

# Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik

Maria Hennes  
Geodätisches Institut des KIT  
Englerstr. 7  
76128 Karlsruhe  
maria.hennes@kit.edu

## 1 Einleitung

Qualitätssicherung in der Messtechnik ist eine wichtige Komponente des Qualitätsmanagements im Vermessungswesen. Die Diskussion um diese Thematik ist in letzter Zeit im Vermessungswesen wieder aufgelebt (vgl. z.B. [Ehrhorn, Rother, 2010]). Gleiches gilt für die Prüfprozesse in der Fertigungstechnik, weil man erkannt hat, dass mit immer enger werdenden Toleranzen 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. Im Kontext des Qualitätsmanagements soll dieser Beitrag auf die Qualitätssicherung in der Messtechnik selbst fokussieren. Hierbei sollen weniger einzelne Messaufgaben im Sinne eines best-practice-guide's beschrieben werden, weil diese Vorgehensweise aufgrund der Vielfalt der Ingenieurvermessungsaufgaben ihr Ziel verfehlt. Heute wird der Vermessungsingenieur (besser: der Messingenieur) mehr und mehr mit komplexeren und individuelleren Messaufgaben konfrontiert. Da hier gerade die Chance liegt, seine von Haus aus qualitätsorientierte Denkweise gewinnbringend in andere Ingenieurdisziplinen zu integrieren, soll anhand der Darstellung einiger ausgewählter Aspekte und Maßnahmen die qualitätssichernde Analyse von (neuen) Messaufgaben erleichtert werden.

## 2 Was bedeutet Qualitätssicherung in der Messtechnik?

Wichtig ist hier die Betrachtung von Messmittel **und** Messprozess. Da Letzterer erheblichen Einfluss auf die Qualität des Mess- (oder Prüf-)ergebnisses haben

kann, wird erst durch Integration beider Komponenten die Erstellung eines hochwertigen Qualitätsmanagementsystems ermöglicht. Wichtig ist also die Betrachtung messmittel- und messprozessbezogener Maßnahmen. Gleichermäßen gilt, dass auch die Messmittelprüfung durch einen Messprozess erfolgt, der wiederum Qualitätsstandards unterliegt.

Zu den messmittelbezogenen Qualitätssicherungsmaßnahmen gehören zunächst Rückführung und Kalibrierung, deren Resultat beispielsweise in Kalibrierscheinen oder Zertifikaten festgehalten wird. Hierzu gehören auch genormte Prüfverfahren, die zu entsprechenden Angaben in den Instrumenten- bzw. Messmittelspezifikationen führen. Derartige Zertifikate oder Spezifikationen können bereits beim Kauf eines Messmittels verlangt werden. Da allerdings die Einsatzbedingungen des Messmittels von den Kalibrier- bzw. Prüfbedingungen abweichen können, sollte durch entsprechende Untersuchungen und Prüfungen auch die Eignung des Messmittels für die geplanten Arbeitsbedingungen festgestellt werden, soweit dies nicht durch die Spezifikation erfolgt ist. Hier spielt bereits der Messprozess eine (manchmal entscheidende) Rolle.

Zu den prozessbezogenen Qualitätssicherungsmaßnahmen gehört vor allem die Kenntnis aller Einflussfaktoren und ihrer Wirkung auf den Messprozess und das Messmittel. Lassen sich diese Informationen nicht aus den physikalischen Randbedingungen sowie der Kenntnis der Funktionsweise einzelner Systemkomponenten ableiten, sollten sie durch entsprechende gezielte Untersuchungen ermittelt werden. Aus der Kenntnis der Zusammenhänge über den Messprozess kann dann durch Optimierung der Arbeitsbedingungen oder des Messprozesses (der Messanordnung) eine Qualitätsverbesserung erreicht werden. Allein die Einbettung des Messprozesses in normative Regelungen führt nicht zwingend zum Erfolg.

### **3 Einzelne Maßnahmen**

Die hier dargestellten Maßnahmen und Sachverhalte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sollen viel mehr zum sensiblen Umgang mit Messmitteln und Messprozessen motivieren.

### 3.1 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. Kalibrierung kann auch durch geometrische Restriktionen erfolgen, wie zum Beispiel Winkelsumme im Dreieck oder über den Vollkreis. Letztere wird zur Kalibrierung von Winkelencodern verwendet, (vgl. [Depenthal, 2006]).

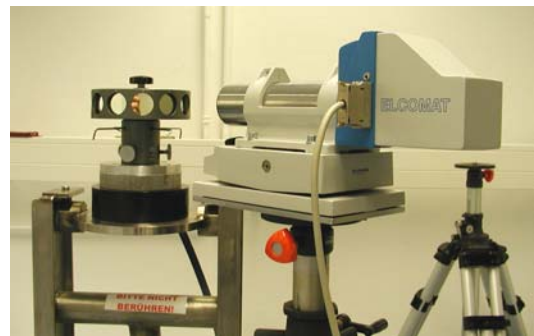
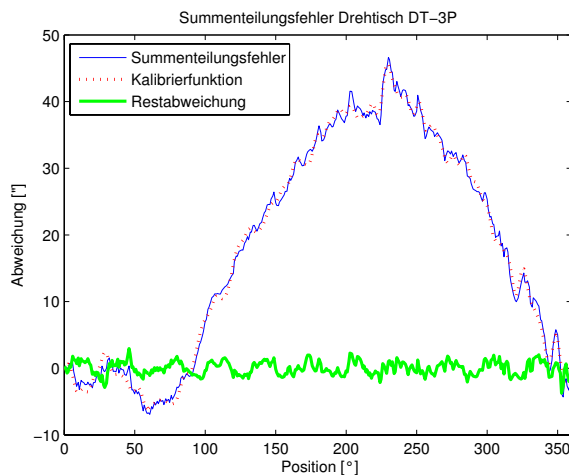


Abbildung 1: Kalibrierung durch Rückführung auf Winkelsumme des Spiegelpolygons: links: Kalibrierergebnis, rechts: Versuchsaufbau mit Spiegelpolygon am Geodätischen Institut des KIT

Rückführung bedeutet, dass das Normal höherer Ordnung für die Kalibrierung in Bezug auf einen nationalen Standard bekannt bzw. kalibriert ist. In der dimensionellen Messtechnik ist also die Längeneinheit „Meter“ rückzuführen, was auch beispielsweise im Maschinenbau verlangt wird. Denn hier gibt es, anders als im klassischen Vermessungswesen, nicht den Bezug auf einen „Netzmaßstab“, der durch Fixpunkte im Referenzsystem (beispielsweise der Landesvermessung) gegeben ist. Auch die Kombination von unterschiedlichen Messverfahren in einem Projekt kann durch Rückführung vereinfacht werden. An der EDM wird die Komplexität des Rückführungsprozesses deutlich: die Rückfüh-

rung des maßstabsgebenden Frequenznormals auf das Normalmeter gelingt relativ einfach, jedoch führen spezielle Instrumenteneigenschaften zu weiteren Maßstabeffekten, die eine Prüfung des Instrumentes auf einer – möglichst rückgeführten – Vergleichsstrecke erforderlich machen. Es treten zwei Herausforderungen auf: erstens: die Rückführung der mechanisch definierten Längen der Vergleichsstrecke selbst, und zweitens (sowohl für Rückführung der Referenzlängen) als auch für die eigentliche Instrumentenkalibrierung: die ausreichend genaue Kenntnis der Messbedingungen. Ausschlaggebend ist hier der Brechungsindex, dessen Güte vor allem durch die Güte der Temperaturerfassung geprägt ist. Letztendlich lässt sich also nicht das Messmittel „EDM“ solitär kalibrieren, sondern nur als Systemkalibrierung inklusive aller meteorologischer Sensoren (vgl. [Hennes, Ingensand, 2000]). In Bezug auf die Durchführungsvarianten einer elektrooptischen Distanzmessung sollte streng genommen von einer Prozesskalibrierung gesprochen werden.

Mit der Lösung derartiger Aufgaben befasst sich die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel e.V. (GKGM). Sie plant und organisiert beispielsweise Ringversuche für Kalibrieranlagen, für die eine Rückführung im klassischen Sinne nicht streng möglich ist. Auch bei der Nivellierlattenkalibrierung haben Ringversuche zu einem belastbaren Konzept geführt, das durch Gründungsmitglieder der GKGM entwickelt worden ist [Sonderheft AVN 6/2005]. Ringversuche werden im Fall der Nicht-Rückführbarkeit von den Metrologieinstituten als akzeptabel angesehen. Auf der Basis dieser Kalibrierkompetenz konnte am Kalibrierstandort Graz die Bedeutung der Systemkalibrierung für Nivelliersysteme wirkungsvoll aufgezeigt werden [Woschitz, 2005].

### **3.2 Untersuchung und Spezifikationskonformität**

Obwohl die Kalibrierung gemäß einem Kalibrierplan erfolgen muss, in dem die Kalibrierhäufigkeit, die Kalibriermethode und die Kalibriertoleranz festgelegt ist, wird hierdurch nicht das Verhalten eines Messmittels unter beliebigen, aber zugelassenen Messbedingungen berücksichtigt. Eine Geräte- oder Systemspezifikation gilt nur für die hierin spezifizierten Messbedingungen, zum Beispiel durch den Messbereich und/oder Arbeitsabstand und/oder den Betriebstemperaturbereich und/oder Luftfeuchtebereich und/oder Reflektivität (Laserscanner) und/oder Elevation (GNSS) usw., im übrigen gelten die Bedingungen des üblichen Gebrauchs. Wenn anzunehmen ist, dass die Einsatzbedingungen hiervon übermäßig abweichen, ist das Verhalten des Messmittels bezüglich dieser Bedingungen zu untersuchen, um die Qualität des Messergebnisses sicherzustellen.

Der Untersuchung kommt in diesem Kontext eine andere Bedeutung als der Instrumentenuntersuchung im herkömmlichen Sinn zu, bei der primär der Fokus auf der Feststellung der Leistungsfähigkeit über die spezifizierten Genauigkeiten hinaus, aber unter üblichen Einsatzbedingungen liegt.

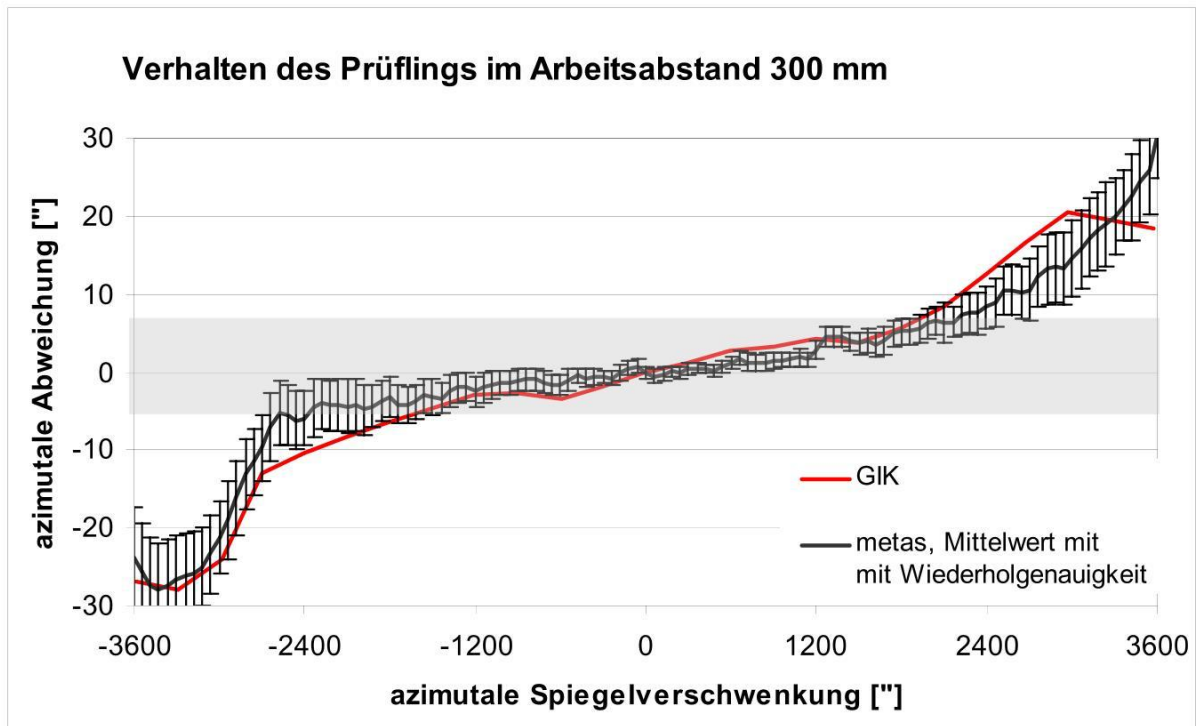
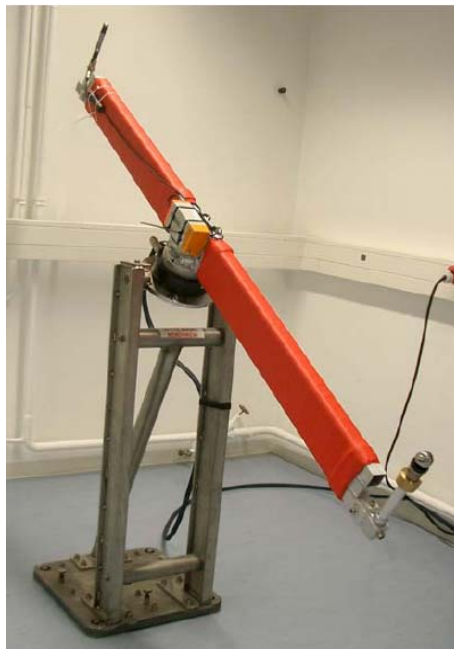


Abbildung 2: Überschreiten der spezifizierten Messunsicherheit, ermittelt durch Prüfungen am Geodätischen Institut des KIT (rot) und durch die metas (Nationales Metrologieinstitut der Schweiz, schwarz mit Angabe der Wiederholgenauigkeit)

Spezifikationen und Kalibrierzertifikate sind sehr kritisch zu lesen. Beispielsweise findet man für den elektronischen Autokollimator Theta Scan T40 der Firma Micro-Radian 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 Arbeitsabstand von 300 mm angegeben, in den Spezifikationen wurden sie für Abstände bis zu 1 m garantiert. Tatsächlich zeigt sich jedoch am Rand des Messbereichs für den Standardarbeitsabstand ein deutliches Überschreiten der Spezifikation (vgl. Abbildung 2), das für größere Arbeitsabstände noch weiter zunimmt. Der Hersteller ver-

weist 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 werde. Für diese Positionen würde die Toleranz nicht überschritten. Somit kann der Nutzer die erreichbare Messqualität nur vollständig bewerten, wenn er auch den Kalibrierprozess kritisch prüft.

Messmitteluntersuchungen sind ebenfalls 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 stabil und bekannt sind. Hierfür wurde eine Untersuchungseinrichtung (Ti4Calibs, **T**ime-referenced **4D** test and **cal**ibration system) am Geodätischen Institut des KIT entwickelt [Depenthal, 2009], die eine Messunsicherheit kleiner 20  $\mu\text{m}$  aufweist. Sie gestattet dem Hersteller des iGPS neben der Feststellung der raumzeitlichen Leistungsfähigkeit und der zugehörigen raum-zeitlichen Offsets auch die Optimierung des hochpräzisen Messsystems [Depenthal, 2010].



*Abbildung 3: Ti4Calibs des Geodätischen Instituts des KIT, mit Komponenten des iGPS (oberes Ende und Mitte des Dreharms) und CCR (unteres Ende, optional, für simultane Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker)*

Auch Laserscanner zählen zu den Messmitteln, deren Verhalten noch nicht ausreichend erforscht ist, um allen zgedachten Applikationen gerecht zu werden. Beispielsweise gehört die materialabhängige Eindringtiefe bei reflektorloser Distanzmessung zu den limitierenden Faktoren, die sich im klassischen Anwendungsfall bei Messungen auf Styropor deutlich bemerkbar macht (vgl. [Richter, Juretzko, 2007]). Sie ist als systematischer Distanzmessfehler korrigierbar, sobald die entsprechenden Kalibrierfunktionen bestimmt sind. In Präzisionsanwendungen tauchen ähnliche Fragestellungen bei CFK-Materialien auf, die derzeit für das Laserradar am GIK untersucht werden.

### 3.3 Prüfung und Normen

Prüfung zielt auf die Funktionsfähigkeit des Messmittels. Für klassische Messmittel (Nivelliersysteme, Theodolite, EDM, Tachymeter, Rotationslaser, Lote, GNSS) schlägt die ISO 17123<sup>1</sup> einfach und schnell durchzuführende Feldprüfverfahren vor, die die Funktionsfähigkeit testen. Sie sind nicht geeignet für die Abnahme und ersetzen weder Kalibrierung noch Untersuchung. [Gottwald und Rüeger, 2000] schlagen für Tachymeter alternativ ein belastbareres Verfahren vor.

Der Verein Deutscher Ingenieure stellt mit Kalibrierrichtlinien und Richtlinien für optische Technologien eine Sammlung von Prüfverfahren für dimensionelle Nahbereichsmesstechnik vor, die zur Übertragung auf geodätische Messmittel anregen (z.B. [Gottwald et al., 2009] mit VDI/VDE 2634: optische 3D-Messsysteme). Hier liegt der Fokus auf der Prüfung der Tauglichkeit des Messsystems für die Ermittlung von Objektmaßen sowie der hierbei erreichbaren Genauigkeit, was vom Grundsatz her eine andere Herangehensweise ist als die von der ISO 17123 verfolgte (wo der Fokus auf der Ermittlung der Instrumentengenauigkeit im Vergleich zu den Spezifikationen liegt). Eine noch produktnäher ausgerichtete Norm ist die ISO 14253 zur Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen. In dieser sind Begriffe zur Spezifikation sowie Regeln für die Abnahme niedergelegt. Mit der VDI/VDE 2600 ist eine Richtlinie in Arbeit, die die Eignung von Prüfprozessen beinhaltet. Ähnlich wie die VDI/VDE 2634 geht auch die American Society of Mechanical Engineers (ASME) vor, die mit der B89.4.19 im Jahr 2006 eine Prüfvorschrift für Lasertracker vorlegt, die im Prinzip auch auf Tachymeter anwendbar ist. Obwohl basierend auf dieser

---

<sup>1</sup> Dt. Fassung DIN 18723



Prüfvorschrift sowohl objektorientierte Messabweichungen (längenbezogen) als auch messmittelbezogene Messabweichungen (Distanz und Winkel) angegeben werden können, können mit dieser Prüfvorschrift nicht alle Messabweichungen aufgedeckt werden (vgl. [Muralikrishanan et al., 2009] ). Diese Prüfvorschrift führt auch ein relativ ungebräuchliches Genauigkeitsmaß ein, den MPE (Maximum Permissible Error), der Grenzwerte angibt, die das Messmittel nicht überschreitet (vgl. auch [Hennes, 2007, und Hennes, Heister, 2007]).

### **3.4 Simulation**

Die Auswirkung von Standardmessunsicherheiten auf geodätische Messungen wird meistens vorteilhaft mit Netzanalysesoftware gelöst. Wenn die übliche Varianzfortpflanzung zu kurz greift (beispielsweise wird die alignierte Aneinanderkettung von Distanzmessungen bei Winkelfehlern immer zu einer zu kurzen Distanz führen, was aber nicht von der klassischen Varianzfortpflanzung berücksichtigt wird), eignet sich für die Abschätzung der Wirkung von Messunsicherheiten die Monte-Carlo-Methode. Mit Spatial Analyzer (NRK) ist eine Software auf dem Markt, in der zwar eine herkömmliche Netzausgleichung implementiert ist [Calkins, 2002], die aber für die Varianzbetrachtung die Monte-Carlo-Methode verwendet. Für die Auswirkung von Abweichungen eines Messmittels auf Objektmaße ist momentan eine Software für Lasertracker basierend auf der virtuellen Koordinatenmessmaschine am weitesten fortgeschritten, aber noch nicht kommerziell verfügbar.

### **3.5 Einwirkung von Umgebungsbedingungen und Anpassung von QS-Maßnahmen an den Messprozess**

Neben messmittelbezogenen Maßnahmen tragen auch messprozessbezogene Maßnahmen zur Qualitätssicherung und -steigerung bei. Da der Messprozess durch eine Vielzahl verschiedener Einflüsse geprägt wird, ist die möglichst vollständige Kenntnis dieser Einflüsse bedeutsam. Ein Beispiel sind einseitige Erwärmungen, die sowohl auf die Stehachse eines Instrumentes als auch – mit einem anderen Wirkungsgrad – auf die Libelle bzw. den Kompensator wirken können. Eine Libelle lässt also lediglich erkennen, dass die Stehachsneigung sich geändert haben könnte; der Neigungsmesswert des Kompensators könnte auch eine noch lotrechte Stehachse um seine thermisch bedingte Spielpunktverlagerung korrigieren. Thermische Effekte spielen sowohl bei mechanischen als auch bei elektronischen Komponenten eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die Umgebungsbedingungen wirken auch in unterschiedlicher Weise auf das



Signal-Rausch-Verhältnis des empfangenen optischen oder elektrischen Signals ein (beispielsweise durch Abschattung bei GNNS-Signalen oder durch die Reflexionseigenschaften des zu vermessenden Objektmaterials auf Laserscannersignale). Eine vollständige Beschreibung aller Effekte würde den Rahmen des Beitrags sprengen. Eine Hilfe zur vollständig(er)en Erfassung der Störquellen bietet sich in Form eines Ishikawa-Diagramms an, das ein strukturiertes Brainstorming unterstützt (vgl. [Hennes, 2006]). Hierbei werden sich sowohl Einflüsse zeigen, die durch Modifikation des Messprozesses reduziert werden können als auch solche, die systematisch wirken und korrigiert werden können. Jede Korrektur kann jedoch nur bis zu einem gewissen Grad den Messprozess verbessern. Verbleibende Wirkungen sind abzuschätzen, um dem Messergebnis ein belastbares Vertrauen zuordnen zu können. In der Geodäsie hat sich hierfür die Varianzfortpflanzung bewährt. In Anbetracht eines Ishikawa-Diagramms greift jedoch diese klassische Verfahrensweise zu kurz, weil die Varianzfortpflanzung lediglich auf Beobachtungsgleichungen aufbaut. Diese sind als „Modell der Wirklichkeit“ nicht vollständig und vernachlässigen in der Regel kleine und/oder zu vernachlässigende (deterministische) Komponenten. Trotzdem wirken diese auf das Messergebnis, und gerade durch ihre Vernachlässigung vergrößert sich die Unsicherheit des Messergebnisses. Hier unterstützt der „Leitfaden zur Angabe von Unsicherheiten beim Messen“, GUM, DIN V ENV 13005 [1999], indem er eine durch Bayes-Statistik theoretisch begründbare Methode (vgl. [Krystek, 2009]) zur Integration dieser Effekte empfiehlt (vgl. auch Beitrag Heister in diesem Band). Für den Vermessungsingenieur, der mit Varianzfortpflanzung umzugehen weiß, ist die im GUM dargestellte Vorgehensweise sehr leicht nachvollziehbar. Darüber hinaus ermöglicht die strukturierte Auflistung von Sensitivitätskoeffizienten und Messunsicherheitsbeiträgen eine einfache Detektierung der am meisten zur Genauigkeitsminderung beitragenden Einflüsse, wodurch eine Optimierung des Messprozesses erleichtert wird. Der GUM in seiner neuesten Fassung integriert die Monte-Carlo-Methode, wodurch nun auch die oben genannten Vorteile genutzt werden können.

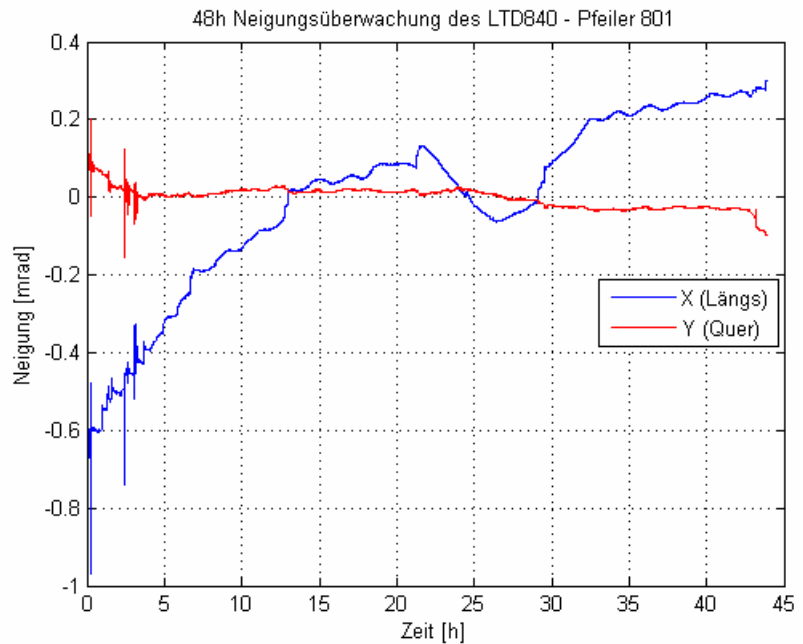


Abbildung 4: links: Lasertracker LTD 840 in liegender Messposition, rechts: Neigungsstabilität über 48 h

Wie ein Messprozess qualitativ hochwertig angelegt werden kann, zeigt folgendes Beispiel, das viele der oben beschriebenen Gesichtspunkte ansatzweise enthält: Da Leica Lasertracker lediglich einen Vertikalwinkelmessbereich von  $\pm 45^\circ$  aufweisen, müssen sie bei beengten Raum- und/oder Sichtverhältnissen liegend eingesetzt werden (vgl. auch [Juretzko, 2009]). Da die Spezifikation diesen Einsatzbereich nicht vorsieht, wurde in einem Projekt mit derart beengten Raumverhältnissen zunächst eine Funktionsprüfung (Field check nach Vorgaben des Herstellers) mit stehendem und liegendem Lasertracker (hier Leica LTD 840) durchgeführt. Die erforderlichen Prüfmessungen sind in diesem Fall – anders als in den meisten Funktionsprüfungen der ISO 17123 – auch geeignet, eine Reihe von Kalibrierparametern zu bestimmen. Sie wurden für den stehenden Gebrauch erneut festgelegt, soweit sie – durch Transport oder ähnlichem bedingt – die erlaubten Toleranzgrenzen überschritten. Bei liegendem Lasertracker erreichten bzw. überschritten sie knapp die zugelassenen Toleranzgrenzen, die der Hersteller zur Einhaltung der Spezifikation festgelegt hat (vgl. [Lösler, 2008]). Dies gab Anlass, die Vermessung mit liegendem Lasertracker weiter zu verfolgen. Da die Kalibriermessungen eine Momentaufnahme abbilden, wurde die Messkonfiguration (Lasertracker und Trägersystem) auf allfällige Neigungen hin untersucht. Es zeigte sich über 48 h Instabilitäten, die im Rahmen der geforder-

ten Genauigkeit nicht mehr tolerierbar waren (vgl. Abbildung 4). Deswegen wurde der Messprozess auf ausreichend kurze Perioden zwischen zwei Neuorientierungen des Lasertracker-Beobachtungssystems optimiert. Durch die Neuorientierung im Fixpunktfeld wurde gleichzeitig die translatorische Festlegung des Beobachtungssystems überwacht. Letztendlich konnten so die erforderliche Punktgenauigkeit bei effizientem Messprozess erreicht werden.

### **3.6 Optimierung des Messprozesses**

Die Vermessungstechnik kennt eine Reihe von bewährten Verfahrensweisen und klassischen Messregeln für geodätische Beobachtungen, die zur Verbesserung eines Messergebnisses beitragen und standardmäßig durchgeführt werden. Sie haben das Potential, auch in artfremden Anwendungen erfolgreich eingesetzt zu werden. Hierzu zählen unter anderem alle Differenzverfahren, Messung in zwei Lagen, Umkehr der Messrichtung zur Elimination von Driften. Manchmal sind sie zu einfachen Handlungsanweisungen degradiert, die den funktionalen Kern in den Hintergrund drängen und hierdurch leider auch das Potential für die Applikation auf andere Messaufgaben verschleiern oder durch ihre unüberlegte Anwendung das Messergebnis verschlechtern. Die folgenden Beispiele illustrieren dies. Typische bekannte Verfahrensweisen sind beispielsweise bei der Satzwinkelmessung die Umkehrung der Zielreihenfolge im zweiten Halbsatz und beim Präzisionsnivelement die Beobachtungsreihenfolge RVVR. Beide folgen dem Prinzip: Umkehrung der Messreihenfolge zur Reduktion von Driften (hier Pfeilerdrehung und relative Stativ- bzw. Lattenhebungen und -senkungen auf einem Instrumentenstandpunkt). Das Potential dieser Messstrategie wird beispielsweise dann erkannt, wenn die Beobachtungsreihenfolge von vielen doppelt erfassten Zwischenblicken bei einer Präzisionsrostaufnahme entsprechend dem Handlungsprinzip „Satzwinkelmessung“ erfolgt oder die Ebenheitsprüfung mittels einer Setzlibelle mäanderförmig durchgeführt wird, um allfällige Driften aus benachbarten Positionen ableiten zu können. Die Befolgung unreflektierter Messregeln ist beispielsweise auch dann kritisch, wenn ein Hersteller eines polaren Messsystems die Nutzung in nur einer „Fernrohr“-Lage empfiehlt, weil es auch (so) kalibriert sei. Dann liegt der Verdacht nahe, dass für beide Lagen unterschiedliche Additionskonstanten existieren, was in zwei Fällen nachgewiesen werden konnte. Die übliche Mittelung der Distanzmessergebnisse aus beiden Lagen führt also zur Verschlechterung des Messergebnisses, weil geräteintern die Messung in der zweiten Lage um eine unzutreffende Additionskonstante korrigiert wurde.

Die oben angesprochenen Sensitivitätskoeffizienten bilden gemeinsam mit den klassischen Strategien der Netzoptimierung ebenfalls einen Schlüssel für die Optimierung des Messprozesses. Ein weiteres Augenmerk ist auf die zeitliche Variation von Einflüssen zu legen. Unter dem Aspekt der Differenzverfahren dürfen Störeinflüsse durchaus groß sein, wenn sie sich – ausreichend konstant bleibend – durch Differenzmessung während des daraufhin optimierten Zeitfensters ausschalten lassen. Analoges gilt für Linearitätsfehler eines Sensors: wird nur ein kleiner Messbereich des Sensors genutzt, kann selbst ein Sensor mit einem großen Linearitätsfehler brauchbare Messergebnisse liefern, wenn er die vorteilhafteren übrigen Eigenschaften besitzt (Ansprechverhalten, Auflösungsvermögen etc.)

## 4 Fazit

Zumindest folgende qualitätssichernde Maßnahmen gelten als zielführend

- Falls notwendig, Kalibrierung durchführen
- Falls notwendig, Messmitteluntersuchungen durchführen
- Prüfverfahren kritisch betrachten
- Messprozess vollständig durch Simulation abbilden
- Prüf-, Justier- und Kalibriermaßnahmen dem Messprozess anpassen
- Einwirkungen von Umgebungsbedingungen und deren Einfluss beachten
- Messprozess optimieren

Nicht alle Maßnahmen sind in gleichem Ausmaß wirksam. Im Kontext der beispielhaft genannten Szenarien soll die Auflistung zum einen Mut machen, klassische Verfahrensweisen des Messprozesses kritisch zu überdenken und zum anderen das Selbstvertrauen geben, bekannte Grundkonzepte auf andere Anwendungen zu übertragen. Die einzelnen aufgezeigten Beispiele sollen zur Sensibilisierung verhelfen. Außerdem können die Vorschläge und Arbeiten von Institutionen zu einer erheblichen Vereinfachung der Qualitätssicherung beitragen, auch wenn die Standardisierung von Maßnahmen die Gefahr in sich birgt, nicht auf die Messaufgabe anwendbar zu sein.

## 5 Literatur

- CALKINS, J. [2002]: Quantifying Coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems. Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 214p.
- DEPENTHAL, C. [2010]: iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010, in print.
- 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.
- EHRHORN, U.; ROTHER, F. [2010]: Vom QMS nach DIN EN ISO 9002 zum Total Quality Management - 10 Jahre Arbeit an und mit Qualitätsmanagementsystemen.. ZfV, S.32-39.
- GOTTWALD, R.; HEISTER, H.; STAIGER, R. [2009]: Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern - eine Standortbestimmung. zfv, 2/2009, S. 88-96.
- GOTTWALD, R. ; RÜEGER, J. [2000]: Feldprüfverfahren für elektronische Tachymeter - Wunsch oder Realität? AVN, 11-12/2000, S. 386-390.
- HENNES, M. [2007]: Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN, S. 136-146.
- 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. [2009]: Positionsbestimmung der Elektromodule des KATRIN-Experiments mit Hilfe eines Lasertrackers. AVN 6/2009, S. 220-230.
- KRYSTEK, M. [2009]: Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie in der Längenmesstechnik. AVN 6/2009, S. 231-238.
- LÖSLER, M. [2008]: Abschlussbericht der Vermessungsarbeiten zur IVS-Referenzpunktbestimmung am Raumobservatorium in Onsala. Interner Bericht, GIK, KIT, 45 S.
- 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.
- RICHTER, E.; JURETZKO, M. [2007]: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. AVN 6/2007.
- WOSCHITZ, H. [2005]: Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen. AVN 6/2005, S. 229-244.
- 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 17123-2 [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.
- VDI VDE [2002]: VDI / VDE 2634 Blatt 2: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. www.beuth.de.