

# Zur Erweiterung des Mess- und Kalibrierlabors des Geodätischen Instituts des KIT (GIK) aufgrund des Paradigmenwechsels im neuen Jahrtausend

## 1 Einleitung

Qualitätssicherung in der Messtechnik ist eine wichtige Komponente des Qualitätsmanagements, nicht nur im Vermessungswesen. Ihre Bedeutung steigt auch für die Prüfprozesse in der Fertigungstechnik, weil man erkannt hat, dass – mit immer enger werdenden Toleranzen – auch der Messtechnik ein nicht (mehr) zu vernachlässigender Unsicherheitsbeitrag zugestanden werden muss. 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 Diskussion um Genauigkeitsmaße und Messunsicherheitsangaben [DIN EN ISO 13005, 1999] ist aus unterschiedlichen Blickwinkeln entfacht (vgl. [Hennes, 2007a; Heister, Hennes, 2007]), während diejenige um System- versus Komponentenkalibrierung [Hennes, Ingensand, 2000] zur Präferenz einer jeweils zielorientierten Einzelfallentscheidung geführt hat. Darüber hinaus sind mit der Jahrtausendwende verschiedene Paradigmenwechsel deutlich geworden, die die klassische statische und punktorientierte Vermessung mehr und mehr zu einer flächenhaften und kinematischen werden ließen. Dies hat unmittelbare Folgen für die Aufgaben und Anforderungen eines Mess- und Kalibrierlabors.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung ist die Betrachtung von Messmittel **und** Messprozess, und somit auch von Prüfmittel und Prüfprozess existentiell geworden. Die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel (GKGM e.V.) hat sich seit ihrer Gründung im Jahr 2005 genau dies zum Ziel gesetzt, nämlich die Überwachung von Prüf- und Kalibrier**prozessen**, beispielsweise durch gegenseitige Kontrollen mittels Ringversuchen. Das GIK ist Gründungsmitglied, wobei ein funktionstüchtiges Kalibrierlabor nachgewiesen werden muss, in dem zumindest ein Messmitteltyp oder ein Messprozess nach den höchsten Qualitätsmaßstäben und unter Beachtung der Prinzipien der Rückführung überwacht wird.

Eine Auswahl dieser am GIK neu eingerichteten Kalibrier- und Prüfmittel wird im Folgenden vorgestellt. Auf die bereits vor dem Jahrtausendwechsel am GIK implementierten Prüfverfahren wie beispielsweise Additionskonstantenbestimmung und Frequenzprüfung für EDM wird nicht eingegangen, ebenso wird auf die Darstellung der implementierten Feldprüfverfahren wie ISO 17123-2 verzichtet. Stattdessen werden die Prüf- bzw. Kalibrierverfahren durch Anwendungen oder Experimente in ihrer Leistungsfähigkeit veranschaulicht. Wesentliche, insbesondere den Paradigmenwechsel prägende Begriffe führen in die Thematik ein.

## **2 Grundlegende Begriffe**

### **2.1 Kalibrierung und Rückführung**

Das Wörterbuch der Metrologie (VIM) definiert: „Kalibrieren umfasst die Tätigkeiten 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. 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.

### **2.2 Geometrische Restriktionen**

Das Normal höherer Ordnung kann auch in einer geometrischen Restriktion bestehen, zum Beispiel, dass die Winkelsumme über einen Vollkreis 400 gon ergibt. In ähnlicher Weise können auch andere geometrische Figuren ausgenutzt werden, beispielsweise Dreiecke, Kreise, Ebenen oder Kugeln. Hier liegt der Vorteil in einer meist einfachen oder einfacheren technischen Realisierung der

Figur, der Nachteil in der Beschränkung auf kleine Ausschnitte des Arbeitsbereiches des Messmittels. Hier besteht also noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, diese Strategie auf Messbereiche auszudehnen, die den Arbeitsbereich großräumiger abdecken, insbesondere im Hinblick auf neue flächenorientierte Verfahren wie dem Laserscanning.

## **2.3 Synchronisation**

Weil die kinematische Vermessung, also die raum-zeitliche Erfassung von Objekten, einen immer größeren Stellenwert bekommen wird, sind auch hierfür neue 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 Raum- und einer Zeitkoordinate. Hier tritt nun die Problematik auf, dass jede der drei Raumkoordinaten synchron, also zeitgleich mit der Zeitkoordinate oder zumindest exakt zeitgleich in Bezug auf ein definiertes (Trigger-)Signal erfasst werden muss. Dies bedeutet, dass diese Zeitgleichheit nun auch ein Prüf- bzw. Kalibrierkriterium ist. Es wird schnell klar, dass für gewisse Anwendungen das führen von Tabellen mit jeweils unabhängigen Zeitstempeln für jede Koordinate bzw. geometrische Messgröße nicht zielführend ist bzw. den Toleranzforderungen nicht genügt – oder dass zumindest derartige Tabellen bezüglich ihrer raum-zeitlichen Qualität geprüft werden müssen. Für die Prüfung bedeutet dies, dass auch das Prüfmittel mit dem eigentlichen Messprozess synchronisiert sein muss. 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 Ti4CalibS – zur Untersuchung des zeitreferenzierten raum-zeitlichen Verhaltens und zur Kalibrierung der Latenzzeit**

Messmittel**untersuchungen** sind erforderlich, um geeignete Kalibrier- und Prüfverfahren für neuartige Messmittel oder Messmittel in neuen Applikationen zu entwickeln. Beispielsweise sind Robottachymeter lediglich für den Stop-and-Go-Betrieb konzipiert, weswegen auch ihre Eigenschaften bezüglich kinematischer Leistungsmerkmale nur unzureichend spezifiziert sind. Trotzdem

lassen sie sich vorteilhaft für raum-zeitliche Messprozesse einsetzen, insbesondere dann, wenn die Latenzzeiten zwischen der Erfassung einzelner Messelemente vernachlässigbar sind oder wenn sie stabil und bekannt sind. Im Prinzip trifft dies für alle Messsysteme zu, die raum-zeitliche Daten erfassen. Deswegen wurde hierfür eine Untersuchungseinrichtung (**Ti4CalibS**, **T**ime-referenced **4D** test and **C**alibration **S**ystem) am GIK entwickelt [Depenthal, 2009], die eine Messunsicherheit kleiner 20  $\mu\text{m}$  aufweist.



*Abb. 1: Ti4CalibS des GIK, mit Komponenten des iGPS (oberes Ende und Mitte des Dreharms) und CCR (unteres Ende, optional, für simultane Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker)*

Sie gestattete beispielsweise dem Hersteller des iGPS neben der Feststellung der raum-zeitlichen Leistungsfähigkeit und der zugehörigen raum-zeitlichen Offsets auch die Optimierung des hochpräzisen Messsystems [Depenthal, 2010]. Bei der Prüfung des Lasertrackers hinsichtlich der Latenzzeit sind die Systemgrenzen erreicht. In Abb. 2 ist ein Experiment zur Bestimmung der Latenzzeit des Vertikalwinkels eines Lasertrackers Leica AT901 dargestellt. Die rote Kurve in der unteren Graphik zeigt die erwartete Messunsicherheit (mit  $k=1$ ), mit der die Latenzzeit bestimmt werden kann. Die grau markierten Bereiche sind Kreisarmpositionen, an denen sich der Vertikalwinkel zu wenig ändert, um eine Latenzzeitbestimmung im Rahmen der generell gesuchten Genauigkeit (ca. 20  $\mu\text{s}$ ) zuzulassen, also der obere und untere Bereich des Kreises. (Dies bedeutet umgekehrt: Für Trajektorienabschnitte, die keine nennenswerte Vertikal-komponentenänderung aufweisen, erfolgt die Vertikalwinkeländerung **langsam**,

und die Latenzzeit des Vertikalwinkels, bzw. ihre ggf. funktionale Abhängigkeit von anderen Parametern wird für diese Messbedingung nahezu bedeutungslos.) Der obere Teil der Graphik zeigt nun, dass sich die auftretende Latenzzeit kaum signifikant aus ihrem Unsicherheitsbereich, der überwiegend kleiner als  $10\ \mu\text{s}$  ist, heraushebt. Bei näherer Betrachtung ist eine gewisse Feinstruktur im linken Teil der Graphik zu erahnen. Es wird deutlich, dass hier die Grenzen von Ti4CalibS liegen. Transformiert in den Raumbereich bedeutet dies eine Bestimmbarkeit der raum-zeitlichen Position mit einer Unsicherheit in der Größenordnung weniger Dutzend  $\mu\text{m}$ , also in der Größenordnung einer Haaresbreite, womit alle Unzulänglichkeiten des Prüflings und des Prüfmittels Ti4CalibS sowie der Umgebungseinflüsse eingeschlossen sind. Die Rückführung des Ti4CalibS ist prinzipiell nur für die Komponenten der Zeit- und Armrichtungserfassung notwendig. Die zu messenden Zeitunterschiede sind extrem klein (unterhalb  $1\text{s}$ ), weswegen herkömmliche Zeitgeber mit wenig ambitionösen Genauigkeitsangaben bereits ausreichend sind und auf eine anspruchsvolle Rückführung verzichtet werden kann. Die Rückführung der Richtungserfassung wurde indirekt über geometrische Restriktionen realisiert (vgl. Abschnitt 3.5)

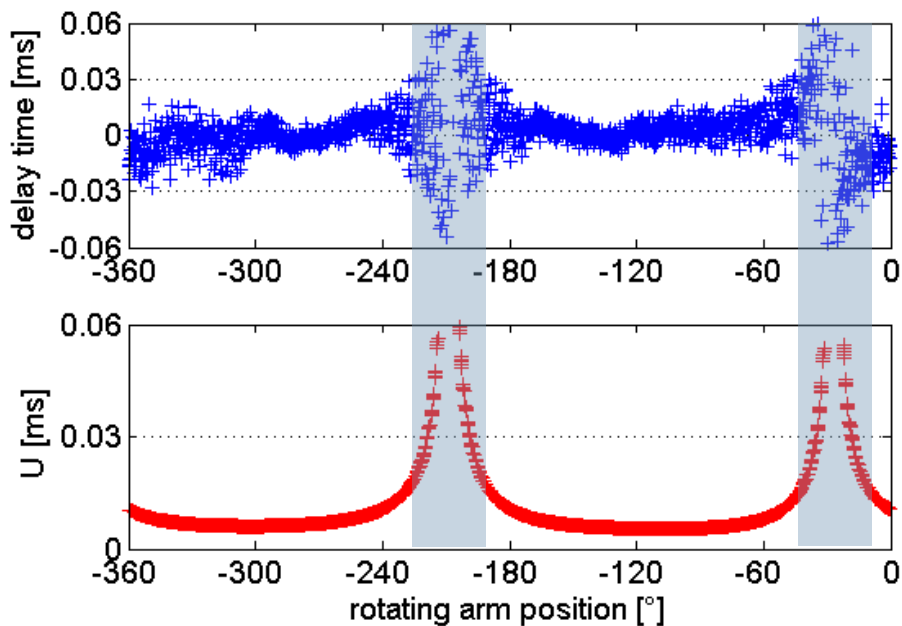


Abb. 2: Latenzzeit für Vertikalwinkel eines Lasertrackers AT901, Objektgeschwindigkeit  $3.3\text{ m/s}$ , Winkelgeschwindigkeit des Kopfes bzw. des Kippspiegels:  $2.7\text{ rad/s}$

## 3.2 PHIL – zur Untersuchung des raum-zeitlichen Verhaltens

**PHIL** steht für **P**recise **H**igh-speed **L**inear track, also für Präzisions-Hochgeschwindigkeits-Messbahn. Da PHIL auf die Prüfung von Messmitteln ausgelegt ist, die raum-zeitliche Zusammenhänge erfassen können, wird dem Paradigmenwechsel vom bisherigen statischen Prüfen eines EDM oder einer Nivellierlatte zum kinematischen Untersuchen gefolgt.

Diese Forderung führte zu einer vollständig neuen Konzeption. Lediglich die Führungsschienen der bestehenden Linearbahn (Länge 24 m, vgl. Abb. 3) und die interferometrische Rückführung (HP-Interferometer Typ Agilent 5519A in Kombination mit Agilent 10885A PC Axis Board) wurden in der ersten, jetzt realisierten Entwicklungsphase beibehalten. Die geforderten Verfahrensgeschwindigkeiten von 9 m/s bei minimaler Beschleunigungsstrecke wurden durch ein neues Antriebs- und Kraftübertragungssystem gewährleistet. 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 Abtastung sichergestellt, wodurch der Bezug zwischen interferometrischem Nullpunkt und Zentrierung des Prüflings hergestellt werden kann. Hierbei wird das Abbé'sche Komparatorprinzip streng eingehalten. Insgesamt kann so für die Bestimmung der Additionskorrektur eine Unsicherheit von 0.2 mm garantiert werden. Dieser Absolutbezug zur Prüflingsstehachse liefert in der jetzigen Ausführung den größten Beitrag zum Unsicherheitsbudget. Wohl deswegen wird der Stehachsbezug nur von sehr wenigen Kalibrierstellen realisiert. Die meteorologische Korrektur wird unter anderem über mehrere Temperatursensoren, die rückgeführt sind, abgeleitet und erreicht eine Unsicherheit von 0.1 ppm. Die Steuerung und die Messwerterfassung erfolgt vollautomatisch. Hierfür wurde am GIK das Softwarepaket **COMET-PRO** (**C**ontrol and **M**Easuring **T**ool for **P**recise **R**apid **O**bject-tracking) entwickelt. Es unterstützt sowohl klassische Messabläufe mit statischer Messwerterfassung als auch kinematische Messabläufe. Für die raum-zeitliche synchronisierte Erfassung wird einer der Lasertracker des GIK verwendet, weil diese Systeme 12-fach höhere Objektbewegungen verkraften als das derzeit implementierte Interferometer. Die Rückführung des Interferometers als auch beider Lasertracker ist durch den Hersteller zertifiziert. An einem Verfahren der Maßstabsrückführung beider Referenzsysteme über Schwebungsfrequenzen wird derzeit gearbeitet. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften der Zahnriemen, ihrer Führung der Krafteinleitung und dem Antriebsencoder kann PHIL auch **ohne** übergeordnetes Distanzmessmittel mit hoher Genauigkeit betreiben werden. Dann werden Positionsunsicherheiten ( $k=1$ ) zwischen  $60 \mu\text{m} @ 0.25 \text{ m/s}$  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. Darüber hinaus ermöglicht PHIL das Studium des dynamischen Verhaltens von Fertigungsstrecken [Günther, 2009]. In weiteren Ausbauphasen werden die Optimierung der Führungsschienen sowie die zeitliche Referenzierung des Interferometers angestrebt. Ein leicht modifiziertes Layout dieser Konstruktion wurde bereits bei einem Instrumentenhersteller implementiert.

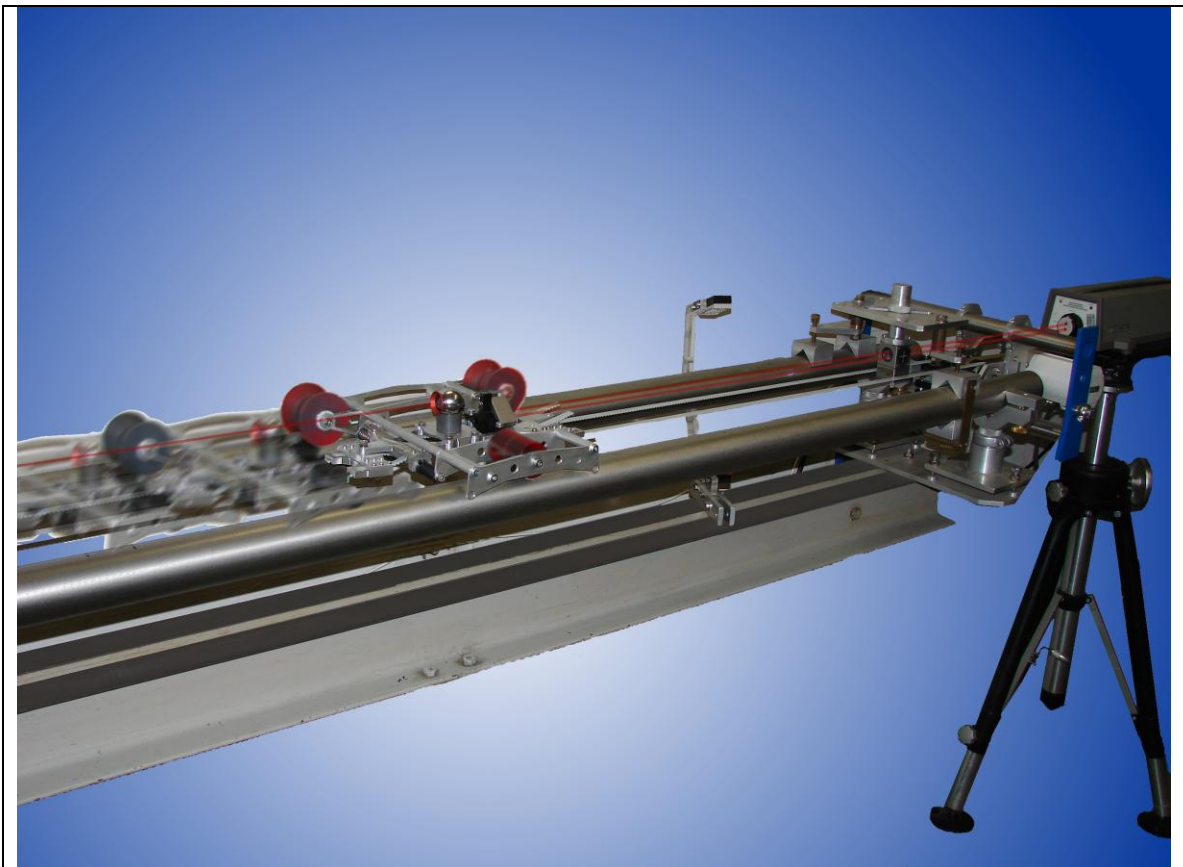


Abb. 3: Hochgeschwindigkeitsmessbahn, Betriebsmodus „kinematisch“

Eine Anwendung im statischen Bereich ist die Untersuchung der materialabhängigen Eindringtiefe bei reflektorloser Distanzmessung. Die Eindringtiefe gehört zu den limitierenden Faktoren, die sich im klassischen Anwendungsfall beispielsweise bei Messungen auf Styropor in unvertretbarer Größe bemerkbar macht (vgl. Abb. 4 und [Richter, Juretzko, 2007]). Sie ist als systematischer Distanzmessfehler korrigierbar, sobald die entsprechenden Kalibrierfunktionen bestimmt sind. Dies ist empfehlenswert für viele moderne Baumaterialien, zu denen auch GFK und CFK zählen.

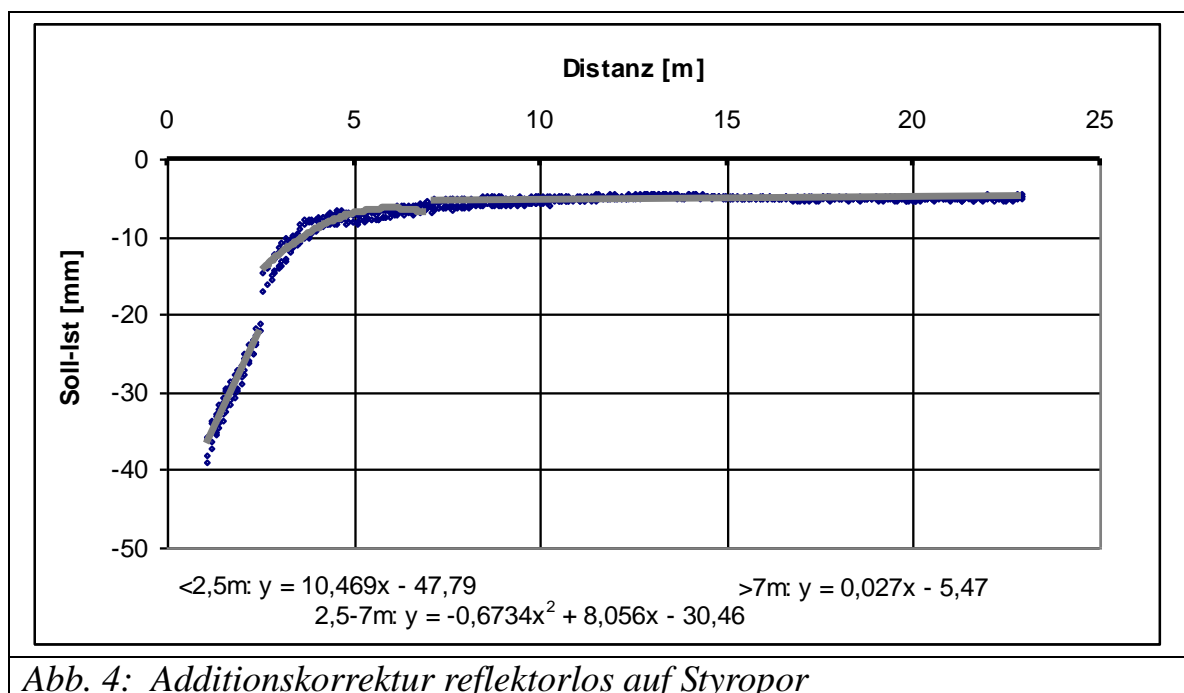


Abb. 4: Additionskorrektur reflektorlos auf Styropor

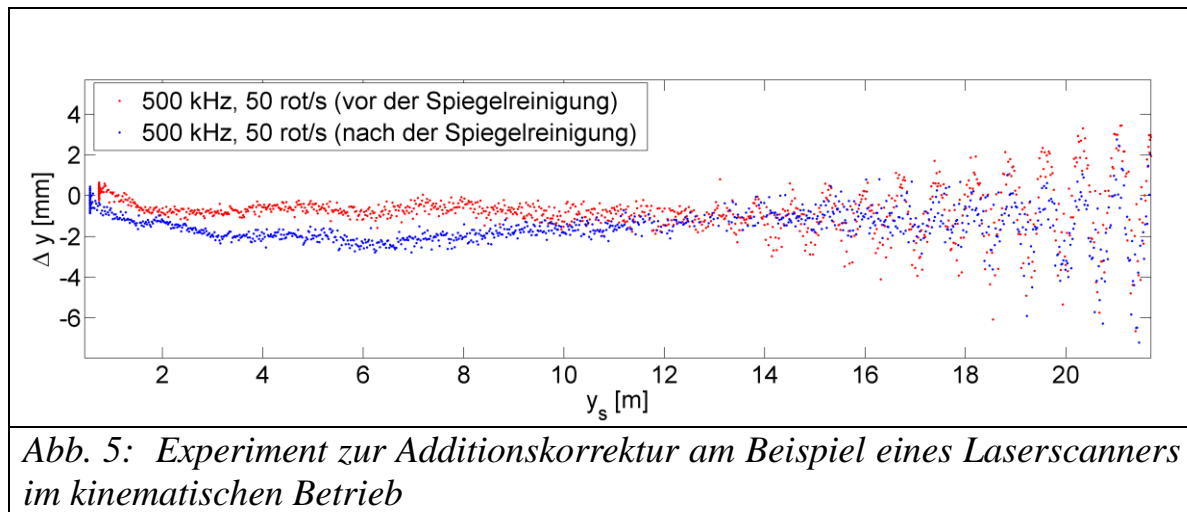
In Präzisionsanwendungen (Prüfung von Rotorblättern von Windkraftanlagen, Flugzeugmontage<sup>1</sup>) tauchen bei CFK-Materialien ähnliche Fragestellungen auf, die derzeit für das Laserradar am GIK untersucht werden. Hier liegt die Herausforderung in der Gestaltung von geeigneten Testkörpern, die die Verknüpfung von antastenden und berührungslosen Messprozessen im  $\mu\text{m}$ -Bereich ermöglichen [Naab, 2010; Hennes, 2007b].

Ein Beispiel für die Untersuchung eines terrestrischen Laserscanners im kinematischen Betrieb (vgl. auch [Vennegeerts et al., 2010] zeigt die folgende Abbildung, in der die im Profilmodus auftretenden Abweichungen während einer Messfahrt über 15 m dargestellt sind. Bei Distanzen ab 10 m wird die Abweichung zur Referenzstrecke größer, und verhält sich periodisch mit der Modulationswellenlänge von etwa 0.7 m – analog zum bekannten „zyklischen Fehler“ bei EDM – sichtbar. Dass die Ursache mit der bekannten Eigenschaft des optischen Übersprechens zusammenhängt, wird deutlich an der Verringerung des Effekts nach der Spiegelreinigung. 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. Hier wird außerdem deutlich, dass Prüfun-

<sup>1</sup> 50% des Gewichts des Airbus A350 wird CFK sein!



gen oder gar Rekalibrierungen in Abhängigkeit von Arbeitsbedingungen und Gebrauchszustand erforderlich sind.



### 3.3 Lasertracker – Nutzung als 4D-Referenz und Testobjekt für die Entwicklung von Präzisionsprüfprozessen

Das Labor des GIK verfügt über zwei Lasertracker der Firma Leica (LTD500 und AT901). Diese sind, im Gegensatz zu Lasertrackern anderer Hersteller von vorne herein triggerbar, was sie als Referenzinstrumente in raumzeitlichen Untersuchungen und Kalibrierungen geringerer bis mittlerer Genauigkeit prädestiniert. Unter diesem Aspekt werden sie neben dem Einsatz in Verbindung mit PHIL bei der Kalibrierung von (kooperierenden) Robotern verwendet, wobei der synchronisierte Einsatz von zwei Lasertrackern in optimierter Konfiguration zu erheblichen Genauigkeitssteigerungen führen kann, weil die höhere Qualität der Distanzmessung (vgl. auch [Juretzko, 2007]) ausgenutzt werden kann (vgl. Beitrag C. Herrmann in diesem Band). Mit den beiden Lasertrackern konnte Ti4CalibS im statischen Betrieb ausreichend gut vermessen und geprüft werden sowie seine Leistungsfähigkeit in raumzeitlichen Anwendungen umrissen werden (vgl. [Depenthal, 2009]). Weitere Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit im raumzeitlichen Modus werden in einem laufenden DFG-Projekt derzeit untersucht. Hinsichtlich der Rückführung der Lasertracker vgl. Abschnitt 3.2.

Bezüglich der statischen Kalibrierung wurden bisher die vom Hersteller vorgesehenen Verfahren verwendet, die – abgesehen vom Interferometermaßstab – weitgehend alle Parameter mit ausreichender Genauigkeit bestimmbar machen. Die Variabilität der Kalibrierparameter erwies sich im Rahmen der

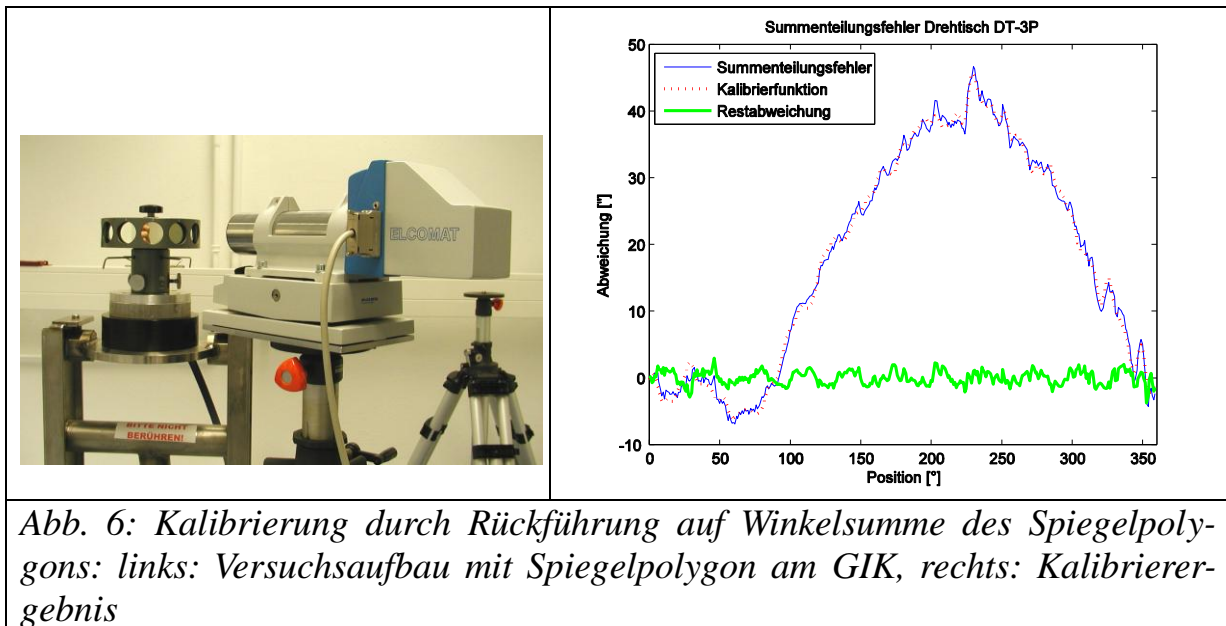
Spezifizierung als hinreichend stabil. Problematischen Konfigurationen gemäß [Muralikrishnan et al, 2009] wird Beachtung geschenkt. Neueste Erkenntnisse bezüglich Aufwärmeeffekten werden derzeit mit dem Hersteller diskutiert und an späterer Stelle veröffentlicht.

### **3.4 Reflektorprüfeinrichtung - Exzentrizitätsbestimmung**

Für Lasertracker werden diverse Reflektortypen angeboten, nämlich Winkelspiegel (CCR), herkömmliche Prismen (TBR), CatEyes und n2-Reflektoren. Diese unterscheiden sich im maximalen Arbeitsbereich und in der Gewährleistung der Bedingungen, dass der einfallende Strahl parallel zum ausfallenden sein soll sowie unabhängig vom Einfallswinkel gleichlange (optische) Wege zurücklegt. Diese Reflektoren sind – mit Ausnahme des n2-Reflektors – in Kugelschalen aus Stahl gefasst. Für den n2-Reflektor ist eine solche Fassung nachträglich realisierbar: eine derartige Fassung wurde von der mechanischen Werkstatt designed, die nun dem Hersteller als konstruktive Lösung zur Verfügung steht und dort bezogen werden kann. Somit erhebt sich die Frage nach möglichen Additonskonstanten bzw. Exzentrizitäten dieser Reflektoren. Zu deren Untersuchung werden derweil Prüfvorrichtungen entwickelt und getestet.

### **3.5 Winkelprüfeinrichtung – halbautomatisierte Vollkreiskalibrierung**

Die Kalibrierung von Winkelencodern erfolgt am GIK nicht durch Rückführung, sondern über geometrische Restriktion. Das übliche Rosettenverfahren wurde durch „eingehängte Messreihen“ (vgl. [Depenthal, 2006]) weiterentwickelt, und erlaubt nun mit einem 12-seitigen Spiegelpolygon auch Aussagen über kurzperiodische Richtungsfehler. Das Verfahren ist halbautomatisiert. In Abb. 6 rechts ist das Kalibrierergebnis für einen Drehtisch dargestellt. Dabei wird die Reduktion des über 40“ (ptp) betragenden Richtungsfehlers (dünne Linie) durch die mit dem Verfahren ermittelte Kalibrierfunktion (gestrichelt) auf etwa ein Zehntel der ursprünglichen Abweichung (dicke Linie) deutlich. Da sich das Verhalten des Drehtisches als stabil, d.h. reproduzierbar erwies, kann mit diesem Verfahren die Qualität von derartigen Drehtischen bzw. ihren Richtungsencodern erheblich gesteigert werden.



### 3.6 Elektronischer Autokollimator – kleinskalige Präzisionswinkelprüfung

Das Messlabor verfügt über einen elektronischen Kollimator des Typs Elcomat mit einer Messgenauigkeit<sup>2</sup> von  $\pm 0.25''$  über  $1000''$ . Dieser wird beispielsweise verwendet, um Interpolationsfehler bei Richtungsmesssystemen zu prüfen. Diese können laut Herstellerangaben heute durchaus die langperiodischen Richtungsfehler übertreffen. Der Kollimator wird, neben dem klassischen visuellen Leitzkollimator, auch in den Übungen der Geodätischen Messtechnik und Sensorik eingesetzt. Die Beschaffung des Kollimators geschah unter strengen Kriterien, wobei das Alternativmodell, das im Hinblick auf kinematische Anwendungen durch die erheblich höhere Datenrate bestach, nicht die Spezifikationskonformitätstests bestand:

<sup>2</sup> Aus dem Kontext der Spezifikation ist Winkelmessgenauigkeit ( $1\sigma$ ) gemeint

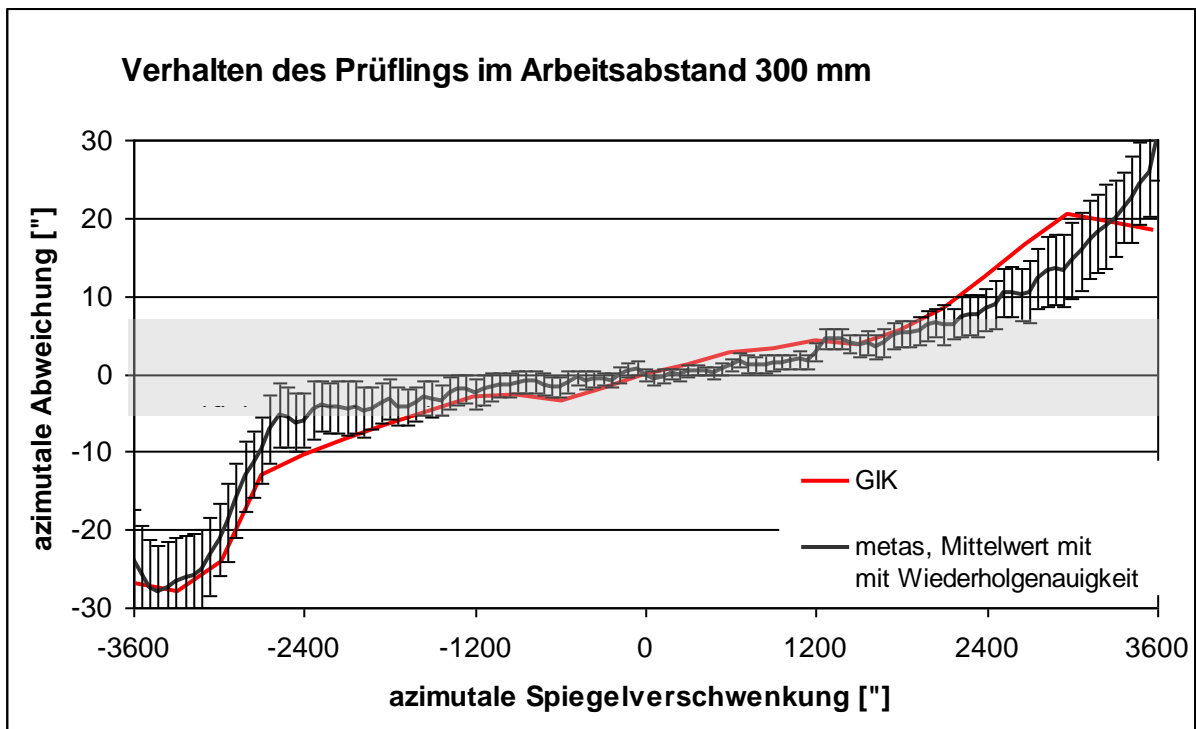


Abb. 7: Überschreiten der spezifizierten Messunsicherheit, ermittelt durch Prüfungen am GIK (rot) und durch die metas (Nationales Metrologieinstitut der Schweiz, schwarz mit Angabe der Wiederholgenauigkeit)

Für den elektronischen Autokollimator Theta Scan T40 der Firma Micro-Radian findet man folgende Angabe auf der Internetseite eines Vertriebspartners: „The ThetaScan T40 dual-axis digital autocollimator resolves to 0.1 arc sec over a range of  $\pm 1^\circ$ .“ [optoiq, 2010]. Dies bedeutet lediglich, dass der kleinste angezeigte Messschritt 0.1“ beträgt und sagt noch nichts über die Messunsicherheit aus. Im Prüfzertifikat des Herstellers wird eine Winkelmessgenauigkeit von 7.2“ über einen Messbereich von 3600“ für einen (Standard-)Arbeitsabstand von 300 mm angegeben, in den Spezifikationen des untersuchten Exemplars wurde diese Genauigkeit sogar für Arbeitsabstände bis zu 1 m garantiert. Tatsächlich zeigt sich jedoch am Rand des Messbereichs bereits für den Standardarbeitsabstand ein deutliches Überschreiten der Spezifikation (vgl. Abb. 7), das für größere Arbeitsabstände noch weiter zunimmt. Der Hersteller verweist bezüglich dieser Diskrepanz 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. Für diese Positionen würde die Toleranz nicht überschritten. Somit kann der Nutzer die erreichbare Messqualität nur vollständig bewerten, wenn er auch den Kalibrier-

prozess kritisch prüft. In diesem Fall führt das Aneinanderketten von kleinen Prüfwinkeln (nach NIST) zur Unaufdeckbarkeit von systematisch wirkenden Abweichungen, während das am GIK verwendete Verfahren diesen Mangel nicht aufweist.

### **3.7 Ballbar – Prüfmittel zur Kalibrierung von Lasertrackern**

Die Justierbedingungen von Lasertrackern umfassen mehr Parameter als die klassische Tachymeterjustierung, weil nun auch die Strahllage und -führung (von Interferometer und IFM) mit berücksichtigt werden muss. Größenordnungsmäßig sind knapp 20 Parameter (je nach Bauart) festzustellen. Hierbei werden einerseits übliche Verfahren wie Messung in zwei Lagen verwendet, aber teilweise auch spezielle Testvorrichtungen. Hierzu zählt die so genannte Ballbar, ein rotierender Arm, der den Reflektor auf einem Kreis mit einem Durchmesser von etwa 1 m führt. Hierbei ist die Einhaltung des Durchmessers von untergeordneter Bedeutung, während die Rundheit und Planarität unmittelbar auf die Kalibrierqualität wirken, womit hier höchste Genauigkeitsforderungen einzuhalten sind. Am GIK wurde eine solche Ballbar neu konzipiert und gefertigt, die der Original-Ballbar von Leica qualitativ überlegen ist. Sie liefert eine radiale Abweichung 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. Die Messungen an der Achse selbst mit einem Messtaster lieferten eine Genauigkeit für die Lagerung von besser 1  $\mu\text{m}$ . Gefordert sind 5  $\mu\text{m}$  (radiale Abweichung) bzw. 10  $\mu\text{m}$  (planare Abweichung).



*Abb. 8: GIK-Eigenkonstruktion der Ballbar*

### **3.8 Tetronom CFK-Stab – Maßverkörperung und Antastgenauigkeit**

Für die Überprüfung von Messgeräten sieht die VDI/VDE 2634 den Einsatz von Maßverkörperungen vor. Anders als bei einer Basislatte sind diese Maßverkörperungen darauf optimiert, die „Kooperation“ mit den aktuellen Messsystemen in optimaler Weise zu gewährleisten und sind anstelle eines Strichkreuzes mit einer Kugel bzw. Kugelaufnahme ausgestattet. Die Kugel besteht aus Keramik, dessen Oberfläche sowohl das optische Anmessen mit einem Laserradar (oder einem klassischen terrestrischen Laserscanner) gewährleistet, oder aus Edelstahl. Beide ermöglichen auch das taktile Antasten mit einem Lasertracker. So sind Antastgenauigkeiten bestimmbar und Längen überprüfbar. Die Kugelaufnahme erlaubt die Aufnahme eines CCRs und damit die Längenprüfung eines Lasertrackers. Das Tetronom des GIK besitzt eine Länge von 1000 mm mit einer Längenunsicherheit ( $k=2$ ) von  $1.8 \mu\text{m}$  bezogen auf Kugelmittelpunkt, die Kugeln selbst eine Unsicherheit ( $k=2$ ) im Durchmesser von et-

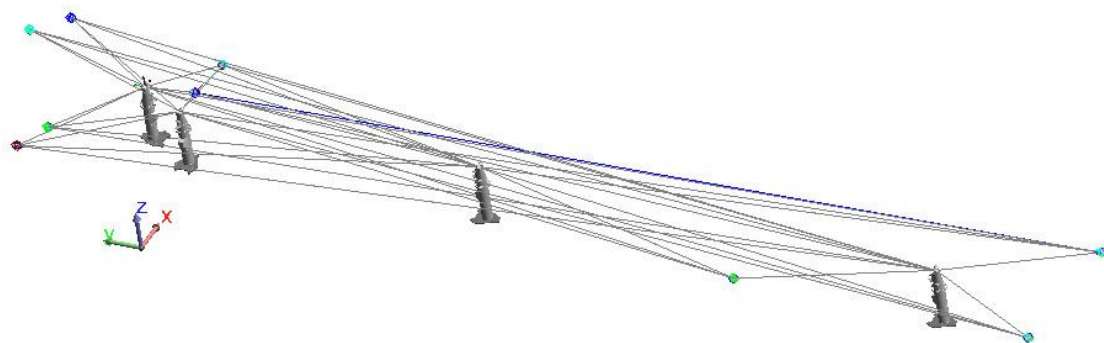
wa  $0.2 \mu\text{m}$  und in der Rundheit von  $0.1 \mu\text{m}$ . Der Stab besteht aus CFK mit einem Ausdehnungskoeffizienten von  $-0.2 \text{ ppm/K}$  (also deutlich geringer als das typischerweise in Basislatten verwendete Invar) mit patentierten, selbstkompensierenden Köpfen. Diese Maßverkörperung gestattet auch eine unkomplizierte Prüfung beider Winkelmesseinrichtungen von Lasertrackern und über die Anmessung der Kugeln auch von Laserscannern (incl. Laserradar) und iGPS.



Abb. 9: Tetronom mit Stahlkugeln **Bild ersetzen**

### 3.9 Testnetz – Ableitung der Performance

Im IB-Labor wurde ein Testnetz angelegt, um bei Globalprüfungen von Lasertrackern und Tachymetern die verwendeten Prüflings- und Zielpositionen weitgehend vergleichbar zu halten. Es ist nicht mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt, weil Gebäudebewegungen nicht auszuschließen sind. Aus der Netzausgleichung kann aber für jeden Prüfling die Winkel- und Streckenmessgenauigkeit abgeleitet werden. Hierzu werden derzeit entsprechende Datensätze mit teilweise leihweise zur Verfügung stehenden Systemen gesammelt. Die folgende Abbildung zeigt ein Netzbild (Netzausdehnung etwa 23 m). Aus räumlichen und Stabilitätsgründen wurde von der Anlage einer ASME B89.4.19-konformen Testanordnung bisher abgesehen.



*Abb. 10: Netzbild des Prüfnetzes. Punkte werden von der Software „Spatial Analyzer“ nach dem Zufallsprinzip farbig markiert. Die gestreckte Netzanordnung ist durch räumliche Restriktionen bedingt.*

## **4 Fazit und Ausblick**

Mit den neuen Kalibriereinrichtungen wird dem Paradigmenwechsel hin zu geforderter Rückführung und kinematischer Vermessung gefolgt. Hinsichtlich der flächenhaften Vermessungen sind die Anstrengungen bisher gering gehalten worden, weil sich eine gewisse Schwerpunktbildung an den Kalibrierinstitutionen als sinnvoll erweist. Trotz allem ist auch eine gewisse Redundanz erforderlich, nämlich dann, wenn Ringversuche zur Qualitätssicherung beitragen. Solche Ringversuche sind bei der Einrichtung der neuen Distanz-Vergleichsstrecke der Universität der Bundeswehr vorgesehen, woran sich das GIK mit beiden Lasertrackern und seinem mobilen Temperaturmesssystem beteiligen wird. Im Rahmen von vielen anderen Qualitätssicherungsmaßnahmen (vgl. z.B. [Hennes, 2010] und andere Beiträge in diesem Tagungsband) bleibt die Messmitteluntersuchung und –kalibrierung ein zentrales Thema und damit auch Aufgabengebiet von Hochschulinstitutionen.

## **5 Literatur**

- DEPENTHAL, C. [2010]: iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010, [http://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/depenthal/iGPS\\_FIG2010\\_Depenthal.pdf](http://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/depenthal/iGPS_FIG2010_Depenthal.pdf), zuletzt besucht: 6.8.2010.
- DEPENTHAL, C. [2009]: Quaternion-Based Delay Time Determination for Kinematic Optical Measuring Systems. IEEE Proceedings Eurocon 2009, 18.-23. Mai 2009, Saint Petersburg, Russia, ISBN 978-1-4244-3861-7, p 1139-1144.
- DEPENTHAL, C. [2006]: Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. AVN Heft 8/9 S. 305-309.
- GÜNTHER, A. [2009]: Eigenschaften der Linearmessbahn im kinematischen Betrieb. Diplomarbeit, GIK, unveröffentlicht.
- HENNES, M. [2010]: Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, 93. DVW-Seminar, Hannover, 10./11.Juni 2010, Band 61, S. 239-252.



- HENNES, M. [2007a]: Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN, S. 136-146.
- HENNES, M. [2007b]: Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren. 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung (BWB) Industriemesstechnik, TU Dresden, Geodätisches Institut, 1.6. 2007, S. 59-65.
- HENNES, M.; HEISTER, H. [2007]: Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. AVN, S. 375-383.
- HENNES, M.; INGENSAND, H. [2000]: Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. Beitrag zu XIII Kurs f. Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3.2000, in: Schnädelbach, K.; Schilcher, M. (Ed) Ingenieurvermessung 2000, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166-177.
- JURETZKO, M. [2007]: Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 17.-20.4.2007, in: Brunner, F. K. (Hrsg.); Ingenieurvermessung 07, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 181-186.
- MURALIKRISHANAN, D.; BLACKBURN, S.; BLOCKARDT, B.; ESTLER, W. [2009]: ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 114, 21-335.
- NAAB, C. [2010]: Eigenschaften des Laser Radars. Diplomarbeit, GIK, unveröffentlicht, 100 S..
- RICHTER, E.; JURETZKO, M. [2007]: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. AVN 6/2007.
- VENNEGEERTS, H.; RICHTER, E.; PAFFENHOLZ, J.-A.; KUTTERER, H.-J.; HENNES, M. [2010]: Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner. AVN, S. 140-147.
- ASME B89.4.19 [2005]: Performance Evaluation of Laser Based Spherical Coordinate Measuring Systems. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- DIN V ENV 13005 [1999]: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. 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. Beuth Verlag, Berlin.

ISO 17123 [ab 2001]: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Intern. Organization for Standardization, Switzerland.

NN: Internationales Wörterbuch der Metrologie. 2. Aufl., Herausgeber: Deutsches Institut für Normung, ISBN : 3-410-13086-1.

Optoiq [2010]: <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>, zuletzt besucht 23.2.2010.

VDI VDE [2002]: VDI / VDE 2634 Blatt 1: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. [www.beuth.de](http://www.beuth.de).

VDI VDE [2002]: VDI / VDE 2634 Blatt 2: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. [www.beuth.de](http://www.beuth.de).