

Messunsicherheit, Instrumententests und Kalibrierung – ein 25-jähriger Rückblick auf Beiträge in der avn

Measurement Uncertainty, Instrument Tests and Calibration – A 25-year Retrospective of Contributions in the avn

Michael Möser, Hans Heister, Rudolf Staiger

Dieser Beitrag gibt einen Überblick des geodätischen Fortschritts beim Umgang mit Messunsicherheiten, bei der Durchführung von Instrumentenprüfungen im Labor und im Feld sowie bei der Kalibrierung und Rückführung von Messmitteln. Anhand einer Literaturrecherche von avn-Beiträgen der letzten 25 Jahre und ergänzender Beiträge werden Trends aufgezeigt und bewertet. Dazu gehören u. a. die Anwendung des GUM, Instrumententests außerhalb der Normen, neue Kalibrierkonzepte mit Ringversuchen und seit Kurzem die Rückführung der Messgeräte auf ein Normal.

Schlüsselwörter: Messunsicherheit, Kalibrierung, Instrumentenprüfung, Rückführung

This paper gives an overview of the geodetic progress in dealing with uncertainties, in the implementation of instrument testing in laboratory and in the field as well as in calibration and traceability of measuring means. On the basis of a literature review of avn contributions of the last 25 years and complementary contributions trends are identified and evaluated. These include the application of the GUM, instrument testing outside the standards, new calibration concepts with ring trials and recently the traceability of instruments.

Keywords: Measurement uncertainty, calibration, instrument check, traceability

1 EINLEITUNG

Die Begriffe Messunsicherheit, Instrumententest und Kalibrierung sind eng miteinander verbunden. Die Kalibrierung dürfte dabei als Sonderfall eines Instrumententests gesehen werden. Beiden ist gemeinsam, dass in der Regel ein quantifiziertes Ergebnis, das Prüfergebnis bzw. das Kalibrierergebnis, quantitativ zu bewerten ist.

Die Entwicklung der im Vermessungsbereich eingesetzten Instrumente hat in den letzten Jahrzehnten neben der Automatisierung des Messprozesses eine wesentliche Steigerung der Messgenauigkeit bewirkt. Dies ist neben optischen und mechanischen Neuerungen im Wesentlichen auf

- die Verbesserung der im Messinstrument eingesetzten Sensoren,
- die digitalisierte, vom Bediener unabhängige Ermittlung des Messwerts sowie

- geräteinterne Korrekturen des Messwerts und seine weitere Verarbeitung (Software)

zurückzuführen. Es verbleiben aber weiterhin die Einflüsse z. B. des Messumfelds und der eingesetzten Messverfahren, die die Qualität des Messergebnisses teilweise überwiegend bestimmen.

Deshalb ist es notwendig, sowohl über die korrekte Funktion als auch über repräsentative Genauigkeitsangaben des einzusetzenden Instrumentariums dem Auftraggeber – insbesondere bei größeren Ingenieurbauprojekten – Nachweise vorzulegen. Hierzu reichen in der Regel die von den Herstellern in Prospekten und Gebrauchsanweisungen gemachten quantitativen Angaben nicht aus. Häufig sind sie sogar völlig unbrauchbar, da sie in ihrer Terminologie sowie nach ihrem Ermittlungsverfahren nicht definiert sind: Genauigkeitsangaben des Herstellers, die häufig pauschalisierte Quantifizierungen

sind, können hierbei eine objektive Bewertung der Qualität des Messgeräts für den speziellen Einsatzbereich behindern. Umgekehrt kann auch der Fall eintreten, dass Herstellerangaben die Genauigkeitserwartungen nicht erfüllen. Als standardisierte Genauigkeitsangabe wurde deshalb in den messenden Fachdisziplinen Mitte der 90er-Jahre die Messunsicherheit eingeführt.

Die qualitative Bewertung eines Messinstrumentes führt dazu, dass spezielle Instrumententests, vorrangig auch herstellerunabhängig, durchzuführen sind. Dies kann sowohl einzelne Komponenten des zu untersuchenden Geräts betreffen als auch bei sehr komplexem Messinstrumentarium eben das gesamte System. Häufig sind hierfür von spezialisierten Institutionen besondere Testeinrichtungen entwickelt worden. Nachfolgend wird deshalb vorrangig auch vom Aufbau und den Erfahrungen mit solchen Einrichtungen berichtet.

Überprüfungen von Instrumenten finden aber nicht nur aus den o. a. Gründen statt, sondern sind auch im Rahmen eines betrieblichen Qualitätsmanagementsystems auszuführen. Hierbei steht die Überprüfung der korrekten Funktionalität im Vordergrund. Die Entwicklung von durchgreifenden Routinen, die auch wirtschaftlich durchzuführen sind, steht hierbei im Vordergrund.

Die Kalibrierung eines Messinstrumentes verlangt immer die Rückführung der entsprechenden Messgröße. Bei geodätischen Instrumenten sind dies in der Regel Strecken, Winkel, Neigungen, eventuell auch Koordinaten. Hierzu sind nur spezialisierte Kalibrierlabore in der Lage, die nicht nur über entsprechende Einrichtungen, sondern auch über hierzu qualifiziertes Personal verfügen. Als Hüter der staatlichen Normale wäre es eigentlich eine Obliegenheit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, für geodätische Messeinrichtungen die Rückführung der entsprechenden Messgrößen zu ermöglichen. Leider wurde diese Aufgabe lange Zeit vernachlässigt, nicht zuletzt, weil das Vermessungswesen in den bisherigen Fassungen des Eichgesetzes ausgenommen ist und war.

Durch neue europäische Gesetzgebungen könnte sich jedoch zukünftig für zahlreiche messtechnische Anwendungen eben auch im ingenieurgeodätischen Bereich die Verpflichtung zur Rückführung einer Messgröße wieder ergeben.

2 ZUR MESSUNSICHERHEIT

2.1 Zum Begriff der Messunsicherheit

In der Metrologie wurde in jahrelanger Diskussion um ein gemeinsam akzeptiertes und einheitlich interpretierbares Genauigkeitsmaß gerungen. Das Ergebnis dieses langwierigen und kontrovers geführten Meinungsaustausches, an dem sieben internationale, messtechnisch orientierte Organisationen beteiligt waren, wurde 1995 in dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – oder auch abgekürzt GUM genannt – als ISO-Leitfaden veröffentlicht. Leider war die Geodäsie als messende Disziplin an diesem Prozess nicht beteiligt, was sich insbesondere zunächst an der geringen Akzeptanz zur Einführung, aber auch an den Praktiken zur quantitativen Bestimmung der Messunsicherheit niederschlug. War man doch zu sehr über Jahrzehnte dem Begriff des mittleren Fehlers verbunden!

GNSS garantiert zukunfts- sicher

GNSS UNLIMITED

Modulare Aufrüstbarkeit sichert Ihre Investition bis über das Jahr 2020 hinaus ab.

- RTK Software-Update für BeiDou
- Vorrüstbar für Galileo und BeiDou
- Erweiterbar auf mehr als 500 Kanäle

Somit beginnt im Vermessungswesen die Auseinandersetzung mit einem geeigneten quantitativen Genauigkeitsmaß, das auch den veränderten geodätischen Messprozessen gerecht wird, erst Ende der 1990er-Jahre bzw. zu Beginn des vorigen Jahrzehnts /Schmidt 1997, 2003/, /Heister 2001, 2002/, /Kutterer & Schön 2004/.

Leider vermittelt der Begriff Unsicherheit im üblichen Sprachgebrauch nicht gerade ein Gefühl des Vertrauens. Anders hingegen wird die Verwendung im technisch wissenschaftlichen Bereich interpretiert. Hier wird der Begriff bzw. die quantitative Angabe zur Unsicherheit eines Messergebnisses als zusätzlich notwendige, positive Information gewertet, die einen gewissen Grad des Vertrauens über das Messergebnis beschreibt.

Im o. a. GUM, der auch in deutscher Sprache 1999 als DIN-Leitfaden zur Bestimmung der Unsicherheit beim Messen erschienen ist, wird der Begriff der Messunsicherheit als ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter“ definiert, „der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“.

Dies besagt, dass das Messergebnis nach Korrektur aller bekannten systematischen Einflüsse immer nur ein Schätzwert der Messgröße ist, die mit einer Unsicherheit behaftet ist, die sich aus zufälligen Messabweichungen und unvollkommener Berichtigung des Ergebnisses bezüglich der systematischen Einflussparameter ableitet.

2.2 Ursachen der Messunsicherheit

Was hat sich nun in den geodätischen Messprozessen geändert, dass die altbewährten Schätzverfahren kein zufriedenstellendes repräsentatives Genauigkeitsmaß mehr liefern?

Die Problematik der Bestimmung der Genauigkeit bzw. Messunsicherheit ist demnach eng damit verbunden, dass die unvollständige Kenntnis des Werts einer Messgröße heute nicht mehr ausschließlich daraus resultiert, dass bei einer Messung zufällig streuende Messwerte beobachtet werden. Wäre dies der Fall, dann lieferten uns die bekannten, statistisch begründeten Verfahren ausreichend zuverlässige Genauigkeitsmaße. Vielmehr treten zusätzliche Einflüsse auf, die bei der Ermittlung des Werts der gewünschten Messgröße berücksichtigt werden müssten.

Bei einem Rückblick von 25 Jahren kann man nicht erwarten, dass in den doch praxisbezogenen AVN zu Beginn dieses Zeitintervalls schon Beiträge zu dieser Thematik zu finden sind. Erkennbar ist jedoch, dass mit dem damals bereits vorhandenen Instrumentarium, wie z. B. den GPS-Systemen und elektronischen, motorisierten Totalstationen, Software dominierte, nicht mehr durchschaubare „Blackbox-Koordinaten-Messinstrumente“ zur Verfügung standen. Zum einen konnte diesen Instrumenten eine höhere Präzision (im Sinne der Wiederholgenauigkeit) zugesprochen werden, zum anderen dominierten den Messprozess aber auch zusätzliche oder bisher nicht erkannte systematische Effekte.

Somit beschäftigen sich in den 1990er-Jahren zahlreiche Publikationen mit instrumentellen Untersuchungen zu möglichen systematischen Einflussgrößen, die zunehmend die Qualität einer Messung bestimmen und damit vorrangig die Genauigkeit des Messergebnisses beeinflussen. Hierzu sind z. B. die optische, aber

auch die automatisierte Zielerfassung bei Tachymetermessungen zu nennen, die von /Simicic 1992, 1996/, /Möhlenbrink 1989/, /Gottwald et al. 1998/ eingehend untersucht wurden, oder die bei GPS-Messungen auftretenden Mehrwegeinflüsse, die von /Wanninger & Wildt 1997/ sowie /Heister et al. 1997/ oder auch von /Bilajbegovic & Vieras 2007/ diskutiert wurden. Zahlreiche Untersuchungen sind auch – über den gesamten Zeitraum dieser Berichterstattung – zu den meteorologisch bedingten Einflussgrößen aufzuführen. Hier sind zum einen die Modellierung der troposphärischen Korrektur bei GPS-Messungen zu nennen /Rühmössl et al. 1998/, aber auch die konventionellen geodätischen Messverfahren, wie das Nivellement oder die elektrooptische Distanzmessung, sind Gegenstand zahlreicher Publikationen über die Einflussgröße Refraktion: Hierzu sind u. a. anzuführen die Untersuchungen von /Fasching 1993/, /Bautsch 1994/, /Bryś 1995/, /Hennes 1995/, /Hennes & Flach 1998/, /Casott & Deußen 2000/, /Mozzuchin 2001, 2007, 2010/, /Bryś & Osada 2011/, /Bryś 2012/.

Es ist offensichtlich, dass in der Regel in der Messpraxis solche Einflüsse oft unbekannt sind oder aber auch unzureichend modelliert werden. Sie tragen somit in einem nicht unerheblichen Maß zur Vergrößerung der Messunsicherheit bei. Wegen des Fehlens von statistischen Informationen über diese Einflüsse kann ihr quantitativer Beitrag mithilfe der konventionellen Statistik nicht erfasst werden. Die Kombination und einheitliche Behandlung der unterschiedlichen Komponenten zur Messunsicherheit – hervorgerufen durch zufällige und systematische Messabweichungen – ist somit vorrangiges Ziel des GUM.

2.3 Wie wird die Messunsicherheit bestimmt?

Nach GUM setzt sich die Messunsicherheit grundsätzlich aus mehreren Komponenten zusammen. Dabei unterscheidet man zwei Kategorien:

- A) Komponenten, die mit statistischen Methoden berechnet werden.
- B) Komponenten, die auf andere Weise ermittelt werden.

Die Komponenten der Kategorie A werden durch die empirische Standardabweichung s sowie ihren Freiheitsgrad ν angegeben. Die Berechnungsmethoden hierzu (Fehlerfortpflanzungsgesetz, Methode der kleinsten Quadrate) einschließlich ihrer Zusammenfassung sowie die Berücksichtigung von Korrelationen sind dem Geodäten wohlbekannt. Die auf dieser Basis ermittelte Unsicherheit u_A der Kategorie A entspricht s und wird Standardunsicherheit genannt.

Die Komponenten der Kategorie B werden als Näherungen der entsprechenden Standardabweichungen betrachtet. Sie sind durch Größen u_B zu charakterisieren. Dieses Vorgehen wird bisher bei geodätischen Messverfahren kaum angewendet (siehe auch /Hennes 2007/). Hiermit besteht aber erstmals die Möglichkeit, eine für den Messprozess repräsentative Messunsicherheit abzuschätzen. Dabei sollen alle verfügbaren Informationen – also auch die in langjähriger Messerfahrung erworbenen – über die Streuung einfließen.

Messunsicherheiten der beiden Kategorien, die auf dieser Weise einer Messgröße zuzuordnen sind, können nach dem Unsicherheits-

tenfortpflanzungsgesetz wie Standardabweichungen quadratisch zur kombinierten Standardunsicherheit u_c zusammengefasst werden:

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{An}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{Bm}^2} \quad (1)$$

In der Regel wird eine so ermittelte Genauigkeitsangabe ausreichen, um das Messergebnis in seiner Qualität quantitativ und repräsentativ zu beschreiben. Dort aber, wo eine höhere Sicherheitswahrscheinlichkeit gefordert ist oder auch die Beziehungen zu Toleranzen herzustellen sind, z. B. bei industriellen Anwendungen, ist es vorzuziehen, einen Bereich für die Messunsicherheit festzulegen. Somit gelangt man über die Festlegung eines Erweiterungsfaktors k zur erweiterten Messunsicherheit

$$U_c = k \cdot u_c \quad (2)$$

Häufig wird dabei $k = 2$ gewählt, was zu einem Intervall $\pm U$ (Angabe immer mit Vorzeichen) führt und in statistischer Analogie einen Vertrauensbereich von $\sim 95\%$ Sicherheitswahrscheinlichkeit festlegt.

Die Erfassung und Modellierung aller Einflussgrößen erfordert umfassende Kenntnisse über den Messprozess im Instrument, die Konzeption des Messverfahrens und schließlich über die Auswirkungen des Messumfelds. Da hierzu weitgehend keine Konzepte vorliegen, sind Verfahren zur realistischen Abschätzung der Standardunsicherheiten (vom Typ B) gefordert. In /Hennes 2007/ wird dem Anwender strukturiert eine Übersicht (Abb. 1) möglicher Einflussfaktoren auf das Messergebnis in einem Ishikawa-Diagramm bereitgestellt. Diese Strukturierung ist beispielhaft zu verstehen und kann dann je nach Messaufgabe ergänzt werden.

Dieser kurze Abriss über die Bestimmung der Messunsicherheit sollte ohne Ausbreitung des theoretischen Hintergrunds – der Bayes-Statistik – das Konzept der Messunsicherheit, so wie es im GUM definiert wurde, herausstellen. Dabei sollte der Paradigmenwechsel deutlich werden, der darin besteht, dass nicht nur zufällige, normalverteilte Messabweichungen, sondern auch unbekannte, nur durch die Messerfahrung quantifizierbare systematische Abweichungen, in das Genauigkeitsmaß Messunsicherheit einzubringen sind.

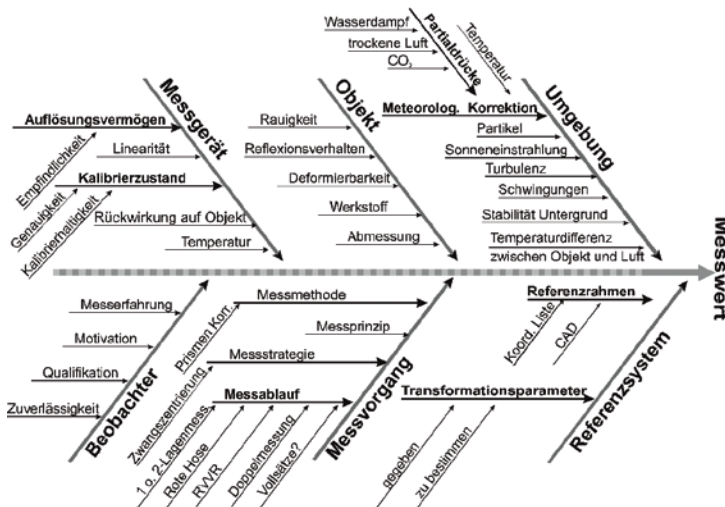


Abb. 1 | In einem Ishikawa-Diagramm strukturierte Darstellung von Einflussgrößen auf geodätische Messungen /Hennes 2007/

2.4 Die Einführung des Genauigkeitsmaßes „Messunsicherheit“ in der Geodäsie

Hat sich der GUM bereits in den anderen messtechnisch orientierten Disziplinen weitgehend durchsetzen können, so ist im Bereich des Vermessungswesens und der Geodäsie seine Akzeptanz und Einführung zur Angabe von Genauigkeiten nur ansatzweise zu beobachten (DIN 18710, DIN 1319), obwohl bereits in den 1990er-Jahren immer wieder kritische Beiträge zum Begriff Genauigkeit zu verfolgen sind /Schnädelbach 1989/, /Wenderlein 1989, 1990, 1996/. Erste Beiträge, die sich mit den neuen Genauigkeitsbegriffen der Messunsicherheit auseinandersetzen, sind in der Geodäsie erst nach 2000 zu beobachten. Hier können insbesondere die Arbeiten von /Heister 2001/ und /Hennes 2007/ hervorgehoben werden, wo zum einen die Einführung des GUM in die vermessungstechnische Praxis an typischen Beispielen erläutert wird; zum anderen werden aber auch Genauigkeitsangaben aus Ausgleichsprozessen, der klassischen Vorgehensweise in der Geodäsie, zu den in anderen Fachdisziplinen eingeführten Genauigkeitsangaben, insbesondere eben der Messunsicherheit, kritisch gegenübergestellt. Weitere Beiträge, die sich mit dem Begriff und mit der Anwendung der Messunsicherheit beschäftigen, zeigen in dem hier betrachteten Fachgebiet weitgehend noch ein heterogenes Bild. So leitet /Schulz 2003/ Messunsicherheiten für Kranbahnen aus den vorgegebenen Herstellertoleranzen ab. Immerhin wurde hier ein Vorschlag unterbreitet, aus einem durch mögliche Messabweichungen verursachten Intervall, der Messtoleranz, auf eine anzustrebende empirische Standardabweichung, eine Messunsicherheit vom Typ A, zu schließen. Eine weitgehend GUM-konforme Anwendung für geodätische Distanzmessungen ist den Arbeiten von /Neumann 2012/ zu entnehmen. Hier werden die Einflussgrößen auf eine Streckenmessung realistisch quantifiziert und in einem Unsicherheitenbudget zusammengestellt. Die hierbei aufgeführten Standardunsicherheiten vom Typ A und Typ B können dann zur Angabe einer realistischen Messunsicherheit der entsprechenden Distanz nach Gl. (2) zusammengefasst werden. Eine sehr umfassende Zusammenstellung von Einflussgrößen für Distanzmessungen im Sinne einer Anwendung des GUM ist auch in /Schwarz 2012/ zu finden. Dabei werden die Einflussparameter nicht nur qualitativ beschrieben, sondern auch die quantitative Modellierung theoretisch sowie praktisch ausführlich dargestellt.

Insgesamt gestaltet sich die Einführung des Begriffs, aber auch die Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit in der Geodäsie noch immer sehr zögerlich. Dies ist sowohl im Vermessungsalltag als auch an der Diskussion (Veröffentlichungen) in den einschlägigen Fachzeitschriften zu beobachten. Die Überarbeitung der ISO-Normenreihe 17123, in welcher für die unterschiedlichen geodätischen Messinstrumente Prüfverfahren entwickelt wurden, werden zukünftig Unsicherheitenbudgets für die entsprechenden Messgrößen beispielhaft zusammengestellt. Insbesondere wurden dabei im Teil 1 (Theorie) die theoretischen Grundlagen des GUM für die Anwendung in der geodätischen Praxis aufbereitet.

3 ÜBERPRÜFUNG UND TEST GEODÄTISCHER INSTRUMENTE

Die Entwicklung im geodätischen Instrumentenbau während der letzten 25 Jahre ist geprägt von den enormen Fortschritten der Halbleitertechnik, insbesondere der Sensorik. Generell ist festzustellen:

Für alle geodätischen Messsysteme wurde die Produktivität signifikant gesteigert: Die Messungen sind automatisierter, schneller und genauer geworden; gleichzeitig sind sie weitreichender und einfacher auszuführen als früher. Trotz der Produktivitätssteigerungen und erweiterten Funktionalitäten gelingt es den Instrumentenherstellern, heute Systeme anzubieten, die kompakter, leichter und mit viel umfangreicherer Mess- und Auswertesoftware ausgestattet sind als vor 25 Jahren.

Zusätzlich wurde die Funktionalität der Instrumente, insbesondere der Tachymeter, deutlich erweitert: Zu nennen sind: Automatische Zielerfassung und -verfolgung, reflektorlose Streckenmessung, fern- und programmgesteuerte Messabläufe, die Videotachymetrie und nicht zuletzt die geräte- und messtechnische Fusion mit GNSS-Empfängern.

Basierend auf neuartigen Technologien kamen neue Messsysteme auf den Markt. Dies sind: Digitalnivelliere, GPS-Empfänger (heute GNSS-Empfänger genannt), Handstreckenmesser, Lasertracker und Laserscanner, die schon jetzt als Standardmesswerkzeuge des Geodäten gelten.

Mit der Modernisierung der Instrumente ging auch ein starker Wandel bei der täglichen Messarbeit einher. Früher war der Beobachter direkt am Messprozess beteiligt: Die rohen Einzelmesswerte waren direkt zugänglich und aufgrund der Imperfektion der Messgeräte wurde durchgängig wiederholt und überbestimmt beobachtet. Im Vergleich dazu stellt das heutige Messgerät eine leistungsfähige Blackbox dar, die Endergebnisse ausgibt, welche aus aufwendigen Mess- und Auswerteprozessen (einschließlich zahlreicher Korrekturen) resultieren. Gleichzeitig mutiert der Beobachter aufgrund der weitgehenden Automatisierung zum Nutzer, der nur noch mittelbar am Messprozess beteiligt ist. Die schnelle und automatisierte Messung sowie die hohen Auflösungen und Reproduzierbarkeiten verleiten den Bediener zur Annahme: „Meine Ergebnisse sind richtig“. Eine Kontrolle, z. B. durch eine überbestimmte Messungsanordnung, wird oft für überflüssig und Zeitverschwendung erachtet.

Eine erhöhte Produktivität und verbesserte Messgenauigkeiten machen jedoch Instrumentenprüfungen keineswegs überflüssig. Im Gegenteil:

- Wird im Gegensatz zu früher vermehrt ohne Kontrollen gemessen, erhöht sich die Bedeutung und Wichtigkeit regelmäßiger Instrumentenprüfungen und Kalibrierungen.
- Neue Messtechnologien, wie Digitalnivelliere oder zielsuchenden Tachymeter, weisen nicht nur neue Stärken auf, sondern bergen auch das grundsätzliche Risiko neuer, systembedingter Schwächen, die aufgrund des Technologiewechsels vorher nicht bekannt waren.
- Bei zunehmender Komplexität der Messtechnik und fehlender Transparenz bei der Messwertgewinnung sind für den Nutzer regelmäßige Instrumentenprüfungen ein Baustein zur Sicherstellung der „Prozesssicherheit“.

Die avn haben sich schon immer den Themen Instrumentenprüfung und Kalibrierung intensiv gewidmet, was alleine schon an der Vielzahl der Veröffentlichungen sichtbar wird. Die mehr als 120 Publikationen, welche in den letzten 25 Jahren in den avn dazu publiziert wurden, können daher auch nur exemplarisch und im Sinne eines Überblicks zitiert und diskutiert werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass für das Laserscanning ein eigener Beitrag geplant ist, weshalb diese Technologie hier keine weitere Erwähnung findet.

3.1 Instrumentenuntersuchungen und Prüfverfahren

Die generellen Neuerungen und Veränderungen im geodätischen Instrumentenbau und den damit verbunden Prüf- und Kalibrier-techniken spiegeln sich thematisch in mehreren Artikeln wider. /Staiger 1998/ beschreibt allgemein die Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente und gibt anschauliche und konkrete Beispiele. Mit dem Erscheinen der motorisierten Tachymeter wird die Bestimmung ihrer Leistungsfähigkeit ein neues und interessierendes Thema /Hennes 1999/, /Stempfhuber & Kirschner 2008/. Völlig berechtigt stellen sich neue Fragen, z. B. nach möglichen Stativbewegungen, induziert durch die motorischen Bewegungen des Tachymeters /Depenthal 2004/.

Feldprüfverfahren, das sind Prüfmethode, die von jedem Nutzer mit mäßigem Aufwand, ohne Labor und ohne spezielles Zubehör durchgeführt werden können, sind der Wunsch eines jeden Praktikers /Fischer 1998/. Die Normenfamilie ISO 17123 widmet sich der Feldprüfung geodätischer Instrumente /Gottwald & Rüger 2000/, /Hennes 2006/. Auch wenn das Nivellieren ein Messverfahren mit jahrhundertelanger Tradition ist, sind noch nicht alle Fragen, z. B. hinsichtlich der Untersuchung und Justierung der Ziellinie, endgültig gelöst /Neitzel & Petrovic 2004/.

3.1.1 Nivellierinstrumente

1990 stellte Wild mit dem NA 2000 das erste Kompensatornivellier mit Zeilenkamera zur automatisierten Erfassung und Auswertung einer Nivellierlatte mit proprietärem Barcodemuster vor und nannte es Digitalnivellier. Die damalige Weltneuheit wird heute von allen Herstellern in verschiedenen Genauigkeitsklassen angeboten. Digitalnivelliere wurden verschiedentlich untersucht, z. B. /Blum 1991/, /Staiger 2002/. Des Weiteren wurde die Eignung von Digitalnivellieren für Überwachungsmessungen thematisiert /Wehmann et al. 2009/ und das digitale mit dem analogen Nivellement verglichen /Rozic et al. 2008/. Auch wenn die vergangenen zwei Jahrzehnte durch das digitale Nivellement thematisch dominiert wurden, gab es auch Veröffentlichungen über optische Präzisionsnivelliere, wie das Zeiss Ni 002A /Feist 1994/ oder allgemeine Abhandlungen, z. B. zur Bestimmung des Aufsetzflächenfehlers bei Präzisionsnivellierlatten /Jelinek 1990/.

Die Technologie und Instrumentierung des digitalen Nivellements wurde in den letzten Jahren leider nicht weiterentwickelt. Mutmaßlich weist dieses Produktsegment aus Sicht der Hersteller ein zu geringes Marktpotential auf, um weiterentwickelt zu werden. Denn technologisch sind die Hersteller heute zweifellos in der Lage, ein

wirklich vollautomatisches Nivelliersystem (inkl. Horizontierung, Ziel-suche, Fokussierung, usw.) zu entwickeln.

3.1.2 Elektronische Distanzmesser

Elektronische Distanzmessung findet sich heute in jedem Tachymeter, aber nicht mehr in eigenständigen Instrumenten, den sog. EDM-Geräten. /Köhler 2012/ gibt einen sehr informativen Einblick in die aktuellen Messverfahren der Trimble-Distanzmesmodule. Von großem Interesse war in den letzten Jahren die reflektorlose Streckenmessung: Untersucht wurden dazu das Messverhalten an Kanten /Richter & Juretzko 2007/ und an strukturierten Oberflächen /Meier-Hirmer & Meier-Hirmer 1996/. /Schäfer 2011/ simulierte die Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. Die reflektorlose EDM-Technologie Direct Reflex von Trimble beschreiben /Höglund & Large 2004/.

3.1.3 Tachymeter

Eine große Zahl von Publikationen in den avn ist dem Tachymeter gewidmet. Sie lassen sich grob in Produktvorstellungen, Genauigkeitsuntersuchungen und Praxistests unterteilen. /Meisenheimer 1992/ hat sich in den 1990er-Jahren bei der Prüfung unterschiedlicher Tachymeter verdient gemacht und seine Ergebnisse in acht Beiträgen veröffentlicht. Daneben werden spezielle Aspekte der Distanzmessung und automatischen Zielerfassung im Nahbereich untersucht und erörtert /Gottwald et al. 1998/. Die Vorstellung neuer Tachymeter nahm ebenfalls einen breiten Raum ein, z. B. /Knoblach 2011/, /Köhler 2006/, /Schmidt & Möser 2005/.

3.1.4 Optische Koordinatenmesstechnik im Nahbereich

Theodolitmesssysteme (Thms) – darunter werden mind. zwei elektronische Theodolite, verbunden mit einem PC, verstanden – waren die ersten optischen, mobilen Koordinatenmesssysteme. Ihre Vorteile, z. B. gegenüber taktilen Koordinatenmessgeräten, bestehen in der berührungslosen Messtechnik, dem großen Messvolumen und vor allem in der Mobilität des Messsystems (die Prüfeinrichtung „kommt“ zum Prüfling und nicht umgekehrt). /Schirmer 1993/ gibt einen praktischen Erfahrungsbericht, /Staiger 1993/ beschreibt die Nutzung motorisierter Theodolitmesssysteme im Automobilbau und /Möser et al. 1997/ stellen das neue Theodolitmesssystem Axyz vor.

In der Folge wurden die Thms durch Lasertracker ersetzt. Dieser Verdrängungsprozess begann vor 20 Jahren und ist seit ca. zehn Jahren abgeschlossen, d. h. die Theodolitmesssysteme sind gänzlich vom Markt verschwunden. Lasertracker haben gegenüber den Thms den großen Vorteil, dass eine polare Messstation ausreicht und folglich die Orientierungsmessung zwischen den Theodoliten sowie die Einhaltung geometrischer Schnittbedingungen gänzlich wegfallen. Damit werden auch die Anforderungen an die Sichtbarkeit der Objektpunkte viel geringer als für Thms. /Bernhart & Hennes 2012/ befassten sich mit der Leistungsfähigkeit eines 160°-Reflektors in Kombination mit einem Lasertracker, und auch der neue Lasertracker LTD 800 von Leica wurde vorgestellt und beschrieben /Möser et al. 2007/. Unter Laserradar wird eine Distanzmessung durch Frequenzmodulation verstanden. /Naab & Hennes 2012/ beschrei-

ben eine reflektorlose Variante für hochgenaue Anwendungen im Nahbereich.

3.2 Andere Technologien

Das Indoor-Positionsbestimmungssystem iGPS war Gegenstand mehrerer Veröffentlichungen, z. B. in /Müller & Schwendemann 2009/. /Depenthal 2012/ befasste sich mit den kinematischen Fähigkeiten von iGPS. LaserTracer ist der Produktname für ein hochgenaues 3D-Bogenschnittverfahren mittels Laserinterferometrie. Damit ist z. B. die kinematische Kalibrierung von 5-Achs-Werkzeugmaschinen möglich /Schmitt et al. 2009/. /Kahlmann & Ingensand 2009/ geben einen informativen Überblick zur „Range Imaging Metrology“. Dazu gehören auch PMD-Kameras. /Ringbeck & Hagenbeucker 2007/ behandeln die dreidimensionale Objekterfassung in Echtzeit mit Videoframeraten.

4 KALIBRIERUNG UND RÜCKFÜHRUNG GEODÄTISCHER MESSGRÖSSEN

Bei jedem Messgerät treten systematische Unterschiede zwischen der Anzeige und dem wahren Wert auf. Der „richtige Wert“ der Messgröße wird durch ein Normal gegeben, womit das zu kalibrierende Gerät verglichen wird. Dies ist zunächst ein Gebrauchsnorm, das mit einem Bezugsnorm verglichen wird. Dieses Bezugsnorm ist wiederum an eine Messeinrichtung angeschlossen, mit der die jeweilige Maßeinheit gemäß der Definition im Internationalen Einheitensystem (SI) mit der kleinstmöglichen Messunsicherheit realisiert ist. Wie viele Zwischenstufen bei den Normalen möglich sind, hängt von der Messunsicherheit ab. Dieser gesamte Vorgang wird als Rückführung bezeichnet /Fay 2001/.

4.1 Begriffe

Mit der DIN EN ISO 9000 wird ein Regelwerk mit internationalen Normen und Standards für die Qualität von Produkten und Dienstleistungen seit Ende der 1990er-Jahre auch in der Geodäsie angewandt. In diesen Normen werden Leitlinien für ein Qualitätsmanagement sowie Qualitätsmanagementsysteme beschrieben /Kutterer 2010/. Das Qualitätsmanagement hat im Dienstleistungsbereich eine besondere Bedeutung und beinhaltet: die erforderliche Qualität erkennen, die erforderlichen Maßnahmen planen, steuern und verfolgen. Für die Qualitätssicherung der Dienstleistung „Vermessung“ wird die Qualitätskontrolle durch ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem (QMS) ersetzt. In der DIN EN ISO 9001 wird hingewiesen, dass alle Prüfmittel in vorgegebenen Intervallen zu kalibrieren sind – und zwar mit zertifizierten Mitteln, die in bekannter Weise an Normale angeschlossen sind. Weiterhin regelt die DIN EN ISO 9004, dass innerhalb des QMS eines Vermessungsbüros auch die Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung festzulegen sind.

Nach DIN 1319 versteht man unter Kalibrieren das Überprüfen von Messgeräten und die Bestimmung der Abweichungen vom

Sollwert bzw. die Einhaltung von Fehlergrenzen. Die Kalibrierung umfasst Maßnahmen, die eine Beziehung zwischen den ausgegebenen Werten (Ablesung) eines Messmittels, Messsystems oder Referenzmaterials und den entsprechenden Größen (bekannte Werte der Messgröße unter bekannten Bedingungen) des Messstandards herstellen. Bekannte Soll-Werte erhält man aus einem Normal höherer Ordnung oder aus geometrischen Restriktionen. Beim Kalibrieren erfolgt kein Eingriff in und keine Veränderung am Messgerät, jedoch besteht die Möglichkeit, durch Anbringen von Korrekturwerten die Abweichungen zu eliminieren.

Bei der Kalibrierung des Arbeitsnormals wird das Messergebnis oder der Wert des Normals durch eine „ununterbrochene Kette“ von Vergleichsmessungen mit angegebenen Messunsicherheiten auf internationale oder nationale Normale bezogen (rückgeführt). Ein Beispiel ist der Anschluss an das metrische Längennormal, das durch Messung zu Sollstrecken und der daraus berechneten Nullpunktkorrektur und Maßstabsabweichung hergestellt wird. Diese Sollstrecken sind mit einem sehr genauen Referenz-EDM gemessen, das mit einem interferometrischen Längenmesssystem bei der PTB in Braunschweig kalibriert wurde.

4.2 Kalibrierkonzepte

Das Ziel einer Kalibrierung ist ein Genauigkeitsnachweis. Es gibt hierfür verschiedene Ansätze. Bei der „klassischen“ Komponentenkalibrierung werden einzelne Sensoren (z. B. Distanzmessteil, Kompensator, GNSS-Antenne) untersucht. Voraussetzung dafür ist, dass die Komponenten unabhängig voneinander arbeiten. Im Gegensatz dazu wird bei der Systemkalibrierung das gesamte Messsystem (Tachymeter und Reflektor /Hennes & Ingensand 2000/, Nivellierausrüstung /Heister 1994/, /Brunner & Woschitz 2001/) inklusive aller meteorologischer Sensoren betrachtet und das Ergebnis mit bekannten Sollgrößen (Koordinaten) verglichen. Dabei sind Kenntnisse über die gegenseitigen Abhängigkeiten im Messprozess notwendig. Nach /Hennes 2010/ wird bei der elektrooptischen Distanzmessung nicht das Messmittel „EDM“ kalibriert, sondern der gesamte Messprozess kann Komponenten- und Systemkalibrierungen enthalten, was letztendlich zu einer Prozesskalibrierung führt.

Bei geodätischen Messgeräten wird häufig auch eine Selbstkalibrierung (zwei Fernrohrlagen) ohne Referenz und Kalibrier- vorrichtung, die in den Messprozess integriert ist, durchgeführt. Das Ziel einer Simultankalibrierung ist die Untersuchung von mindestens zwei Systemen gleichzeitig, meistens ohne Referenz (Kammer- und Testfeldkalibrierung mit Bündelblockausgleichung).

In der Ingenieurgeodäsie ist häufig die Rückführung gefordert. Die Kalibrierung orientiert sich an den Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente nach ISO 17123 und DIN 18723. In der Industriemesstechnik wird eine Rückführung meist auf mechanische Lehren realisiert /Hennes 2012/. In der VDI/VDE-Richtlinie 2617 für optische Systeme in der Fertigungstechnik sind Kenngrößen für die Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten festgelegt und Verfahren zur Annahme- und Bestätigungsprüfung von Lasertrackern beschrieben (Kap. 4.6).

4.3 Komparatoren für Präzisionsnivellierlatten

Um die Genauigkeitsanforderungen von Präzisionsnivellierlatten einzuhalten, sind die Präzisionsnivellierlatten zu kalibrieren, wobei eine wesentliche Aufgabe die Bestimmung des Maßstabs (mittleres Lattenmeter) ist. Bei Präzisionsnivellierlatten mit Strichteilung („Strichkalibrierung“) können die Latten je nach Aufbau des Komparators vertikal in Gebrauchslage (Abb. 2) oder in horizontaler Lage (Abb. 3) geprüft werden. Bei Invar-Code-Latten für Digitalnivelliere sind die geometrischen Eigenschaften der Codestruktur zu untersuchen. Dabei geht es um die Prüfung der Fertigungstoleranz des Codes /Heister 1994/, /Schwarz 2005/.



Abb. 2 | Vertikalkomparator TU Graz /Schwarz 2005/

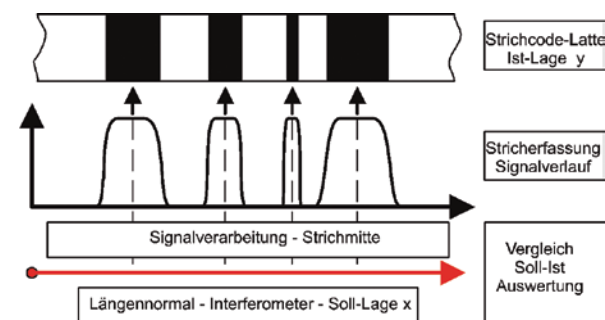


Abb. 3 | Prinzip der horizontalen Lattenkalibrierung /Heister et al. 2005/

Mit der Entwicklung der Lasertechnik stand erstmals eine kohärente und monochromatische Lichtquelle zur Verfügung, die als direktes Sekundäretalon in der Metrologie benutzt werden konnte. Mitte der 1970er-Jahre konnten damit auch in den geodätischen Prüf- und Kalibrierlaboren Laserinterferenzkomparatoren für die automatische Kalibrierung von Längenmessgeräten und Nivellierlatten eingesetzt werden /Schlemmer 2005/. Zur Anwendung kommen bei den Komparatoren als Prüfnormale Zweifrequenz He-Ne-Laserinterferometer. Die Kalibrierung sollte in einem klimatisierten Messlabor (Temperatur $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, Luftfeuchtigkeit $50\% \pm 10\%$) erfolgen.

Bei Präzisionsinvarlatten mit metrischer Teilung führten der Lattenmaßstab und die Höhenverbesserung zur Lattenkalibrierung mittels eines photoelektrischen Mikroskops. Dieses Verfahren ermöglicht nur eine Rückführung konventioneller Nivellierlatten,

da die metrische Teilung die Maßverkörperung darstellt. Bei Invar-Code-Latten werden die Ablagen eines Code-Elements zu seiner Soll-Lage, die durch den theoretischen Code des Herstellers festgelegt wurde, mittels CCD-Sensor bestimmt (Abb. 4).

Das Verfahren macht deutlich, dass es sich nur auf die Komponente Latte bezieht und das Messgerät Nivellier nicht einschließt. Bei der Code-Latte ist die Zuordnung eines metrischen Werts (hier die Messgröße Höhe) ohne die Zuordnung zu einem CCD-Sensor nicht möglich. Somit führt die Einbeziehung des Digitalnivelliers in den Kalibrierprozess der Code-Latte zur Systemkalibrierung (Abb. 5). Dabei werden die Differenzen der „Lattenablesungen“ mit einem Längennormal (Interferometer) direkt verglichen /Heister 1994/, /Heister et al. 2005/. Diese Kalibrierung führt zu Aussagen über die Messunsicherheit des digitalen Nivelliersystems und den Maßstab der Code-Latte /Heister 2002/. Die Lattenkalibrierung hat ihre Vorteile in der Prüfung von Herstellungstoleranzen nach DIN 18717. Die Systemkalibrierung liefert die Qualität der Höhenwerte und die Rückführung auf das Vergleichsnormal „Länge“.

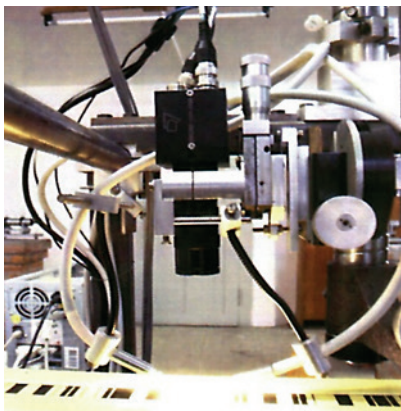


Abb. 4 | Nivellierlattenkomparator mit CCD-Kamera TU Dresden

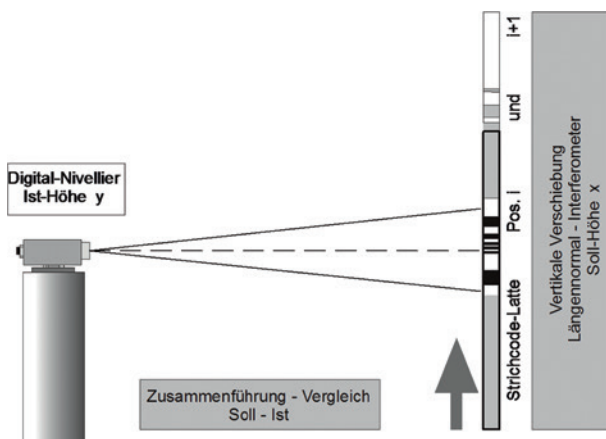


Abb. 5 | Prinzip der Systemkalibrierung /Heister et al. 2005/

4.4 Kalibrierbasis für EDM

Die Prüfung und Kalibrierung eines EDM enthält die Frequenzprüfung, die Bestimmung des Auflösungsvermögens, des zyklischen Phasenfehlers, der Phasenhomogenität und der Nullpunktkorrektur /Joeckel et al. 2008/. Für den Maßstab sind Eich- oder Prüf Strecken

GNSS garantiert zukunfts- sicher

GNSS UNLIMITED

Modulare Aufrüstbarkeit sichert Ihre Investition bis über das Jahr 2020 hinaus ab.

- RTK Software-Update für BeiDou
- Vorrüstbar für Galileo und BeiDou
- Erweiterbar auf mehr als 500 Kanäle

bzw. eine Kalibrierbasis (Abb. 6) mit übergeordneter Genauigkeit anzulegen, deren Längen über den gesamten Messbereich des EDM verteilt sind. Mit diesen Soll-Strecken muss sichergestellt werden, dass die Kalibrierbasis auf ein Standardnormal zurückgeführt wurde.

Für Feldverfahren ohne spezielle Laborvorrichtungen werden EDM nach ISO 17123, Teil 4 mit einem vereinfachten Testverfahren mit vier Soll-Strecken oder einem vollständigen Testverfahren mit einer Konfiguration aus einer Linie ohne Sollstrecken, sechs Teilstrecken und sieben Punkten überprüft. Mit dieser Norm besteht nicht die Absicht, einzelne Fehlerkomponenten zu kalibrieren, sondern die summarische Überprüfung des Tachymeters für den Einsatz bei einer speziellen Messaufgabe unter Feldbedingungen einschließlich meteorologischer Effekte vorzunehmen. Im Sinne einer Systemkalibrierung sind auch die Prüfungen von Robottachymetern zu verstehen. Mit der automatischen Zielerfassung, Zielverfolgung und einem 360°-Prisma ist die Positionsgenauigkeit ein Maß für die Abweichung einer berechneten Position zur Sollposition. Geprüft werden u.a. die Ziellinienabweichung bei ATR und die rotativen Direktantriebe für die Richtungsmessung /Depenthal 2006/. Für die Prüfung dieser kinematischen Sensorsysteme wurde am Geodätischen Institut des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn entwickelt (Abb. 7), mit der u.a. die Zeitverzögerung zwischen Richtungs- und Distanzmessung bei polaren Messsystemen untersucht werden kann. Die Prüfung zielverfolgender Sensoren (u.a. iGPS) kann auch mit einem zeitreferenzierten Dreharm erfolgen, dessen Stabilität und Rotationsgenauigkeit mit einem Lasertracker überprüft wird /Depenthal & Barth 2007/.

Die Kalibrierung von Längenmessmitteln und -geräten im Nahbereich bis 50 m, u.a. Messbänder, Strichmaßstäbe, EDM, Laserinterferometer, wird in der PTB in einem klimatisierten Messraum mit einem Laserinterferometer (Abb. 8) unter Berücksichtigung der Brechzahl der Luft, Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur durch die Rückführung der Länge durchgeführt /Meiners-Hagen & Pollinger 2012/.



Abb. 8 | Längenkomparator PTB /Meiners-Hagen & Pollinger 2012/



Abb. 6 | Kalibrierbasis UniBw München /Heister 2012/



Abb. 7 | Hochgeschwindigkeitsmessbahn KIT /Hennes 2006/

4.5 Antennenkalibrierung

Mit einer Antennenkalibrierung wird der Bezugspunkt – das mittlere Antennenphasenzentrum (APZ) – der Trägerphasenmessung bestimmt. Dabei wird unterschieden in Feldverfahren und Laborverfahren bzw. in die relative und absolute Bestimmung der Antennenparameter. Bei der relativen Feldkalibrierung wird eine koordinatenmäßig bekannte Basislinie in einem Testfeld beobachtet. Das Verfahren wird in Gebrauchslage durchgeführt, benötigt eine Referenzstation und ist abhängig von der Satellitenkonstellation. Liegen für die Referenzstation absolute Kalibrierwerte vor, können für den Prüfling ebenfalls absolute Kalibrierwerte berechnet werden.

Beim absoluten Feldverfahren wird eine Basislinie beobachtet. Mit einem Roboter wird der Prüfling um das genäherte Phasenzentrum gedreht. Damit können Antennenkalibrierwerte und die stationsabhängigen Fehlerkomponenten (z.B. Mehrwegeeffekte) getrennt und letztere eliminiert werden.

Absolute Parameter erhält man auch in einem mikrowellentoten Labor (Uni Bonn) bei der sogenannten Laborkalibrierung. Die Antenne wird auf eine Vorrichtung montiert und gegenüber einem Sender, der bereits vorhandene sowie auch geplante Frequenzen der GNSS erzeugt, gedreht und verschwenkt /Görres 2009/.

Aus der Positionsänderung bezüglich der Ausgangslage kann das mittlere APZ abgeleitet werden. Auch bei GNSS sollte nicht nur die Komponente Antenne für die Kalibrierung betrachtet werden, sondern Hardware und Software sind in einem Feldprüfverfahren zu integrieren. Zur Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind Abweichungen zu Sollkoordinaten einzuhalten /Heister 2006/.

4.6 Kalibrierung im Maschinenbau

Werkzeugmaschinen werden grundsätzlich mit Laserinterferometern und Koordinatenmessgeräten (KMG) mit geometrischen Normalen kalibriert. Bei der Kalibrierung von KMG kommen präzise gefertigte Probekörper, z. B. Kugeln, zum Einsatz, die durch Verbindungselemente aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff zu einem Stab verbunden werden. Diese Kugelstäbe werden auf dem KMG aufgestellt und die Position der Kugeln durch einen Taster gemessen /Schmitt et al. 2008/. Ein neues Verfahren basiert auf dem Einsatz eines Lasertracers und einem Laserinterferometer, das einem maschinengeführten Reflektor folgt. Der Lasertracer unterscheidet sich vom Lasertracker durch ein hochpräzises optisches Zentrum mit einer Positionsunsicherheit $< 0,3 \text{ mm}$. Im Gegensatz zum Lasertracker (Koordinatenmessung) wird nur eine Längenänderung gemessen /Schmitt et al. 2009/.

Lasertracker werden als Mess- und Prüfgeräte eingesetzt. In der Richtlinie VDI/VDE 2617 (2011) sind Kenngrößen für die Genauigkeit von KMG festgelegt und Verfahren zur Prüfung beschrieben (Abb. 9).

Bei dem in der Industrie geforderten Qualitätsstandard muss der Bediener sicher sein, dass der Lasertracker die maximal zulässige Messabweichung garantiert. Dies kann nur durch vergleichbare Annahmekriterien und eine regelmäßige Überwachung gewährleistet werden. Die genannte Richtlinie enthält im Blatt 10 neben Annahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von Lasertrackern auch die Anforderungen an die Prüfkörper (Kugeln aus Keramik oder Stahl) und Prüfmittel (Referenzlängen). Es werden u. a. die Kenngrößen Antastabweichung und Längenmessabweichung definiert, deren Grenzwerte die Annahme eines Lasertrackers vom Hersteller und die Überwachung vom Nutzer festlegen.

Für die Kalibrierung wird ein Messvolumen von $10\,000 \text{ mm} \times 6\,000 \text{ mm} \times 3\,000 \text{ mm}$ (Länge, Breite, Höhe) für Messlinien mit einem Standpunkt empfohlen (Abb. 10). Die Ermittlung der Längenmessabweichung erfolgt stichprobenartig entlang acht unterschiedlicher Messlinien. In jeder Messlinie sind mindestens drei unterschiedliche Prüflängen zu messen /Möser et al. 2012/.

4.7 Ringversuche

Ringversuche bzw. -vergleiche dienen dem objektiven Nachweis der Leistungsfähigkeit von Prüflaboratorien, indem Messmittel, Objekte und Verfahren ausgetauscht werden. Sie dienen auch zur Kalibrierung geodätischer Messmittel, wenn die amtlichen Prüfstel-

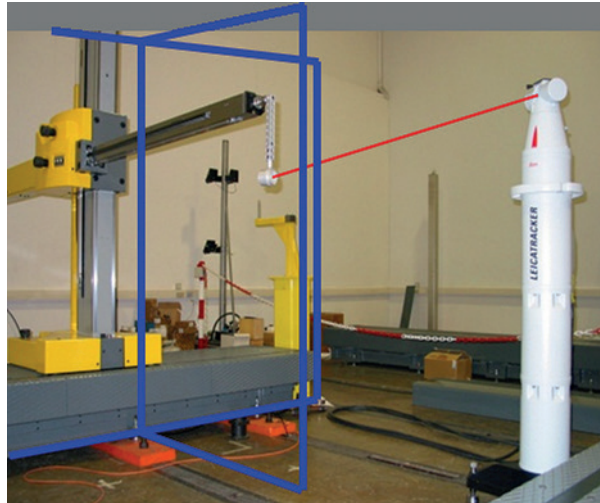


Abb. 9 | Kalibrierung großer KMG mit Lasertracker

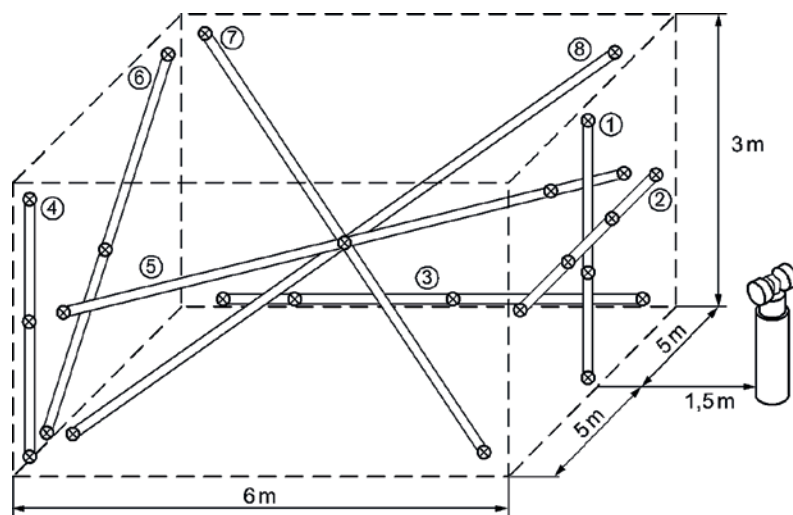


Abb. 10 | Messlinien zur Kalibrierung von Lasertrackern /VDI/VDE 2617/

len der PTB und die des Deutschen Kalibrierdienstes über keine speziellen Prüfeinrichtungen verfügen und somit die Rückführung auf amtliche Normale schwierig wird /Schauerte & Heister 2005/. Mit der Planung und Organisation von Ringversuchen für Kalibrieranlagen befasst sich die 2005 gegründete Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel e. V. (GKGM, www.gkgm.de) /Hennes 2012/.

In den Jahren 2003/2004 wurde der erste Ringversuch „Nivellierlattenkalibrierung“ durchgeführt. Dabei wurden Prüflinge, Invar-Codelatten der Hersteller Leica Geosystems, Zeiss bzw. Trimble in einem kurzen Zeitraum auf fünf Komparatoren untersucht, um Kenndaten für die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der unterschiedlichen Kalibrierverfahren zu gewinnen /Schauerte & Heister 2005/. Im Ergebnis wurden Maßstabsbestimmungen und die Überprüfung der Teilungsgenauigkeit mit einer Messunsicherheit $< 2 \text{ ppm}$ durchgeführt. Dabei konnten keine eindeutigen Unterschiede in der Maßstabsbestimmung bei horizontaler oder vertikaler Prüflage festgestellt werden. Dies gilt auch für den Vergleich der System- und Lattenkalibrierung. Hier können jedoch typen- und entfernungsabhängige Einflüsse zu signifikanten Differenzen führen.

In den Jahren 2009 bis 2011 beteiligten sich sieben Institutionen an einem Ringversuch zur Bestimmung von Sollstrecken der neuen Kalibrierbasis der UniBw München. Die Messungen erfolgten u. a. mit dem Mekometer 5000, Lasertracker Leica AT901-LR, Tachymeter Leica TCA 1800 und TS 30 sowie GNSS mit eigener Ausrüstung und Personal /Heunecke 2012/. Auf der 1 100 m langen Kalibrierbasis (Abb. 6) stehen sieben Pfeiler auf 590 m nach den Kriterien von Schwendener zur Verfügung /Heister 2012/. Diese neue Prüf-strecke ist für die Kalibrierung von EDM, Tachymeter, GNSS und für nordsuchende Kreiselltheodolite vorgesehen. Für die Gesamtlänge der Basis wurde eine erweiterte Messunsicherheit von $\pm 0,2$ ppm erreicht. Abschließend erfolgt noch der Abgleich der Ergebnisse mit der PTB auf das Standardnormal „Meter“.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG

Der unaufhaltsame Trend zu automatisierten, Mikroprozessor-gesteuerten Messgeräten bis hin zur vollautomatischen „Black-box“ und der vermehrte Einsatz dieser Multi-Sensor-Systeme auch durch den Vermessungsingenieur in der Praxis verlangt nach neuen strukturierten Methoden zum Überprüfen, Testen und Kalibrieren dieser Messsysteme, um weiterhin den traditionellen Zielen nach zuverlässigen und genauen Messergebnissen gerecht zu werden. Dies gewinnt deshalb an Bedeutung, da zunehmend zur Durchführung der eigentlichen Messung vor Ort auch weniger qualifiziertes – zuweilen fachfremdes – Personal eingesetzt wird. Bewährte Prüfmethode erfüllen in den meisten Fällen kaum noch die Anforderungen, modernes Instrumentarium auf Funktions-tüchtigkeit, Zuverlässigkeit und Richtigkeit durchgreifend zu kontrollieren. Selbst Fachleute sind oft bei der Beantwortung der hierbei auftretenden Fragen überfordert. Zusätzlich verlangt ein modernes Qualitätsmanagementsystem nach DIN ISO EN 9000 ff. Verfahrensweisungen zur Überprüfung der Messmittel.

Diese Umstände erfordern neue bzw. angepasste Prüfmethode, die eine schnelle technische Umsetzung gewährleisten, wobei der Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren – besonders im Hinblick auf die praktische Akzeptanz – große Bedeutung zukommt. Der hier beschriebene 25-jährige Rückblick von Beiträgen in den avn mag zum einen Einblick in diesen Entwicklungsprozess geben, zum anderen aber auch theoretische und praktische Lösungsansätze bereitstellen.

Mit dem GUM wird nun erstmals die Möglichkeit eröffnet, nach einer objektivierten Methode zufällige und systematische Einflussgrößen in einem Genauigkeitsmaß – der Messunsicherheit – zu berücksichtigen. Das weitgehend auf statistischen Theorien beruhende Verfahren wurde so aufgearbeitet, dass es auch für die Praxis zugänglich geworden ist. Da der GUM nur eine allgemeine Anweisung darstellt, sind jetzt die einzelnen Fachgebiete gefordert, diese für ihre typischen Anwendungen durch spezifische Anleitungen oder Normen umzusetzen. Dass die Notwendigkeit hierfür gegeben ist, steht außer Zweifel – insbesondere auch dadurch, dass ein Großteil unserer Messtätigkeiten interdisziplinär stattfindet und somit eine einheitliche „Sprache“ unabdingbar ist.

Der besondere Vorteil des im GUM dargestellten Berechnungs-verfahrens zur Messunsicherheit ist darin zu sehen, dass es sich

mit internationalen Empfehlungen identifiziert und subjektiven Vor-gehensweisen – mögen sie auch im Einzelfall theoretisch exakter sein – keinen Spielraum lässt. Die Genauigkeitsangabe ist somit für jeden Nutzer eindeutig interpretierbar. Bezog sich der Geodät bisher bei seinen Genauigkeitsberechnungen vorrangig weitgehend nur auf Genauigkeitsmaße, die durch zufällige Einflussgrößen bestimmt wurden, so sollte er zukünftig auch den zweiten Schritt vollziehen, nämlich die Berücksichtigung der Unsicherheiten von systemati-schen Einflussgrößen.

Die einzelnen Schritte einer Unsicherheitenanalyse verlangen weiterhin intensive und unabhängige Prüfverfahren, um alle Ein-flussparameter korrekt abzuschätzen. So wird aufgedeckt, wo die größten Unsicherheitenbeiträge entstehen und wo Verbesserungen im Messprozess mit dem Ziel einer Genauigkeitssteigerung beson-ders sinnvoll sind; andererseits wird auch erkennbar, wo eine größere Unsicherheit ohne Weiteres akzeptiert werden kann, ohne dass die dem Messergebnis beizuordnende Messunsicherheit wesentlich verändert wird. Dadurch kann im Einzelfall ein günstige-res Messinstrument oder gar eine wirtschaftlichere Messmethode eingesetzt werden.

Der Weg zur Bestimmung der Messunsicherheit ist vorgezeichnet, ob wir ihn schneller oder langsamer durchlaufen, liegt an uns. Auf jeden Fall wird unumgänglich werden, sowohl die Qualität eines Messwerts als auch die eines Messinstruments durch seine beizu-ordnende Messunsicherheit quantitativ zu beschreiben.

LITERATUR

- Bautsch, P. (1994):** Erfassung und Berücksichtigung meteorologischer Daten in ariden Gebieten bei terrestrischen geodätischen Messungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 101(1994)11-12, 447 – 456.
- Bernhart, F.; Hennes, M. (2012):** Leistungsfähigkeit eines „Reflektor 160“ in Kombination mit einem Lasertracker. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)2, 63 – 69.
- Bilajbegovic, A.; Vieras, M. (2007):** Untersuchungen der Multipath-Effekte verschiedener GPS-Antennentypen und ihre Einflüsse auf die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)1, 9 – 18.
- Blum, M. (1991):** Untersuchung und Test des digitalen Nivelliers Wild NA2000. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 98(1991)6, 198 – 205.
- Brunner, F. K.; Woschitz, H. (2001):** Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In: Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW, 42. Wittwer, Stuttgart, 70 – 90.
- Brys', H. (1995):** Theoretische Grundlagen der Refraktion beim trigonometrischen Nivellement höchster Genauigkeit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 102(1995)2, 59 – 64.
- Brys', H. (2012):** Refraktionseinflüsse durch elektrische Gleichstromfelder In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)5, 150 – 157.
- Brys', H.; Osada, E. (2011):** Zur Reduzierung von Refraktionseinflüssen in Tunnel-Vortriebsnetzen – Modell-theoretische Lösung des Problems. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 118(2011)5, 170 – 178.
- Casott, N.; Deußen, D. (2000):** Vom Bildflimmern zur refraktionskorrigierten Vertikalwinkelmessung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 107(2000)8-9, 286 – 292.

- Depenthal, C. (2004): Stativbewegung bei der Verwendung von Robottachymetern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 111(2004)6, 227 – 233.
- Depenthal, C. (2006): Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 113(2006)8-9, 305 – 309.
- Depenthal, C. (2012): Die kinematische Leistungsfähigkeit des iGPS. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)2, 70 – 72.
- Depenthal, C.; Barth, M. (2007): Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzier-ten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)7, 244 – 249.
- Fasching, M. (1993): Messung des Dispersionswinkels zur Bestimmung der Refraktion. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 100(1993)2, 51 – 62.
- Fay, E. (2001): Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien. In: Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW, 42. Wittwer, Stuttgart, 24 – 29.
- Feist, W. (1994): Das Präzisionsnivellier Ni 002A – ein Instrument für hochgenaue Höhenbestimmungen in der Meßtechnik. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 101(1994)2, 56 – 63.
- Fischer, E.-N. (1998): Prüfung elektronischer Sensorsysteme bei elektronischen Tachymetern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)12, 374 – 378.
- Görres, B. (2009): Aktueller Stand der GNSS-Kalibrierung. In: GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. Schriftenreihe des DVW, 57. Wißner, Augsburg, S. 223 – 246.
- Gottwald, R.; Müller, M.; Kogoj, D. (1998): Distanzmessung und automatische Zielerfassung im Nahbereich. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)12, 386 – 390.
- Gottwald, R.; Müller, I.; Obrist, M. (1998): Leica TDA5000 – Distanzmessung und automatische Zielerfassung im Nahbereich. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)2, 50 – 57.
- Gottwald, R.; Rüger, J.-M. (2000): Feldprüfverfahren für elektronische Tachymeter – Wunsch oder Realität. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 107(2000)12, 386 – 390.
- Heister, H. (1994): Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. In: Brunner, K.; Peipe, J. (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, 46, 95 – 101.
- Heister, H. (2001): Zur Angabe der Messunsicherheit in der geodätischen Messtechnik. In: Heister, H.; Staiger, R. (Hrsg.): Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW, 42. Wittwer, Stuttgart, 108 – 119.
- Heister, H. (2002): Zur Genauigkeitsangabe bei geodätischen Instrumenten. In: Binnenbruck, F.; Fuhlbrügge, H.-J., Schauerte, W. (Hrsg.): Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte zur Emeritierung. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 73 – 82.
- Heister, H. (2002): Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 109(2002)11-12, 380 – 385.
- Heister, H. (2006): Systemprüfung von GPS-Empfangs-Systemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 113(2006)5, 162 – 168.
- Heister, H. (2012): Die neue Kalibrierbasis der UniBw München. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)10, 336 – 343.
- Heister, H.; Hollmann, R.; Lang, M. (1997): Multipath-Einfluss bei GPS-Phasenmessungen: Auswirkungen und Konsequenzen für praktische Messungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 104(1997)5, 166 – 177.
- Heister, H.; Woschitz, H.; Brunner, F. K. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 112(2005)6, 233 – 238.
- Hennes, M. (1995): Die Analyse der atmosphärischen Turbulenz mit dem Szintillometer SLS 20. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 102(1995)4, 144 – 155.
- Hennes, M. (1999): Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 106(1999)12, 374 – 385.
- Hennes, M. (2006): Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 113(2006)3, 85 – 94.
- Hennes, M. (2006): Präzises und kinematisches Prüfen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 131(2006)6, 352 – 358.
- Hennes, M. (2007): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)4, 136 – 146.
- Hennes, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswertverfahren. Schriftenreihe des DVW, 61. Wißner, Augsburg, 239 – 252.
- Hennes, M. (2012): Kalibrierung geodätischer Messinstrumente für Anwendungen in Industrie- und Ingenieurvermessung. Workshop Videotachymetrie, LfG, TUM & GKGM München, 10./11.09.2012.
- Hennes, M.; Flach, P. (1998): Techniken zur Ermittlung von Refraktionskorrekturen aus Videobildern von geodätischen Messinstrumenten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)2, 41 – 49.
- Hennes, M.; Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)11-12, 375 – 383.
- Hennes, M.; Ingensand, H. (2000): Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In: Beiträge zum XIII. Int. Kurs. f. Ingenieurvermessung München. Wittwer, Stuttgart, 166 – 177.
- Heunecke, O. (2012): Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)11-12, 380 – 385.
- Höglund, R.; Large, P. (2004): Direct Reflex – Reflektorlose EDM-Technologie für Vermesser und Bauingenieure. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 111(2004)11, 346 – 350.
- Jelinek, H.-P. (1990): Zur Bestimmung des Aufsetzflächenfehlers bei Präzisions-Nivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 97(1990)2, 74 – 78.
- Joeckel, R.; Stober, M.; Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Wichmann, Heidelberg.
- Kahlmann, T.; Ingensand, H. (2007): Range Imaging Metrologie: Einführung, Untersuchungen und Weiterentwicklung In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)12, 384 – 393.
- Knoblach, S. (2011): Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 118(2011)4, 122 – 130.
- Köhler, M. (2006): Die Trimble S6 Totalstation. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 113(2006)3, 97 – 106.
- Köhler, M. (2012): Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)9, 291 – 299.
- Kutterer, H. (2010): Qualitätsmanagement und Unsicherheitsbegriffe – eine Einführung. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswertverfahren. Schriftenreihe des DVW, 61. Wißner, Augsburg, 3 – 14.

- Kutterer, H.; Schön, St. (2004): Alternativen bei der Modellierung der Unsicherheit beim Messen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 129(2004)6, 389 – 398.
- Meier-Hirmer, B.; Meier-Hirmer, R. (1996): Untersuchungen zum Reflexionsverhalten des Zeiss-Tachymeters Rec Elta RL an strukturierten Oberflächen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 103(1996)6, 233 – 240.
- Meiners-Hagen, K.; Pollinger, F. (2012): Rückführbare Messung langer Distanzen in der PTB. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)8/9, 283 – 290.
- Meisenheimer, D. (1992): EDM System Leica-Wild T 1610/TC 1610 jetzt neue Maßstäbe In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 99(1992)4, 223 – 226.
- Möhlenbrink, H. (1989): Hochgenaue Richtungsmessung mit automatischer Zielung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 96(1989)5, 177 – 184.
- Möser, M.; Fundheller, J.; Jope, A. (1997): Erfahrungen mit dem Industriemesssystem Axyz im Nahbereich. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 104(1997)10, 349 – 352.
- Möser, M.; Hoffmeister, H.; Müller, G.; Staiger, R.; Schlemmer, H.; Wanninger, L. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band Grundlagen. 4. Auflage, Wichmann, Berlin · Offenbach.
- Möser, M.; Wallstab-Freitag, S.; Herrmann, J. (2007): Der Laser-Tracker LTD 800 – eine neue Generation in der Industriemesstechnik. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)5, 190 – 194.
- Mozzuchin, O. A. (2001): Die Refraktion beim geometrischen Nivellement – Theorie und Praxis. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 108(2001)3, 78 – 84.
- Mozzuchin, O. A. (2010): Zur Berechnung des Refraktionseinflusses beim trigonometrischen Nivellement. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 117(2010)11-12, 374 – 377.
- Mozzhukhin, O. A.; Gordeevtsev A. V. (2007): History of Considering refraction in Levelling. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)1, 3 – 6.
- Müller, T.; Schwendemann, J. (2009): iGPS – ein vielseitiges Messsystem hoher Genauigkeit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)4, 146 – 157.
- Naab, C.; Hennes, M. (2012): Das Laser Radar – reflektorlose Distanzbestimmung mittels Frequenzmodulation. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)2, 48 – 53.
- Neitzel, F.; Petrovic, S. (2004): Ein verallgemeinertes Feldverfahren zur Überprüfung von Nivelliergeräten In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 111(2004)3, 82 – 91 und 111(2004)6, 220 – 226.
- Neumann, I. (2012): Messunsicherheit bei elektrooptisch bestimmten Strecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)11-12, 369 – 379.
- Richter, E.; Juretzko, M. (2007): Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)6, 212 – 223.
- Ringbeck, T.; Hagebeucker, B. (2007): Dreidimensionale Objekterfassung in Echtzeit – PMD-Kameras erfassen pro Pixel Distanz und Helligkeit mit Videoframerate. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)7, 263 – 270.
- Rozic, N.; Lasic, Z.; Razumovic, I. (2008): Comparison of High Accuracy Levelling Survey achieved with digital and classical levelling Instruments. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)4, 137 – 145.
- Rühmössl, H.; Brunner, F. K.; Rothacher, M. (1998): Modellierung der troposphärischen Korrektur für Deformationsmessungen mit GPS im Alpenraum. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)1, 14 – 20.
- Schäfer, T. (2011): Simulation der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 118(2011)11/12, 363 – 367.
- Schauerte, W.; Heister, H. (2005): Der Ringversuch 2003/2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 112(2005)6, 221 – 228.
- Schirmer, W. (1993): Vom Umgang mit Industriemeßsystemen – einige praktische Erfahrungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 100(1993)6, 231 – 238.
- Schlemmer, H. (2005): 30 Jahre Laserinterferenzkomparatoren für Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 112(2005)6, 198 – 199.
- Schmidt, H. (1997): Was ist Genauigkeit? Zum Einfluss systematischer Abweichungen auf Mess- und Ausgleichungsergebnisse. In: Vermessungswesen und Raumordnung, 59(1997), 173 – 184.
- Schmidt, H. (2003): Warum GUM? – Kritische Anmerkungen zur Normdefinition der „Messunsicherheit“ und verzerrten „Elementarfehlermodellen“. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 128(2003), 303 – 312.
- Schmidt, J.; Möser, M. (2007): SmartStation von Leica Geosystems: Effizienzsteigerung durch neue Messtechnologie? In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)7, 246 – 253.
- Schmitt, R.; Jatzkowski, P.; Schwenke, H. (2008): Innovative Messtechnik zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)5, 167 – 169.
- Schmitt, R.; Jatzkowski, P.; Schwenke, H. (2009): Kinematische Kalibrierung von 5-Achs-Werkzeugmaschinen mit Lasertracern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)6, 214 – 219.
- Schnädelbach, K. (1989): Genauigkeitsmaße zwischen Punkten in dreidimensionalen Netzen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 96(1989)7, 257 – 264.
- Schulz, H. (2003): Zur Ableitung zuverlässiger Messunsicherheiten aus Toleranzen bei Ingenieurvermessungen an Kranbahnen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 110(2003)7, 259 – 263.
- Schwarz, W. (2005): Komparatoren zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 112(2005)6, 204 – 212.
- Schwarz, W. (2012): Einflussgrößen bei der optischen Distanzmessung und ihre Erfassung. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)10, 323 – 335.
- Simicic, K. (1992): Abhängigkeit der Messgenauigkeit mit Fernrohren an geodätischen Instrumenten von der Okularlage. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 99(1992)7, 274 – 304.
- Simicic, K. (1996): Einfluss der Beleuchtungsveränderung auf die Genauigkeit der Richtungsmessung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 103(1996)10, 384 – 387.
- Staiger, R. (1993): Der Einsatz von motorisierten Theodoliten im Automobilbau. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 100(1993)12, 417 – 423.
- Staiger, R. (1998): Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 105(1998)12, 365 – 372.
- Staiger, R. (2002): Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL 30 von Sokkia. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 109(2002)12, 386 – 391.
- Stempfhuber, W.; Kirschner, H. (2008): Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)6, 216 – 224.

Wanninger, L.; Wildt, S. (1997): Identifikation von Mehrwegeinflüssen in GPS-Referenzstationsbeobachtungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 104(1997)1, 12 – 15.

Wehmann, W.; Weferling, U.; Reimann, C.; Schuster, S. (2009): Untersuchungen des Digitalnivelliers Leica Sprinter 200M auf Einsatzmöglichkeiten bei Überwachungsmessungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)9, 294 – 299.

Wenderlein, W. (1989): Das Prinzip Genauigkeit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 96(1989)6, 240 – 242.

Wenderlein, W. (1990): Von Genauigkeit zu Genauigkeit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 97(1990)5, 194 – 197.

Wenderlein, W. (1996): Genauigkeit ist nicht Wirklichkeit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 103(1996)9, 301 – 305.

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
GEODÄTISCHES INSTITUT

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden
michael.moeser@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Heister

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85579 Neubiberg
h.heister@unibw.de



Prof. Dr.-Ing. Rudolf Staiger

HOCHSCHULE BOCHUM
FACHBEREICH GEODÄSIE

Lennershofstraße 140 | 44 801 Bochum
rudolf.staiger@hs-bochum.de



GNSS garantiert zukunfts- sicher

GNSS UNLIMITED

Modulare Aufrüstbarkeit sichert Ihre Investition bis über das Jahr 2020 hinaus ab.

- RTK Software-Update für BeiDou
- Vorrüstbar für Galileo und BeiDou
- Erweiterbar auf mehr als 500 Kanäle