (von Interferometer und ADM) beschreiben. Abhängig von der Bauart sind bis zu 16 Parameter zu bestimmen. Hierbei werden sowohl übliche Verfahren wie Messung in zwei Lagen verwendet als auch Messungen in Verbindung mit speziellen Testvorrichtungen. Hierzu



zählt die so genannte Ballbar, ein rotierender Arm, der den Reflektor auf einem Kreis mit einem Durchmesser von etwa 1 m führt (siehe Abb. 120). Insbesondere die Rundheit und Planarität des realisierten Kreises müssen im  $\mu\text{m}$ -Bereich garantiert werden (gefordert sind  $5\ \mu\text{m}$  als radiale Abweichung bzw.  $10\ \mu\text{m}$  als planare Abweichung), da sie unmittelbar auf die Kalibrierqualität wirken. Am GIK wurde eine solche Ballbar neu konzipiert und gefertigt. Sie liefert eine radiale Abweichung (Rundheit) von besser  $2,2\ \mu\text{m}$  und eine planare Abweichung von besser  $1\ \mu\text{m}$ . Da diese Ergebnisse mit dem Lasertracker erzielt wurden, sind dessen Unsicherheitsbeiträge ebenfalls enthalten. Messungen mit einem Messtaster an der Achse selbst lieferten eine Genauigkeit für die Lagerung von besser  $1\ \mu\text{m}$ . Damit ist sie der Leica Ballbar qualitativ überlegen und führte mit A-TOM (siehe Abb. 80 auf Seite 180) zu einem Low-cost-System zur 6DOF-Bestimmung.

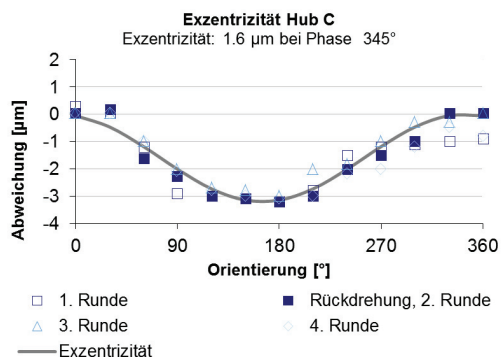
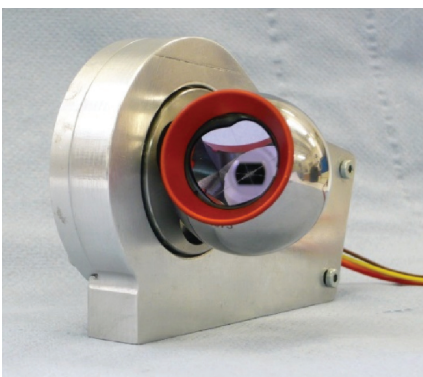
### 3.6 Testnetze und k-VLT

Im Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit in der LVM ist die dauerhafte Installation von Testnetzen und Bereitstellung von Sollkoordinaten fragwürdig, da dies einen unvermeidbar hohen Aufwand erfordern würde, um die gewünschte Stabilität zu erzielen. Da die Stabilitätsansprüche für kurze Messphasen weniger herausfordernd sind, wird am GIK der Gedanke der Simultankalibrierung (vgl. Abschnitt 2.2) verfolgt, wobei sowohl die Netzkoordinaten als auch die zu bestimmenden Kalibrierparameter gemeinsam bestimmt werden. Diese Herangehensweise erfordert die Abstimmung der Netzkonfiguration auf die jeweilige Kalibrieraufgabe, und zwar so, dass alle Parameter möglichst unkorreliert bestimmt werden können. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der bei vorgegebenem CAD der räumlichen Situation (incl. Möblierung und unzugänglicher Bereiche) für ein definiertes Kalibriermodell (beispielsweise der Kalibrierparametersatz eines Lasertrackers) die optimale Punktverteilung berechnet (Faller, 2012). Diese Vorgehensweise ist in industriellen Arbeitsumgebungen hervorragend geeignet, um Lasertracker zu rekalisieren, ohne sie dem jeweils laufenden Fertigungsprozess entziehen zu müssen.

Eng damit verknüpft ist der Algorithmus des so genannten Virtuellen Laser Trackers (VLT), der die zu erwartende Messunsicherheit im Objekt aufgrund der beim Messprozess auftretenden Unsicherheiten, vor allem der Standardabweichung der Kalibrierparameter, berechnet. Diese Idee wurde am GIK übernommen und hinsichtlich auftretender Latenzzeiten zwischen der Ermittlung der einzelnen Komponenten der polaren Messwerte zum kinematischen VLT (k-VLT) erweitert. Damit ist es nun möglich, die raum-zeitliche Messunsicherheit einer mit einem Lasertracker bestimmten Bahnkurve zu ermitteln.

### 3.7 Reflektorprüfeinrichtung – Exzentrizitätsbestimmung

Für Lasertracker werden diverse Kugelreflektoren angeboten, nämlich CCRs (Corner-Cube-Reflectors), also Open-Air-Reflektoren, und Glasprisma-Reflektoren, sowie CatEyes und n2-Reflektoren. Diese unterscheiden sich infolge ihres mechanischen Aufbaus, im maximalen Arbeitsbereich und in der Gewährleistung der beiden Bedingungen, dass jeder einfallende Strahl (a) parallel zum ausfallenden sein soll und (b) unabhängig vom Einfallswinkel gleichlange optische Wege zurücklegt. Um die Abtastung von Oberflächen im  $\mu\text{m}$ -Bereich zu ermöglichen, sind diese Reflektoren in hochpräzise Kugelschalen aus Stahl gefasst (Naab, 2016). Für den n2-Reflektor, dessen hochempfindliches Glasmaterial eine besondere Herausforderung darstellt, wurde eine solche Fassung von der mechanischen Werkstatt des GIK entwickelt, die nun dem Hersteller als eine konstruktive Lösung zur Verfügung steht, die den hohen Anforderungen der LVM genügt (vgl. Bernhart und Hennes, 2012). Auch andere Hersteller bieten Eigenanfertigungen von Kugelreflektoren für den Einsatz mit Präzisions-tachymetern an, die in unserem Kalibrierlabor einen Abnahmetest erhalten. Zur Entwicklung dieses Tests wurde die Additionskonstante mit diversen Methoden unterschiedlicher Güte bestimmt. Bei Verwendung von einem Lasertracker wichen die Ergebnisse weniger als 0,1 mm voneinander ab, bei Verwendung eines Präzisionstachymeters streuten sie in einem Intervall von 0,2 mm. Damit ist auch für den geforderten Anwendungsbereich die Belastbarkeit des Massentests sichergestellt sowie eine Aussage über die Wiederholgenauigkeit des Präzisions-tachymeters ableitbar. Die detaillierte Diskussion dieser Ergebnisse ist als Publikation in Vorbereitung.



**Abb. 123:** Active Hub: Funktionsmuster (links), Zentrierhaltigkeit exemplarisch mit CCR 2414 (rechts).

Da 360°-Prismen bekanntlich ausrichtungsabhängige Additionskorrekturen aufweisen (Favre und Hennes, 2000), wird auch deren Bestimmung laufend in Bezug auf aktuelle Reflektormodelle weiterverfolgt. Powalka (2018) konnte experimentell die Abhängigkeit von dem jeweils verwendeten Zielerfassungsmodul nachweisen, womit auch hier die Notwendigkeit zur Systemkalibrierung (Hennes und Ingensand, 2000) offenkundig wird.

Zur hochgenauen Zielpunktfestlegung wurde deswegen am GIK ein drehbarer Adapter für CCR entwickelt, der eine Zentrierhaltigkeit von wenigen  $\mu\text{m}$  garantiert (vgl. Abb. 123). Die Orientierung kann mittels einfacher Befehle an den integrierten Motor eingestellt werden (daher die Bezeichnung "active hub"), sodass auch aus unterschiedlichen Anzielerhaltungen ohne manuellen Eingriff hochpräzise Distanzmessungen zu einem ausgerichteten Reflektor vorgenommen werden können.

### 3.8 Winkelprüfeinrichtung – halbautomatisierte Vollkreiskalibrierung

Die Kalibrierung von Winkelencodern erfolgt am GIK nicht durch Rückführung, sondern über die geometrische Restriktion der Winkelsumme im Vollkreis. Hierfür entwickelte Depenthal (2006) das bekannte Rosettenverfahren weiter, sodass nun mit einem 12-seitigen Spiegelpolygon mit einem halbautomatisierten Messverfahren Aussagen über kurzperiodische Richtungsabweichungen möglich sind. Dabei ist der Prüfling (hier ein Drehtisch) unter dem Spiegelpolygon montiert (vgl. Abb. 124 links). Durch mehrere Messreihen mit jeweils veränderter relativer Orientierung können sowohl die unbekanntes Winkel zwischen den Spiegeln als auch periodische Abweichungen des zu kalibrierenden Encoders bestimmt werden. Das

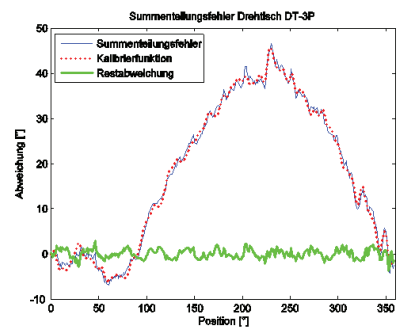
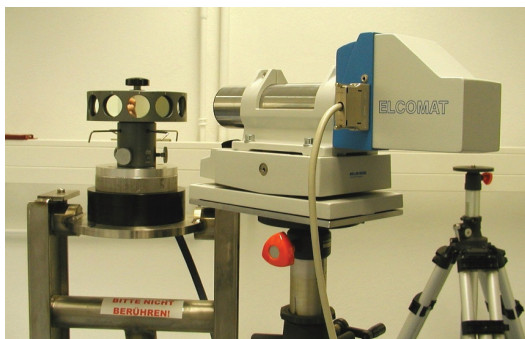
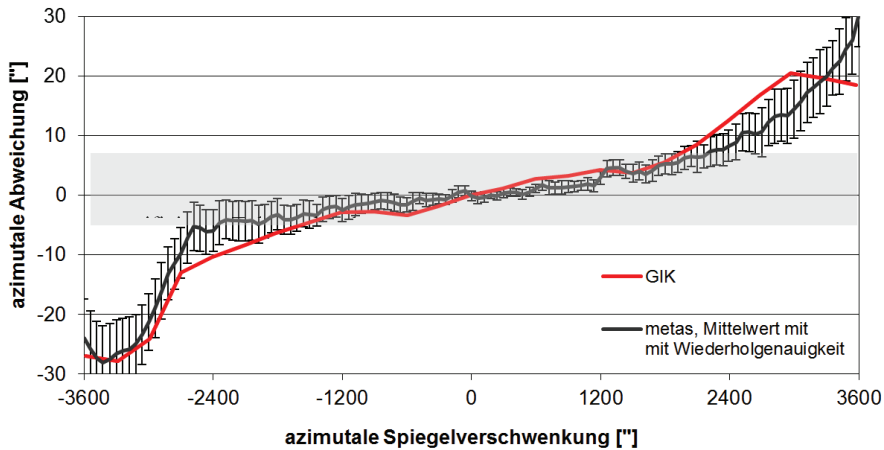


Abb. 124: Kalibrierung von Richtungsencodern: links: Versuchsaufbau mit Spiegelpolygon, rechts: Kalibrierergebnis.



**Abb. 125:** Überschreiten der spezifizierten Messgenauigkeit (grau), ermittelt durch Prüfungen am GIK (rot) und durch die METAS (Nationales Metrologieinstitut der Schweiz, schwarz mit Angabe der Wiederholgenauigkeit). Verhalten des Prüflings im Arbeitsabstand 300 mm.

Kalibrierergebnis (Abb. 124 rechts) zeigt exemplarisch, dass eine deutliche Reduktion der systematischen Richtungsabweichung (blaue Linie, hier 40'' (ptp)) durch die mit dem Verfahren ermittelte Kalibrierfunktion (gestrichelt) möglich ist, hier auf etwa ein Zehntel der ursprünglichen Abweichung (vgl. grüne Linie). Da sich das Verhalten des Drehtischs als reproduzierbar erwies, kann mit diesem Verfahren die Qualität von derartigen Drehtischen bzw. ihren Richtungsencodern erheblich gesteigert werden.

Bestandteil dieser Einrichtung ist ein elektronischer Kollimator des Typs Elcomat mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,25''$  über 1000'' bzw.  $\pm 0,1''$  über 20''. Dieser wird außerdem sowohl zur Ausrichtung von Komponenten als auch zur Instrumentenprüfung verwendet, beispielsweise, um Interpolationsabweichungen von Richtungsmesssystemen (oder allgemein Richtungsencodern) zu bestimmen. Diese können laut Herstelleraussagen heute durchaus die langperiodischen Richtungsfehler übertreffen, was dieser Untersuchung eine gewisse Bedeutung zuweist, da die klassische Reduktionsstrategie der mechanischen Teilkreisverstellung in modernen Instrumenten nicht mehr möglich ist.<sup>4</sup>

Im Vergleich zum Elcomat besticht der elektronische Autokollimator Theta Scan T40 der Firma Micro-Radian durch eine deutlich kompaktere Bauweise und eine höhere Abtastrate. Letztere macht ihn für kinematische Messvorgänge attraktiv. Er wurde am GIK untersucht,

<sup>4</sup> Aus dem Kontext der Spezifikation ist Winkelmessgenauigkeit ( $1 \sigma$ ) gemeint.

da seine Spezifikation eine dem Elcomat ähnliche Messgenauigkeit suggeriert. Im Datenblatt des Vertriebspartners heißt es lediglich: "The ThetaScan T40 dual-axis digital autocollimator resolves to 0,1 arc sec over a range of  $\pm 1^\circ$  (Optoiq, 2010)". Diese Aussage erfordert eine kritische Betrachtung, da diese Angabe lediglich bedeutet, dass der kleinste angezeigte Messschritt 0,1'' beträgt. Im Prüfzertifikat des Herstellers wird eine Winkelmessgenauigkeit eines Winkels mit 7.2'' angegeben, die über einen Messbereich von 3600'' für einen (Standard-) Arbeitsabstand von 300 mm gilt. Diese Genauigkeit wurde in den Spezifikationen des untersuchten Exemplars sogar für Arbeitsabstände bis zu 1 m garantiert. Tatsächlich konnte jedoch am Rand des Messbereichs ein deutliches Überschreiten der Spezifikation (vgl. Abb. 125) festgestellt werden, das für größere Arbeitsabstände deutlich zunimmt. Der Hersteller begründet seine zu optimistische Genauigkeitsangabe auf das Prüfverfahren des NIST (National Institute of Standards, USA), bei dem nur ein einzelner (vergleichsweise kleiner) Referenzwinkel an wenigen ausgesuchten Positionen des Messbereichs überprüft wird, wobei das Aneinanderketten von kleinen Prüfwinkeln (nach NIST) zur Unaufdeckbarkeit von systematisch wirkenden Abweichungen im Gesamtmessbereich führt. Der Nutzer kann also die erreichbare Messqualität nur vollständig bewerten, wenn er auch den Kalibrierprozess kritisch prüft: die am GIK und bei der METAS verwendeten Prüfverfahren weisen diesen Mangel nicht auf und liefern aussagekräftigere Ergebnisse.

### 3.9 Maßverkörperungen und weitere Prüfhilfsmittel

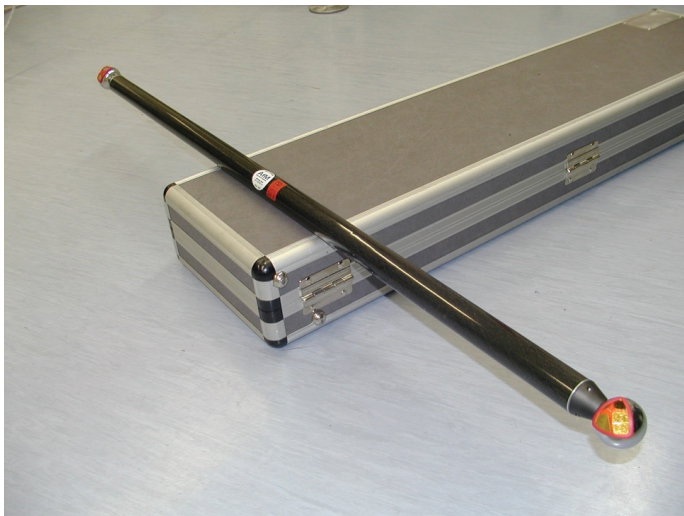
Für die Überprüfung von Messgeräten sieht die VDI/VDE 2634 (VDI/VDE, 2002, 2012) den Einsatz von Maßverkörperungen vor (vgl. auch DIN EN ISO 25178-70, 2014). Maßverkörperungen sind darauf optimiert, die "Kooperation" mit der zu prüfenden Größe und/oder dem zu prüfenden Messmittel in optimaler Weise zu gewährleisten. Für jede Art von Messsystem, das mit einem Messmittel zur taktilen Antastung ausgestattet ist (Koordinatenmessgerät, Messarm, Lasertracker), sind als Maßverkörperungen Kugeln bzw. Stäbe mit Kugelaufnahmen geeignet, Rückführungen durchzuführen. Kugeln ermöglichen grundsätzlich auch die Nutzung für Scanner. Mit Kugeln sind Antastgenauigkeiten bestimmbar; gekoppelt mit Referenzmaßstäben sind Längen überprüfbar.

Die Kugelaufnahmen am Stab erlauben auch die Aufnahme von CCRs und damit prinzipiell die Längenprüfung eines Lasertrackers. Der Tetronom-Kugelstab des GIK (vgl. Abb. 126) besitzt eine Länge von 1000 mm mit einer Längenunsicherheit ( $k=2$ ) von  $1,8 \mu\text{m}$  bezogen auf den Kugelmittelpunkt, die Kugeln selbst weisen eine Unsicherheit ( $k=2$ ) im Durchmesser von etwa  $0,2 \mu\text{m}$  und in der Rundheit von  $0,1 \mu\text{m}$  auf. Der Stab besteht aus CFK mit einem

Ausdehnungskoeffizienten von  $-0,2\text{ppm/K}$  (also deutlich geringer als das typischerweise in Basislatten verwendete Invar) und besitzt patentierte, selbstkompensierende Köpfe. Diese Maßverkörperung gestattet prinzipiell ebenfalls eine unkomplizierte Prüfung beider Winkelmesseinrichtungen von Lasertrackern und über die Anmessung der Kugeln auch die von Laserscannern (incl. Laserradar). Damit ist die kritische Größe der Winkelmessung definiert rückführbar und eine wesentliche Forderung des Maschinenbaus erfüllt.

Des Weiteren verfügt das GIK über einen 87-teiligen Satz an Mitutoyo Parallelendmaßen zwischen 0,5 mm und 100 mm, der mit sub- $\mu\text{m}$ -Genauigkeit kalibriert ist. Hiermit können beispielsweise Messschieber und Messschrauben kalibriert werden. Hinzu kommen Kugel- und Kegelnormale sowie Referenzebenen vor allem für optisches Scannen, die auch teilweise als Referenz für taktiles Messen dienen. Ergänzt wird dies durch mehrere portable Granittische, teils mit T-Nut, die eine Ebenheit von wenigen Mikrometern aufweisen.

Qualitätsmerkmale taktil messender Systeme sind unter anderem die Antastabweichung, die Reproduzierbarkeit aus verschiedenen Antastrichtungen sowie die volumetrischen Abweichungen (also Längenabweichungen im gesamten Messvolumen in Bezug auf Referenzlängen), deren Bestimmung in Regelwerken beschrieben wird, z. B. für Messarme in ASME B 89.4.22 (ASME, 2004), verschiedene Blätter der VDI/VDE 2617 (VDI/VDE, 2002, 2012), sowie in der DIN EN ISO 10360-12 (2018). Als Referenz dienen Präzisionskugeln, die in Dreipunktlagerungen gehalten werden. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden derartige Dreipunktauflagen

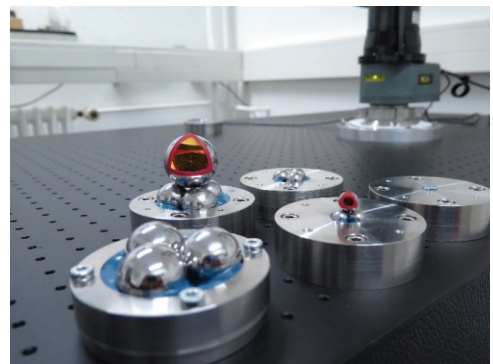


**Abb. 126:** Tetronomstab mit zwei CCRs.

(Nester) (vgl. Abb. 127 rechts ) mit Unterstützung der Werkstatt des GIK entwickelt und gefertigt (vgl. Abb. 127 links) Hierbei mussten Abriebeigenschaften, Materialelastizitäten von Stahl und Klebstoffen, magnetische Eigenschaften der Haltemagnete, thermisches Verhalten und weitere Parameter berücksichtigt werden, um eine mechanische Reproduzierbarkeit des Referenzpunktes (je nach Exemplar zwischen  $2\ \mu\text{m}$  und  $20\ \mu\text{m}$  zu erreichen (vgl. Mann, 2015).

Mit dem optischen Tisch, der als Sonderanfertigung hergestellt wurde, verfügt das Kalibrierlabor des GIK über eine geeignet stabile, d. h. nicht-deformierbare und maximal gedämpfte Arbeitsunterlage mit den Abmessungen von  $1000\ \text{mm} \times 1600\ \text{mm}$  und dem Gewicht von  $300\ \text{kg}$ . Sie besitzt flächig ein Montageraster aus Gewindebohrungen mit dem Abstand von  $20\ \text{mm}$ , welche das Aufspannen von Versuchsaufbauten sowie das gleichzeitige Montieren eines Messsystems (z. B. Messarm) erlaubt (einheitliches Dämpfungs-/ Bewegungsverhalten). Innerhalb dieses Bohrrasters wird eine Ebenheit von kleiner  $100\ \mu\text{m}$  eingehalten. Durch den Verzicht auf ein Isolationssystem wird die Relativbewegung zwischen optischem Tisch und Boden des Kalibrierlabors vermieden, sodass Messungen z. B. mit einem frei im Raum stehenden Lasertracker ermöglicht werden.

Mithilfe des selbstkonzipierten Spannsystems können sowohl kleine, als auch große und sperrige Objekte stabil auf dem optischen Tisch aufgespannt werden, sodass die Auswirkung der Antastkraft bei taktilen Messungen (z. B. bei Lasertracker- oder Messarm-Messungen) minimiert wird. Bei der optischen Antastung von Objekten werden aufgrund der Spezialbeschichtungen der Tischoberfläche und der Spannelemente störende Reflexionen deutlich reduziert. Weiterhin ist der optische Tisch so ausgeführt, dass beispielsweise selbst starke



**Abb. 127:** Studentin (S. Mann) bei der Fertigung von Komponenten der Dreipunktauflage in der Werkstatt des GIK (links) und Dreipunktauflagen mit CCR als Testkörper (rechts).

Temperaturschwankungen oder die Montage von Messsystemen bzw. das Aufspannen von schweren Objekten zu einer minimalen Durchbiegung (thermisch, statisch, dynamisch) führt bzw. das geforderte Dämpfungsverhalten erhalten bleibt.

## 4 Fazit und Ausblick

Aufgrund des hohen Anspruchs an heutige Kalibriereinrichtungen könnte ein Laboratorium nur mit hohem Aufwand die Kalibrierung *aller* in der Geodäsie geforderten dimensionellen Größen anbieten. Daher koordiniert die GKGM die Schwerpunktbildung an den europäischen Institutionen. Am GIK wird den beiden Paradigmenwechseln hin zu geforderter Rückführung und kinematischer Vermessung gefolgt. Der Fokus liegt auf Kalibrier- und Prüfanordnungen für den Bereich der LVM sowie für kinematische Anwendungen. Für beide Bereiche besitzt das Prüflabor des GIK Alleinstellungsmerkmale.

Wenn kein übergeordnetes Normal vorliegt (oder nicht realisiert werden kann), darf die Rückführung durch einen Ringversuch ersetzt werden. Ein solcher Ringversuch wurde bei der Einrichtung der 1 km langen Distanz-Vergleichsstrecke der Universität der Bundeswehr durchgeführt, woran sich das GIK mit seinen beiden Lasertrackern und seinem mobilen Temperaturmesssystem beteiligte. Nicht ohne Stolz ist zu bemerken, dass die Messergebnisse des GIK für fast alle Teilstrecken (bei Distanzen bis über 500 m) dem jeweiligen Mittelwert aus allen Messungen der neun teilnehmenden Institutionen am nächsten kamen und dabei die größte Abweichung der am GIK erhaltenen Messwerte zum Mittelwert aus der Gesamtausgleichung  $30\ \mu\text{m}$  beträgt. Weitere Details sind in (Herrmann u. a., 2012) beschrieben. Dies kann nur erreicht werden, wenn alle auftretenden Störeinflüsse sorgsam eliminiert werden und die Messanordnung als Systemkalibrierung verstanden wird, die neben den Längenmesssystemen auch die Systeme zur Erfassung der (vorwiegend meteorologischen) Korrekturparameter kalibriertechnisch beherrscht. Wie auch die erfolgreiche Installation der Nivelliersystemkalibrierung an der TU Graz zeigt, sind Kalibriertechniken zielführend, wenn sie auf das gesamte Equipment abgestimmt sind, was eine Fallentscheidung in Bezug auf Komponenten- bzw. Systemkalibrierung erfordert. Daher bleibt zur Qualitätssicherung (vgl. z. B. Hennes, 2010, und andere Beiträge in dem zitierten Tagungsband) die Messmitteluntersuchung und -kalibrierung ein zentrales Thema und damit auch Aufgabengebiet von Hochschulinstitutionen, um effiziente Herangehensweisen wissenschaftlich zu evaluieren. Dies allein ist jedoch nicht zielführend, denn nur mit Unterstützung einer mechanischen Werkstatt und eines Elektroniklabors, die die



Bedürfnisse der Vermessungstechnik bzw. der LVM kennen und zu berücksichtigen wissen, sind die Prüf- und Kalibrieranlagen zielführend zu errichten.

## Literatur

- ASME (2004): Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. B89.4.22, American Society of Mechanical Engineers, New York. 54 S.
- Bernhart, F. und Hennes, M. (2012): Leistungsfähigkeit eines "Reflektor 160" in Kombination mit einem Lasertracker. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012(2):63–69.
- BIPM (2012): Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology. 57 S.
- Brinkmann, B. (2012): Internationales Wörterbuch der Metrologie. 4., überarbeitete Auflage, 76 Seiten. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag. 76 S. ISBN: 978-3-410-22472-3.
- Depenthal, C. (2006): Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2006(8-9):305–309.
- Depenthal, C. (2007): Direktantriebe absolut positioniert – Kalibrierung von rotativen Messsystemen in Direktantrieben. *Antriebstechnik* 2007.
- Depenthal, C. (2009): Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D Kalibriersystems für optisch kinematische Messsysteme. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 627. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <http://dgk.badw.de/index.php?id=12,%20http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000010086>.
- Depenthal, C. (2010a): iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010. URL: [https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS\\_FIG2010\\_Depenthal.pdf](https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS_FIG2010_Depenthal.pdf) (besucht am 06.05.2018).
- Depenthal, C. (2010b): Path Tracking with iGPS. In: Int Conf Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 Sept. 2010. S. 1–6.
- Depenthal, C. (2012): Die kinematische Leistungsfähigkeit des iGPS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012:70–72.
- DIN EN ISO 10360-12 (2018): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 12: Gelenkarm-Koordinatenmessgeräte (KMG). Deutsche Fassung EN ISO 10360-12:2016, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 13005 (1999): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. DIN V ENV 13005, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 14253-1 (1999): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Prüfung von Werkstücken und Messgräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. DIN EN ISO 14253-1, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 25178-70 (2014): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen. DIN EN ISO 25178-70:2014-06, Beuth-Verlag, Berlin.
- Faller, S. (2012): Untersuchungen zur Selbstkalibrierung von Lasertrackern mit kardanisch gelagertem Spiegel. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Favre, C. und Hennes, M. (2000): Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 98(2):72–78. URL: [www.library.ethz.ch](http://www.library.ethz.ch).
- Günther, A. (2009): Eigenschaften der Linearmessbahn im kinematischen Betrieb. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 145 S.
- Hennes, M. (2007a): Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren. In: 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung (BWB) Industriemesstechnik, TU Dresden, Geodätisches Institut, 01.06.2007. S. 59–65.
- Hennes, M. (2007b): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 114(4):136–146.
- Hennes, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Beiträge zum 93. DVW-Seminar: Qualitätsmanagement Geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, vol. 61. 10./11. Juni 2010, Hannover. S. 239–252.

- Hennes, M. (2013): Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswertverfahren. In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 71. Beiträge zum 125. DVW-Seminar, 24./25.6.2013, Hannover. Wissner-Verlag, S. 25–46. ISBN: 978-3-89639-917-5.
- Hennes, M. (2016): Messmittel der Large Volume Metrology (LVM). In: *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände*. Hrsg. von W. Freeden und R. Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–24. ISBN: 978-3-662-46900-2. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2\_26-1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2\\_26-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_26-1).
- Hennes, M. und Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(11-12):375–383.
- Hennes, M. und Ingensand, H. (2000): Komponentenkalisierung versus Systemkalisierung. In: Schnädelbach, K., und Schilcher, M. (Hrsg.) Beitrag zu XIII Kurs für Ingenieurvermessung: Ingenieurvermessung 2000, 13.-17.3.2000, München. Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166–177.
- Herrmann, C., Liebl, W. und Neumann, I. (2012): Lasertrackermessungen des KIT Karlsruhe und der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken der Kalibrierbasis der UniBw München. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 119(8-9):309–313.
- Herrmann, C. (2016): Entwicklung eines trackingfähigen optischen Messsystems zur Posenbestimmung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 174 S. DOI: 10.5445/IR/1000063757.
- ISO 17123 (2001): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. DIN ISO 17123, Beuth-Verlag, Berlin.
- Juretzko, M. (2007): Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmeßsystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. In: Brunner, F. K. (Hrsg.) Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs: Ingenieurvermessung 07, 17.-20.04.2007, Graz. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 181–186.
- Juretzko, M. (2013): Überprüfungsstrategien für Tachymeter. In: Beitrag zum 125. DVW-Seminar "Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren", vol. 71. 24.-25. Juni 2013, Hannover. Schriftenreihe des DVW, S. 47–63.
- Mann, S. (2015): Entwicklung eines Prüfhilfsmittels für Messarme mit kombinierter Antastung. Masterarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Naab, C. (2010): Eigenschaften des Laser Radars. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 100 S.
- Naab, C. (2016): Beiträge zur Optimierung der Offsetkorrektur bei der taktilen Erfassung von Freiformflächen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 190 S. DOI: 10.5445/IR/1000071109.
- OptoIQ (2010): LaserFocusWorld. URL: <http://www.optoIQ.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display/38867/articles/laser-focus-world/volume-35/issue-9/products/optolink-offers-information-faster.html> (besucht am 07.07.2018).
- Powalka, S. (2018): Untersuchung zur Interaktion unterschiedlicher Zielerfassungssysteme von Totalstationen und verschiedenen 360°-Reflektortypen. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.
- Richter, E. und Juretzko, M. (2007): Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(6):212–223.
- Ulrich, T. (2012): Uncertainty Estimation for Kinematic Laser Tracker Measurements. In: Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney/Australien, 13.-15.11.2012. (reviewed IEEE Xplore).
- Ulrich, T. (2016): Uncertainty Modelling of High-precision Trajectories for Industrial Real-time Measurement Applications. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, 81 S. DOI: 10.5445/IR/1000060440.
- VDI/VDE (2002): VDI / VDE 2634 Blatt 1: 2002-05: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. URL: [www.beuth.de](http://www.beuth.de) (besucht am 07.07.2018).
- VDI/VDE (2012): VDI / VDE 2634 Blatt 2: 2012-08: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. URL: [www.beuth.de](http://www.beuth.de) (besucht am 07.07.2018).
- Vennegeerts, H., Richter, E., Paffenholz, J. A., Kutterer, H. und Hennes, M. (2010): Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2010.