

Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders

Maria Hennes



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.
Tag der Einreichung: 1. März 2007

1 Motivation

Neben den Genauigkeitsangaben, die aus Ausgleichungsprozessen stammen (Standardabweichung der ausgeglichenen Parameter und der Gewichtseinheit), begegnet dem Anwender eine immer größer werdende Vielfalt an Genauigkeitsmaßen: Herstellerangaben für die Messgenauigkeit klassisch geodätischer Instrumente lehnen sich teilweise an Industrienormen (**DIN, ISO**) an, folgen aber auch herstellerspezifischen Spezifizierungsweisen. Demgegenüber werden in Nachbardisziplinen in der Regel sensorbeschreibende Angaben wie **Auflösung, Empfindlichkeit, Auflösungsvermögen, Reproduzierbarkeit** und **Linearität** verwendet. Im angloamerikanischen Bereich gewinnt für einige Messsysteme die Spezifizierung mittels des **MPE** (Maximum Permissible Error) an Bedeutung, während andere (im europäischen Bereich) die Spezifizierung analog zum Leitfaden **GUM** (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements) erwägen. Weil weltweit in den meisten messenden Disziplinen die Angabe von **Messunsicherheiten** im Gegensatz zu „Messgenauigkeit“ zum Standard geworden ist, sollte sich die Geodäsie als ebenfalls messende Fachrichtung mit dem Potential dieser Möglichkeit auseinandersetzen. Ähnliches gilt für die Ermittlung von Standardabweichungen bzw. Messunsicherheiten mittels der **Monte-Carlo-Methode**: Diese Vorgehensweise erscheint benachbarten Fachdisziplinen a priori einsichtig und weniger fragwürdig als die nach geodätischen Methoden erzielten Ergebnisse. Für den Geodäten stellt die Monte-Carlo-Methode eine wertvolle Ergänzung dar. Dieser Beitrag zielt nun darauf ab, die Bedeutung und die Nützlichkeit unterschiedlicher Genauigkeitsangaben zu veranschaulichen. Auf die Darstellung mathematischer Zusammenhänge wird bewusst verzichtet und es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Viel mehr wird das Verständnis der Begriffe und der ingenieurmäßige Nutzen in den Fokus genommen. Es wird entwickelt, wie messsystemrelevante

Genauigkeitsangaben durch umfeldbeschreibende Parameter ergänzt und zu umfassenden Aussagen geführt werden können.

2 Messsystemrelevante Genauigkeitsangaben

2.1 Definitionen

Mit dem Begriff „messsystemrelevante Genauigkeitsangaben“ werden häufig, aber nicht exakt – Instrumenten-„fehler“ assoziiert. Der Begriff „Fehler“ sollte (konform zu DIN 1319) durch den Begriff „Messabweichungen“ ersetzt werden. „Fehler“ ist nur dann die richtige Bezeichnung, wenn die Abweichungen vorgegebene Grenzen überschreiten (im Sinne von Nichterfüllung einer festgelegten Forderung). Für die Ableitung von Genauigkeitsmaßen einer Zielgröße wie auch für die Entwicklung von Eliminationsstrategien von Messabweichungen empfiehlt es sich, die Messabweichungen näher bezüglich Ursache und Wirkung zu charakterisieren.

Die Begriffe Auflösung, Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen sind eng verwandt und zielen auf die Eigenschaft eines Sensors in einem beliebigen kleinen Intervall des Messbereichs. Für den Begriff Auflösung gibt es mehrere Bedeutungen: Wenn die Anzeige eines Gerätes unstetig (digital) ist, bezeichnet **Auflösung** (engl.: resolution) den kleinsten anzeigbaren Messschritt eines Messsystems, der in der Regel vom Hardware-Design des Displays bzw. durch das Datenspeicherformat vorbestimmt ist. Allgemein bezeichnet Auflösung diejenige Änderung der zu messenden Größe, die eine festgelegte möglichst kleine Änderung im Ausgangssignal hervorruft. Unterliegt das Messsystem einer gewissen Trägheit oder Hysterese, ergeben sich überproportional große Werte für die Auflösung. Nach [WITTE, 1986] gibt das **Auflösungsvermögen** den kleinsten gerade noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % vom Sensor (im Sinne von „Messfühler“) unterscheidbaren Messschritt an. Das Auflösungsvermögen ergibt sich aus der Standardabweichung einer Einzelmessung unter Wiederholbedingungen durch Multiplikation mit 2.77. Wenn die Auflösung des Messsystems schlechter ist als das Auflösungsvermögen eines Sensors, geht die Sensorqualität im Quantisierungsrauschen (des Anzeigemoduls) verloren. Mit **Empfindlichkeit** (engl.: sensitivity) wird üblicherweise das Verhältnis zwischen der physikalischen Eingangsgröße eines Messsignals und der elektrischen Ausgangsgröße bezeichnet. Wenn keine Systemträgheit oder Hysterese auftritt, entspricht die Empfindlichkeit der reziproken Auflösung. Die Übertragungsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen dem physikalischen Eingangssignal und dem

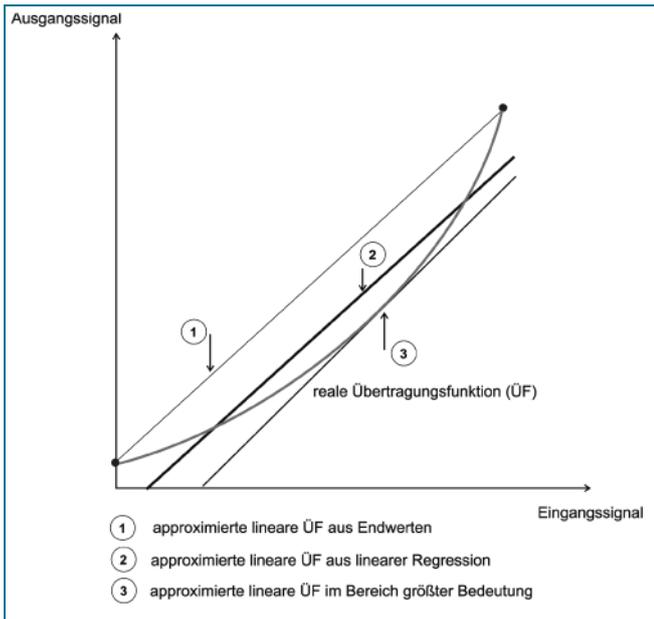


Abb. 1: Approximierende lineare Übertragungsfunktionen

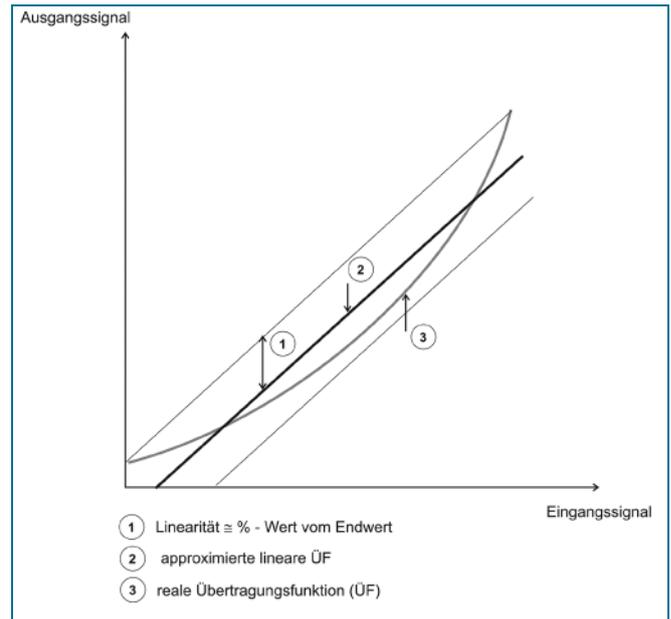


Abb. 2: Linearität

(typischerweise elektrischen) Ausgangssignal eines Sensors. Viele Sensoren (inklusive ihrer Vorverstärkung) zeigen ein (nahezu) lineares Verhalten über ihren Messbereich. Dann wird die reale Übertragungsfunktion in der Regel durch eine approximierende lineare Übertragungsfunktion ersetzt, die nach unterschiedlichen Methoden bestimmt sein kann (vgl. Abb. 1). Es sind unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der linearen Übertragungsfunktion erlaubt, wie zum Beispiel aus Endpunkten (Funktion 1 in Abb. 1), durch lineare Regression (Funktion 2) oder als Tangente in demjenigen Bereich, in dem die höchste Genauigkeit erzielt werden soll (Funktion 3). Die verwendete Methode ergibt sich manchmal aus zugehörigen Normen.

Mit dem Begriff **Linearität** wird die maximale Abweichung vom linearen Verhalten quantifiziert (vgl. Abb. 2), und zwar typischerweise als Prozentwert des Anzeigebereichs (full scale, f.s.) oder/und der aktuellen Messgröße (read out, r.o.). Letzteres führt zu einer Vergrößerung des Toleranzbandes mit zunehmendem Messwert (z.B. bei Temperatursensoren üblich). Linearität ist als Fehlergrenze zu verstehen, also einem Wert, der nie überschritten werden darf [PROFOS, PFEIFFER, 1997]. Der Begriff ist in Bezug auf die Definition des linearen Verhaltens (bestimmt aus Endwerten, Regression, etc.) nicht genormt.

Die **Wiederholbarkeit** (engl.: repeatability) beschreibt nun, wie gut das Sensorverhalten unter *Wiederholbedingungen* reproduzierbar ist. Sie wird, wenn nicht anders angegeben, als maximale Differenz zwischen zwei Beobachtungen während zwei Kalibrierungsmessreihen angegeben [FRADEN, 1996]. Eine allein aus Wiederholungsmessungen berechnete Standardabweichung wird mit **Wiederholgenauigkeit, Präzision** (engl.: precision) oder „**innere Genauigkeit**“ [WITTE, 1986] bezeichnet. Die Angabe der **Reproduzierbarkeit** (engl.: reproducibility) zielt auf die „Wiederhol“genauigkeit unter nicht notwendigerweise gleichen Bedingungen ab und ist insbesondere bei gleichzeitiger Beschreibung der *Vergleichsbe-*

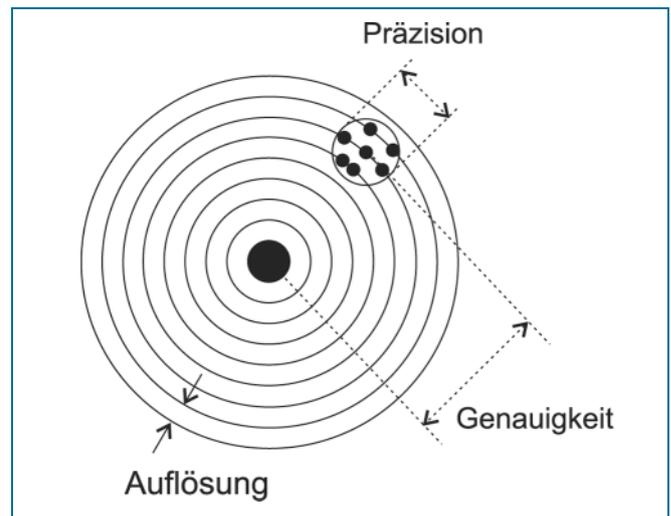


Abb. 3: Präzision und Genauigkeit

dingungen aussagekräftig. DIN 55350, Teil 13 beschreibt die Präzision allgemein mit: „Qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung voneinander unabhängiger Ermittlungsergebnisse bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Ermittlungsverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen“. Sie ist damit konform zu DIN 1319, Teil 2.

Nach DIN 55350, Teil 13 bezeichnet **Genauigkeit** (engl.: accuracy) das Ausmaß der Annäherung von Ermittlungsergebnissen an den Bezugswert, wobei dieser je nach Festlegung oder Vereinbarung der wahren, der richtige oder der Erwartungswert sein kann. Der Begriff „äußere Genauigkeit“ macht deutlich, dass nun alle auf das Messergebnis wirkenden Einflüsse berücksichtigt sind, und zwar auch die der Messumgebung. Abb. 3 zeigt auf, dass mit hoher Präzision eine deutlich geringere Genauigkeit einhergehen kann.

Die **Messunsicherheit** charakterisiert die Qualität eines Messergebnisses. Das Internationale Wörterbuch der Metrologie definiert sie als der dem Messergebnis zugeord-

nete Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können. Diese Definition bezieht in besonderem Maße mit ein, unter welchen Bedingungen das Messergebnis zustande gekommen ist und liefert daher dem Ingenieur ein verlässliches Kriterium für die Güte seiner Messung. Es kommt also nun darauf an, die Messumgebung als limitierenden Genauigkeitsfaktor zu begreifen und ihren Einfluss sinnvoll zu integrieren. Dies will der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) erleichtern.

Spätestens seitdem der Hersteller Faro – obwohl nicht begründbar – behauptet, „zukünftig werden alle Hersteller von Lasertrackern ihre Spezifikationen basierend auf ASME B89.4.19 angeben“ [FARO, 2007], wird die Auseinandersetzung mit dem **Maximum Permissible Error (MPE)** auch für Vermessungsingenieure erforderlich. Der MPE ist eine (Hersteller-)Angabe, die die maximal zulässige Messabweichung eines Messgerätes beschreibt, wenn es in einer vorgeschriebenen Prozedur benutzt wird (vgl. ISO 10360). Diese wird für diverse Messgeräte in jeweils zugehörigen Standards geregelt, d.h., es wird vorgeschrieben, in welcher Weise die Testmessungen vorzunehmen und die Abweichungen zu ermitteln sind. Für Lasertracker wird diese Prozedur im amerikanischen Standard der American Society of Mechanical Engineers (ASME) B89.4.19 festgeschrieben und momentan als Blatt 10 der VDI 2617 verfasst. ASME B89.4.19 beinhaltet die Vergleichsmessung zu kurzen Referenzstrecken, die mindestens etwa 10 % des Messbereichs abdecken und in verschiedenen räumlichen Orientierungen vorgegeben werden, und zu langen Referenzstrecken, die den gesamten Messbereich abdecken, sowie 2-Lagenmessungen, die über Koordinatenvergleich eine Aussage über die Systemstabilität erlauben. Am National Institute of Standards and Technology (USA) ist die Realisierung der Prüfanlage am weitesten fortgeschritten (Abb. 4). Abb. 5 zeigt ein Beispiel für ein solches Prüfprotokoll, das durch allgemeine, das Versuchsfeld beschreibende Angaben ergänzt wird. Die einfach gehaltenen Messanordnungen sollten nicht über die Herausforderung der Referenzstreckenrealisierung hinwegtäuschen, auch wenn der Prüffähigkeitsindex (measurement capability index, vgl. Abschnitt 2.2) mit 4 bzw. 2 angegeben wird: Dies bedeutet, dass die kurzen Referenzstrecken mit achtfacher und die langen Referenzstrecken mit vierfacher Genauigkeit wie der spezifizierte MPE realisiert werden müssen. Gleichwohl wäre eine Anwendung auf Tachymeter sehr einfach durch Vorgabe der Referenzstrecken durch einen Lasertracker realisierbar. In jedem Fall sollte beachtet werden, dass eine Prüfung nach ASME B 89.4.19 bedeutet, dass die angegebenen MPE als Grenzwerte zu verstehen sind, die – im Gegensatz zu den bisher üblichen Genauigkeitsmaßen – nicht überschritten werden dürfen.

Neben dem ASME B89.4.19 existieren weitere Standards, die auf demselben Grundgedanken der Vergleichsmessungen basieren: Fokus der ISO 10360 und der VDI-Richtlinie 2617 sind Koordinatenmessmaschinen, die VDI/VDE 2634 behandelt optische 3D-Messsysteme. Auf diese geht [HEISTER, 2006] ein und schlägt ihre Modifizierung zur Anwendbarkeit für terrestrische Scanner vor. An

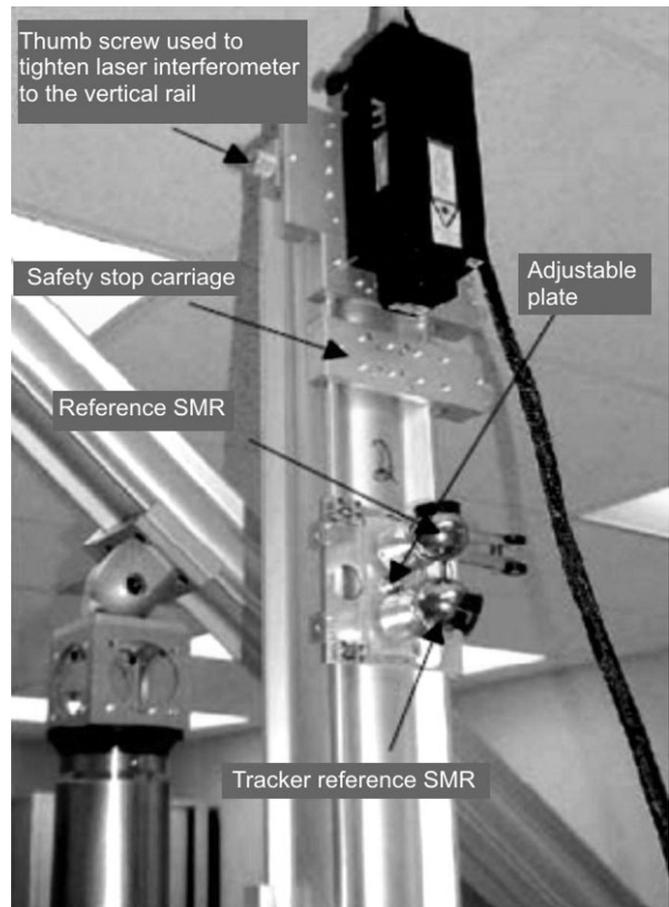


Abb. 4: Realisierung von interferometrisch geprüften Raumstrecken beim National Institute of Standards and Technology (NIST), aus: [PHILLIPS, 2006]

der Übertragbarkeit insbesondere von VDI 2617 auf Lasertracker in beschränktem Arbeitsvolumen wird zurzeit international gearbeitet. Alle diese Standards beschreiben ebenfalls die Vorgehensweise zur Prüfung der Einhaltung von Spezifikationen, die als MPE angegeben werden. In der Sekundärliteratur wird mit MPE oftmals impliziert, dass die Spezifikation selbst nach einem in den Standards beschriebenen Verfahren, nämlich mit Testmessungen nach vorgeschriebener Prozedur, ermittelt worden sei. Dies ist jedoch nicht zwingend Bedingung: Die Herstellerangabe darf natürlich nach beliebigen Kriterien festgelegt worden sein. Aber dem Anwender wird garantiert, dass der MPE-Wert bei Messungen gemäß zu den in den zugehörigen Standards beschriebenen Prüfprozeduren nicht überschritten wird. Er ist also im Sinne einer Fehlergrenze zu verstehen.

Verwirrung stiftet eine Textpassage in einer Pressemitteilung des Herstellers Faro, die lautet [FARO, 2007a]: „Die mit“ ... (Wertangabe) „zugesicherten Genauigkeiten tragen die Hälfte des Maximum Permissible Error (MPE) Wertes nach der neuen, für die Klasse der Lasertracker vorgesehenen Spezifikation“. Die Verwirrung wird auch nicht durch das zugehörige Datenblatt [FARO, 2007b] behoben, denn dort heißt es „die angegebenen Genauigkeit ist der halbe maximal erlaubte Fehler (MPE)“ und weiter „MPE und alle Genauigkeitsmaße sind nach dem ASME B 89.4.19 Standard angegeben“. Hier wird

Manufacturer's Performance Specifications & Test Results						
Test (positions)	IFM Specifications and Test Results			ADM Specifications and Test Results		
	MPE_{IFM}	δ_{max} or Δ_{max}^*	Pass	MPE_{ADM}	δ_{max} or Δ_{max}^*	Pass
Horizontal (1)	52	N/A	Y	72	47	Y
Horizontal (2;3;4;5)	77	N/A	Y	78	30	Y
Horizontal (6;7;8;9)	107	N/A	Y	108	38	Y
Vertical (1;2;3;4)	78	N/A	Y	78	17	Y
Vertical (5;6;7;8)	107	N/A	Y	108	24	Y
Right-Diagonal (1;2;3;4)	77	N/A	Y	78	56	Y
Right-Diagonal (5;6;7;8)	107	N/A	Y	108	55	Y
Left-Diagonal (1;2;3;4)	77	N/A	Y	78	50	Y
Left-Diagonal (5;6;7;8)	107	N/A	Y	108	66	Y
User-Selected (1)	52	N/A	Y	72	25	Y
User-Selected (2)	52	N/A	Y	72	43	Y
Two-Face (1;2;3;4)		†		86	75 †	Y
Two-Face (5;6;7;8)		†		113	66 †	Y
Two-Face (9;10;11;12)		†		153	86 †	Y
IFM Ranging Test (1)	29,7	8 ‡	Y			
IFM Ranging Test (2)	40	11 ‡	Y			
IFM Ranging Test (3)	50,4	8 ‡	Y			
IFM Ranging Test (4)	59,8	9 ‡	Y			
IFM Ranging Test User (1)	20,1	5 ‡	Y			
IFM Ranging Test User (2)	29,6	3 ‡	Y			
ADM Ranging Test (1)				53	9	Y
ADM Ranging Test (2)				68	7	Y
ADM Ranging Test (3)				82	3	Y
ADM Ranging Test (4)				95	7	Y
ADM Ranging Test User (1)				40	6	Y
ADM Ranging Test User (2)				53	6	Y
Formula for calculating the MPE (or attach MPE specification sheet)	See attached MPE specification sheet.			See attached MPE specification sheet.		
Test performed by [attached] _____ Date: x.x.200x _____ Tracker Serial Number xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx						
Final test result: <u> N/A </u>						
Notes: The IFM columns must contain specifications and results for laser trackers with IFM only. The ADM columns must contain specifications and results for instruments with ADM only, and both pairs of columns must contain specifications and results for instruments with both an IFM and an ADM.						
* δ for length system results, Δ for two-face results.						
† Two-Face Tests may be performed with either an IFM or an ADM.						
‡ These results can be: results from long reference lengths, or computed from short reference lengths, or computed from the laser interferometer calibration certificate.						

Abb. 5: Ausschnitt einer noch unvollständigen Prüfung nach ASME B 89.4.19, nach [FARO, 2007c]. Zeile 1–11: kurze Referenzstrecken, Zeile 12–14: Zwei-Lagenmessung, 15–24: lange Referenzstrecken. Werte in μm

zunächst impliziert, dass in ASME 89.4.19 ein Grenzwert (MPE) tatsächlich quantitativ festgelegt wird und dass das Messgerät die doppelte Genauigkeit als ein (in der ASME definierter) Normwert erreicht. Nach Rücksprache mit dem Hersteller soll ausgedrückt werden, dass der MPE (definiert als Fehlergrenze) auf 50 % reduziert worden ist, um halbwegs vergleichbare Werte zur Standardunsi-

cherheit bzw. Standardabweichung angeben zu können. Dies bedeutet umgekehrt: Würde ein Faro-Instrument nach ASME B 89.19.4 geprüft, dürften die Abweichungen also nahezu den doppelten spezifizierten Wert erreichen, ohne dass das Instrument durch die Prüfung fiele. Nach Aussage des Herstellers hätten die bisher geprüften Instrumente jedoch sogar den halben MPE unterschritten. Frag-

lich ist allerdings die Rechtskraft einer solchen Aussage für ein neu zu erwerbendes Exemplar; letztendlich wird das Prüfzertifikat rechtswirksam sein.

2.2 Prüfung auf Einhaltung der Spezifikation

Es erhebt sich nun die Frage, wie Herstellerangaben generell bezüglich der Instrumenteneigenschaften auf Einhaltung geprüft werden können. Für die meisten geodätischen Instrumente sind so genannte Feldtests in der ISO 17123-Reihe ausgearbeitet. Die dort integrierten statistischen Prüfverfahren zielen auf die Einhaltung der gebräuchlichsten Spezifikationen. Natürlich geben auch System- oder/und Komponentenkalibrierungen über die Einhaltung von Spezifikationen Aufschluss.

Da ein Prüfprozess selbst natürlich mit Messunsicherheiten behaftet ist und möglicherweise auch Ausreißer aufweist, verweist ISO 10360 folgerichtig auf die DIN EN ISO 14253-1, die dem Prüfprozess Messunsicherheiten zubilligt und die daraus resultierende Verfahrensweise regelt (**Prüfprozessfähigkeit**): Der Toleranzbereich (bzw. das zugelassene Instrumentenfehlerintervall) wird an seinen oberen und unteren Grenzwerten um die erweiterte Messunsicherheit U (vgl. Abschnitt 5.2) reduziert, wodurch sich der (verbleibende) Übereinstimmungsbereich ergibt. Nur Prüfergebnisse innerhalb des Übereinstimmungsbereiches bestehen den Prüfprozess. Bei wachsenden Messunsicherheiten im Prüfprozess wird der Übereinstimmungsbereich kleiner, weswegen mit steigenden Qualitätsansprüchen im Fertigungs- bzw. Bauprozess die erweiterte Messunsicherheit U immer mehr in den Fokus der Diskussion gerät. Sie wird durch die Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor k aus der Messunsicherheit u erhalten, der der statistischen Sicherheit Rechnung tragen soll (Erhöhung von 68 % auf z.B. 95 %, 99 %, 1-1 ppm). DIN EN ISO 14253-1 regelt ebenfalls das Auftreten von Ausreißern. Bei Erhöhung der Messunsicherheit wirkt sich die dort vorgesehene Regelung allerdings nachteiliger auf ein positives Prüfergebnis aus. Die VDA 5 beschreibt die Prüfprozesseignung und gesteht dem Prüfprozess ebenfalls Messunsicherheiten zu. Es ist also nicht auszuschließen, dass zukünftig Hersteller die Leistung eines Instruments gemäß einer spezifizierten Prüfanordnung angeben und dabei Grenzwerte (also MPE) benutzen. Wie auch heute schon, können diese Angaben

auch gewisse Instrumenteneigenschaften abbilden, wie zum Beispiel Distanzabhängigkeit.

2.3 Beurteilung

Neben den bekannten Genauigkeitsmaßen für geodätische Instrumente, auf deren Beschreibung aus Platzgründen nicht näher eingegangen werden soll, sind die in der Metrologie verwendeten Maße als wertvolle Ergänzung zu verstehen. Sie ermöglichen nicht nur, die Eigenschaften eines Messgerätes detaillierter zu charakterisieren, sondern auch, es adäquater einzusetzen. So kann ein Sensorsystem mit schlechter Linearität durchaus für eine anspruchsvolle Messaufgabe, die lediglich Relativmessungen in einem kleinen Ausschnitt des Messbereichs vorsieht, eingesetzt werden, wenn es ein ausreichendes Auflösungsvermögen und gute Reproduzierbarkeit bzw. hohe Präzision aufweist. Wäre lediglich eine globale Genauigkeitsangabe bekannt, wäre der Einsatz dieses Messgerätes aufgrund der Spezifikation nicht vertretbar.

Diesen Vorteil bieten nicht alle Spezifizierungen. Die Feldtests nach ISO 17123 zielen auf eine Gebrauchsfähigkeitsprüfung ab, die mit minimalen Mitteln im Feld durchzuführen sind. Nur Genauigkeitsaussagen aufgrund von Kalibrierungen lassen die Beurteilung einzelner Systemkomponenten zu. Auch der aktuell in Diskussion befindliche MPE hat den Charakter einer globalen Aussage über die erzielbare Systemgenauigkeit. Diese Angabe ist hilfreich, um unmittelbar eine größenordnungsmäßige Vorstellung eines objektorientierten Genauigkeitsmaßes zu geben. Dies wird durch das Vermessen von Referenzstrecken oder Körpern gewährleistet. Die Prüfung, ob ein Messsystem die MPE-Spezifikation einhält, ist mit geringem Zeitaufwand durchzuführen (ähnlich der bekannten Feldtests nach ISO 17123), allerdings werden aufwändige Referenzmaßrealisierungen benötigt. Aufgrund des geringen Datenumfanges werden diese Standards es nicht erlauben, systemspezifischen Eigenschaften wie in anderen Systemkalibrierungen (z.B. bei der Digitalnivellierprüfung [WOSCHITZ, 2003]) aufzudecken und Hinweise für eine Optimierung von Messvorgängen zu geben. Allerdings berücksichtigen sie zumindest teilweise die Messumgebung als limitierenden Genauigkeitsfaktor. Die Genauigkeitsangabe nach MPE ist also eine globale Angabe, die einen groben Anhaltswert dafür gibt, welche Genauigkeit mit ähnlichen Messanordnungen zu erreichen ist und stellt somit eher ein objektorientiertes Genauigkeitsmaß dar. Allerdings lassen sich hiermit die Eigenschaften eines Messsystems nicht im Detail beurteilen und somit ist eine Optimierung der Messanordnung nicht möglich.

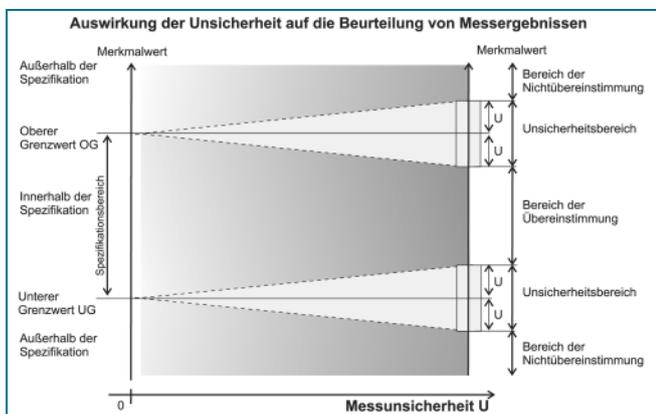


Abb. 6: Prüfprozessfähigkeit

3 Messumgebung als limitierender Genauigkeitsfaktor

3.1 Mögliche Quellen der Messunsicherheit

Die geläufigste Ursache für das Entstehen einer Messunsicherheit ist die nicht-repräsentative Probenahme, d.h. die „Beobachtung“ stellt möglicherweise gar nicht die Messgröße dar. Es treten Variationen beim mehrmaligen Beobachten sogar unter scheinbar identischen Bedingungen auf.

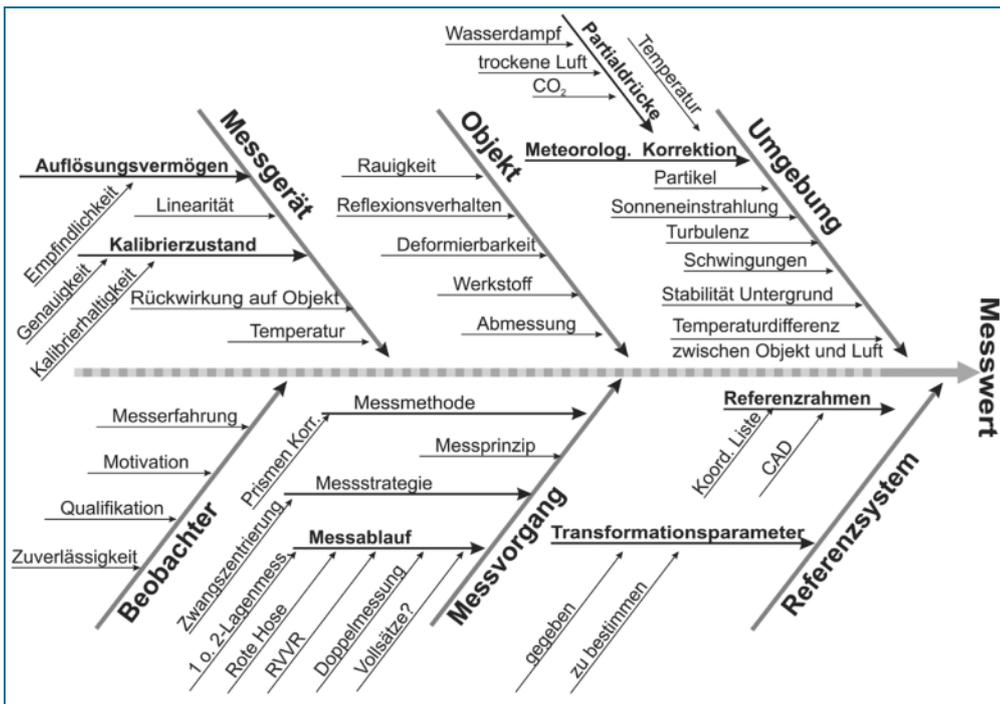


Abb. 7: Ishikawa-Diagramm

gen auf. Bekannt sind auch persönlich bedingte zufällige und evtl. auch systematische Einstell- oder Ziel-„fehler“. Diese werden zwar mehr und mehr durch automatisierte Systeme ersetzt und damit auch mehr vereinheitlicht, sind aber doch nicht zu vernachlässigen. Mit fortschreitender Automatisierung kommt auch die Sensorauflösung, gekoppelt mit einer endlichen Ansprechschwelle ins Spiel. In der Geodäsie wenig beachtet sind Einflüsse durch die unvollständige *Definition* der Messgröße und die unvollständige *Realisierung der Definition* der Messgröße, weil in der klassischen Vorgehensweise oft auf einen vorab fest definierten Punkt (z.B. Höhenbolzen, Fixpunkt) zugegriffen wird und die Messung sich typischerweise auf Richtung, Strecke und Höhenunterschied, bezogen auf vereinbarte Punkte, zu beschränken scheint. Tatsächlich bezieht sich die Messung aber oft auf einen virtuellen Punkt im Innern des Messinstruments, was am Beispiel GNSS besonders deutlich wird: hier spiegelt bereits der Begriff „Pseudostrecken“ diese Problematik wieder; darüber hinaus gibt beispielsweise die Betrachtung der unterschiedlichen Antennencharakteristika wegen der variablen Phasenzentren einen Eindruck von der unvollständigen Realisierung bzw. Realisierbarkeit der Messgröße. Bei der Analyse insbesondere von ingenieurgeodätischen Messaufgaben tritt in diesem Zusammenhang eine Vielzahl von Unsicherheitsquellen zu Tage. Darüber hinaus können auch in der Messmethode Näherungen und Annahmen enthalten sein, die zu Messunsicherheiten führen. Zusätzlich geht die verbleibende Restunsicherheit nach Kalibrierung vollumfänglich in die Messunsicherheit des Endergebnisses ein. Eine weitere Unsicherheitsquelle kann in der Unsicherheit von Transformationsparametern liegen. Ähnliches gilt für Korrektionsparameter, die möglicherweise nicht ausreichend repräsentativ bestimmt wurden. Ein großer Anteil der Messunsicherheit ist sicher in den Umweltbedingungen zu suchen, die entweder nicht

ausreichend stabil gehalten oder nicht auf die Messerfordernisse angepasst werden können oder nur unvollkommen erfassbar sind. Diese Aufzählung ist sicher nicht vollständig, teilweise hängen auch einzelne Komponenten voneinander ab. Sie soll lediglich Anhaltspunkte geben, um eine vollständige Erfassung aller relevanten Messunsicherheitsquellen zu erleichtern. Eine nicht zu unterschätzende Schwierigkeit liegt in der sinnvollen Behandlung von teilweise auch systematisch wirkenden Effekten, deren aktuelle Größe in der speziellen Messaufgabe nicht exakt bestimmt werden kann.

3.2 Vollständigkeitsprüfung

Die Qualitätsbeurteilung eines Messergebnisses hängt wesentlich von der vollständigen Erfassung aller störenden Einflussgrößen ab. Methoden wie Brainstorming und Mind-Mapping haben hier sicher ihre Berechtigung. Die Erstellung eines Ursache-Wirkungs-Diagramms (Ishikawa-Diagramms, vgl. Abb. 7) dient nicht nur der Systematisierung aller Einflüsse, sondern unterstützt auch die Prüfung auf Vollständigkeit. Ein solches Diagramm gleicht einer Fischgräte, wobei der Hauptstrang auf das Ziel, nämlich den Messwert weist. Seitlich sind die Haupteinflussgrößen (typischerweise: Messgerät, Objekt, Umgebung, Beobachter, Messvorgang, Referenzsystem) eingetragen. Diese untergliedern sich nun weiter in einzelne Komponenten, die ebenfalls auf die Messabweichung wirken. Hierbei spielt die Art der Wirkung (systematisch oder zufällig) zunächst keine Rolle. Einzelne Parameter dürfen auch mehrfach auftreten und sich weiter untergliedern. Abb. 7 gibt eine Vorstellung von einem Ishikawa-Diagramm ohne Anspruch auf Vollständigkeit, und sicher können einzelne Äste entfallen, weil sie in der speziell zu analysierenden Messaufgabe wenig oder keine Bedeutung haben.

Mit dieser schematischen Darstellung, die in Abhängigkeit von der Messaufgabe zu entwerfen bzw. zu modifizieren ist, lassen sich nun entweder funktionale Modelle für die Wirkung dieser Einflussgrößen aufstellen oder ihre Wirkung beispielsweise anhand der Monte-Carlo-Methode simulieren. Für beide Verfahrensweisen müssen nun auch plausible Annahmen über die Verteilung der Einflussgrößen getroffen werden.

4 Genauigkeitsangaben aus Ausgleichsalgorithmen

Die klassisch geodätische Vorgehensweise beruht auf der weit verbreiteten Überzeugung, dass die in den Messdaten vorliegenden Überbestimmungen durch den Ausgleichsalgorithmus eine vernünftige, d.h. umfassende Genauigkeitsaussage über das Endergebnis zulassen. Dies ist aber nur unter Beachtung gewisser Vorbedingungen möglich, wie das einfache Beispiel der Bildung des Mittelwertes zeigt. Diese Operation ist zwar ein – wenn auch einfacher – Ausgleichsprozess, der jedoch ein völlig falsches Bild über die letztendlich realistische äußere Genauigkeit liefert, wenn es sich beispielsweise um Wiederholungsmessungen handelt, bei der Korrelationen und systematische Einflüsse unberücksichtigt bleiben: Mit einer 1000-mal abgeschrittenen Strecke wird keine cm-Genauigkeit erreicht, auch wenn es das Wurzel- n -Gesetz auf den ersten Blick implizieren mag! Auch bei Netzausgleichungen liefert erst die Einbeziehung einer wirklichkeitsnahen Kovarianz- bzw. Gewichtsmatrix und die adäquate Berücksichtigung systematisch wirkender Effekte im funktionalen Modell sinnvolle Ergebnisse.

Das heißt, a priori müssen vernünftige Annahmen über die Unsicherheit der Beobachtungen und die Korrelationen getroffen werden. Es muss nicht betont werden, dass Herstellerangaben (oder Kalibrierwerte) für Instrumentengenauigkeiten die beim Messvorgang vorherrschenden Bedingungen nicht abbilden können, weil einerseits Störeinflüsse aus dem Umgebungsbedingungen nachteilig, besonders ausgeklügelte Messanordnungen auch vorteilhaft(er) wirken können. Insbesondere wenn Beobachtungen ungleichen Typs (hybride Beobachtungen) in einen Ausgleichsprozess zu vereinen sind, werden die Unwägbarkeiten und Schwierigkeiten bei der Aufstellung der Gewichtsmatrix offensichtlich. Teilweise lässt sich durch Varianzkomponentenschätzung diesen Unwägbarkeiten entgegen wirken, allerdings darf das Vertrauen auf die Redundanz in den Beobachtungen nicht zu hoch angesetzt werden. Als Beispiel sei eine „freie Netzausgleichung“ herangezogen, wobei das Netz den Maßstab des Entfernungsmessers übernimmt. Dieser sei aus der Kalibrierung mit einer (Standard-)Unsicherheit b bekannt. Folglich wird der Netzmaßstab zumindest mit der (Standard-)Unsicherheit b behaftet sein. Hinzu kommt die Unsicherheit

im Maßstab durch die Erfassung der meteorologischen Verhältnisse, die während der Messung variieren können. Hier treten demzufolge zwei unterschiedlich wirkende Effekte auf: Eine systematisch während des gesamten Projekts immer gleich wirkende Maßstabsabweichung, von der man lediglich weiß, dass sie mit 68 % Wahrscheinlichkeit irgendwo im Intervall $\pm b$ liegt, und eine statistisch verteilt (und damit unterschiedlich auf die einzelnen gemessenen Strecken) wirkende Maßstabsabweichung aus ungenügend erfasster Meteorologie. Um dies mit einer Varianzkomponentenschätzung abzubilden, müsste das funktionale Modell entsprechend erweitert werden. Dies führt zu komplexen Ansätzen, denn in diesem Fall muss die von Haus aus lineare Abhängigkeit der beiden Maßstäbe eliminiert werden. Zentrier- oder Antennenoffsets können ebenfalls nur durch eine aufwändige Modellierung getrennt werden, wobei sich nun die Fragen nach Überparameterisierung (im weitesten Sinn) und Redundanz stellen¹. Als einer von vielen weiteren derartigen Fällen sei die Berücksichtigung von Reflektorkonstanten bei der Bestimmung von Freiformflächen [HENNES, 2006] erwähnt. Weil nicht alle Einflussfaktoren stochastisch auf die Beobachtungen wirken, birgt auch die Varianzkomponentenschätzung das Risiko einer zu optimistischen Genauigkeitsaussage. Andererseits ist nach Meinung der Autorin die Gefahr der Überparameterisierung derartiger Modellansätze nicht zu unterschätzen. Letztendlich kann eine ausgeglichene Standardabweichung nur diejenigen Messabweichungen abbilden, die (zufällig) auch als variable Realisierungen im Datenmaterial auftreten – und dies ist nicht immer umfassend sichergestellt, weil teilweise systematisch wirkende, aber in ihrer Größe unbekannt, Effekte un-„beobachtet“ bleiben können. Deswegen empfiehlt sich ein ingenieurmäßiges Ableiten von wirklichkeitsnahen Unsicherheiten, die unmittelbar den Beobachtungsgrößen zuzuordnen sind (vgl. Abschnitt 3 und 5) und die unmittelbar in die Kovarianz- bzw. Gewichtsmatrix einfließen. Allerdings dürfen die aus statistisch-theoretischer Sicht geforderten Bedingungen an diese Daten (z.B. Normalverteilung) nur dann verletzt werden, wenn dies in der Interpretation des Endergebnisses entsprechend einfließt. Sobald an irgendeiner Stelle des stochastischen Modells die Forderung der Normalverteilung der Beobachtungen verletzt wird, darf keiner der üblichen statistischen Tests durchgeführt werden. Neben dem oben diskutierten Beispiel der Netzausgleichung mit EDM-Strecken werden bei genauerem Hinsehen bisher durchgeführte Tests in vielen Anwendungen fragwürdig.

5 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements)

5.1 Vorbemerkungen

Der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [DIN V ENV 13005, 1999] ist die übersetzte Fassung des Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements und hat sich unter dem Begriff GUM bereits weltweit in fast allen messenden Disziplinen etabliert, allerdings – und erstaunlicher Weise – nicht in der Geodäsie, obwohl dieser Leitfaden auf klassischen in der Geodäsie etablier-

¹ Bei Verwendung einer Zwangszentrierung während der gesamten Netzmessung kann die aus dem Restzentrierfehler resultierende Unsicherheit zum realen Punkt auch mittels leistungsfähiger Ausgleichungsprogramme gar nicht abgeschätzt werden, weil hierfür keine Messinformation vorliegt.



ten – und auch üblicherweise beachteten – Vorgehensweisen und Berechnungsschritten basiert. Auch von Instrumentenherstellern ist zu erwarten, dass zukünftig Instrumente unter Berücksichtigung des GUM spezifiziert werden. Der Leitfaden führt zu einer umfassenden Betrachtung von Einflüssen auf einen Messprozess und beschreibt die Varianzfortpflanzung auf eine Zielgröße. An geodätischen Beispielen demonstriert [HEISTER, 2002, 2005] die leitfaden-analoge Vorgehensweise; in eher theoretischen Betrachtungen zeigen [KUTTERER, SCHÖN, 2004] Einschränkungen in diesem Leitfaden auf.

5.2 Arbeitsschritte gemäß Leitfaden

Die Anwendung des GUM ermöglicht durch die umfassendere Berücksichtigung auftretender Störungen eine bessere Beurteilung der Qualität eines Messergebnisses oder einer abgeleiteten Größe (Zielgröße), weil neben rein stochastisch bedingten Unsicherheiten (d.h. aus Wiederholungsmessungen abgeleiteten Standardabweichungen) auch all jene, die aus ingenieurgeodätischem Erfahrungsschatz wirken, berücksichtigt werden. Der Leitfaden empfiehlt eine dem Geodäten recht bekannte Vorgehensweise, die sich in sechs Arbeitspakete gliedern lässt²:

- A. Zusammenstellung der Kenntnisse über die Messung und die Eingangsgrößen
- B. Modellierung der Messung (geodätisch: Aufstellen des funktionalen Modells)
- C. Einschätzung der relevanten Unsicherheiten (geodätisch: Aufstellung des stochastischen Modells)
- D. Berechnung der Zielparame-ter und der (kombinierten) Standardunsicherheiten (geodätisch: Varianzfortpflanzung)
- E. Berechnen der erweiterten Messunsicherheit
- F. Protokollieren des (Mess-)Ergebnisses mitsamt seiner Unsicherheit (Aufstellen und Bewerten des Messunsicherheitsbudgets).

Obwohl Arbeitspakete B–D dem Geodäten geläufig sind, sollen an dieser Stelle für alle Arbeitsschritte Hinweise gegeben werden, die das Potential des GUM verdeutlichen. In Schritt A sind die Messaufgabe und die ursächlich zu messende sowie die tatsächlich gemessene(n) Größe(n), das Messprinzip und das Messverfahren darzustellen. Unter Eingangsgrößen sind alle am Messprozess beteiligten Größen zu verstehen, die neben den Ergebnissen der direkten Messung das Messergebnis und die beigeordnete Messunsicherheit beeinflussen können. Hierzu gehören neben den bereits zitierten Herstellerangaben und Daten aus Kalibrier- und Prüfscheinen auch Erfahrungswerte (z.B. aus früheren Auswertungen, Literatur etc.).

Dies erleichtert in Schritt B und C die vollständige und umfassende Aufstellung des funktionalen sowie des stochastischen Modells erheblich. Diese beiden Schritte erfordern eine professionelle Einschätzung der Vorkenntnisse und ermöglichen eine sorgsamere und zielbewusstere Einbeziehung von Unsicherheiten, insbesondere bei der Handhabung des stochastischen Modells. Zunächst können neben der Normalverteilung weitere Verteilungen unterstellt werden. Für typische Verteilungen (Rechteck-

verteilung, die z.B. für grobe Digitalanzeigewerte anzuwenden ist, und Dreieckverteilung) gibt der GUM statistisch begründete einfache Transformationsformeln an, um aus den Intervallgrenzen Werte abzuleiten, die später als „Varianzen“ in die klassische Varianzfortpflanzung eingeführt werden können. Ein aus ingenieurgeodätischer Sicht bedeutsamer Vorteil des GUM besteht in den ausdrücklich zu berücksichtigenden (Mess-)Unsicherheiten, die nicht-statistischer Art sind und mit „Typ B“ bezeichnet werden. Zu Typ-B-Messunsicherheiten zählen beispielsweise auch Erfahrungswerte, Werte aus Kalibrierscheinen, stochastisch wirkende Störeinflüsse (vgl. Ishikawa-Diagramm) etc. Typ-B-Unsicherheiten dürfen alles enthalten, was nicht als empirische Standardabweichung bestimmbar ist. Letztere wird wiederum nach den geodätisch üblichen Auswertemethoden einer Beobachtungsreihe bzw. Wiederholungsmessung berechnet und mit „Typ A“ bezeichnet. Korrelationen sind nach den üblichen Methoden zu evaluieren. Auf diese Weise lässt sich die Charakteristik der Messaufgabe umfassend berücksichtigen, was in der Regel zu wesentlich gerechtfertigteren „stochastischen Modellen“ führt als die alleinige Ableitung aus redundant gemessenen Daten. Der Begriff „Unsicherheit“ macht den Charakter dieser genauigkeitsbeschreibenden Größe, die im Folgenden wie eine Standardabweichung behandelt wird, sehr deutlich. Als Standardabweichungen ausgedrückte Unsicherheiten werden mit Standardunsicherheiten bezeichnet (zur Unterscheidung von so genannten „erweiterten Unsicherheiten“, s.u.).

In Arbeitsschritt D werden die Zielparame-ter nach dem funktionalen Modell und die so genannte kombinierte Unsicherheit u der Zielgröße (Ausgangsgröße) nach dem klassischen Gauß'schen Varianzfortpflanzungsgesetz berechnet. Die partiellen Ableitungen (mit c_i bezeichnet) aller Einflussgrößen sollen, gemeinsam mit den Standardunsicherheiten der Eingangsgröße, in Tabellenform in Schritt F dargestellt werden. Die Analyse dieser Tabelle unterstützt die Einschätzung kritischer Größen. In die bekannte Gleichung der Varianzfortpflanzung werden als Standardabweichungen die Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen eingesetzt. Kovarianzen werden nach bekanntem Algorithmus berücksichtigt. Somit unterscheidet sich der Berechnungsprozess nicht vom üblichen Ablauf. Zu bemerken ist noch, dass der GUM – abgesehen von Mittelwertberechnungen aus Beobachtungsreihen – keine Ausgleichungsansätze behandelt, allerdings erlaubt er, wenn auch nicht ausdrücklich, so doch aus ingenieurmäßiger Sicht, die Kovarianzmatrix auch einer geodätischen Ausgleichung unter Berücksichtigung von Typ-B-Unsicherheiten zu füllen.

Die doppelte Standardmessunsicherheit u beschreibt das Intervall um die Zielgröße, in dem mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 68 % alle Werte liegen, die dem Ergebnis aufgrund der berücksichtigten Zusammenhänge vernünftigerweise zugeordnet werden können (entsprechend Vertrauensbereich und Vertrauensniveau, wenn alle eingeführten Standardunsicherheiten dem Typ A angehören). Die erweiterte Messunsicherheit (Schritt E) berücksichtigt nun die Forderung, eine Unsicherheit anzugeben, die ein Intervall beschreibt, in dem mehr (oder weniger) als 68 % der Werte liegen. Typisch

² Gliederung nicht streng nach GUM

für Metrologie und Maschinenbau sind 95 %. Dies ist nur streng möglich, wenn die Verteilung der Eingangsgrößen bekannt ist, was aber wegen der Zulassung von Typ-B-Unsicherheiten nicht immer der Fall ist. Für praktische Anwendungen wird nun Normalverteilung unterstellt, so dass durch Multiplikation der Standardunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ oder 3 eine so genannte erweiterte Unsicherheit U_{95} (bzw. U_{99}) erhalten wird³. Die Angabe des Ergebnisses und der Messunsicherheit sollte den Standards des GUM folgen, wobei unter anderem der Faktor k immer mit dem Ergebnis angegeben werden muss.

5.3 Bewertung

Als Vorteil des GUM wird die relativ einfache computer-gestützte Messunsicherheitsberechnung mit minimalen Rechenzeiten angesehen [SOMMER, SIEBERT, 2004], was jedoch für den Geodäten nichts Neues darstellt. Bedeutsamer ist, dass das Verfahren die systematische Behandlung von nicht-statistischer Information einschließt und dadurch eine realistischere und qualitativ hochwertigere Aussage über die erzielte Genauigkeit liefert, als wenn dieses Wissen vollständig ignoriert würde. Zwar hat diese Zusammenfassung von Standardunsicherheiten unterschiedlichen Typs zu zahlreichen Kontroversen geführt, aber die Verfahren zu ihrer Ermittlung lassen sich vereinheitlichen und mit der Bayes-Statistik identifizieren [DIN 1319, Teil 3, Anhang F und WEISER, WÖGER, 1999]. Der GUM unterstützt die geordnete Vorgehensweise zur Berechnung einer Unsicherheit durch die Vorgabe von leicht nachvollziehbaren Verfahrensschritten. Deswegen ist zu wünschen, dass dieser Leitfaden auch in der Geodäsie bei der Bewertung eines Messergebnisses im Kontext der gesamten Messaufgabe an Bedeutung gewinnen wird. Die bislang mit der gleichen Zielrichtung verwendeten Begriffe wie innere und äußere Genauigkeit bzw. Präzision und Genauigkeit sorgten zwar für eine gewisse Klarheit in den Aussagen, jedoch garantiert der Leitfaden die Ableitung einer umfassenderen Aussage hinsichtlich der erreichten Messunsicherheit. Darüber hinaus bietet er eine Kommunikationsgrundlage zu anderen Disziplinen.

Standardunsicherheiten können in gewohnter Weise wie eine Standardabweichung weiter benutzt werden. Wenn lediglich Typ-B-Unsicherheiten mit Normalverteilung involviert sind, können sie wie gewohnt in den in der Geodäsie verbreiteten (und Normalverteilung voraussetzenden) statistischen Tests in aller Strenge verwendet werden. Sobald Typ-B-Unsicherheiten mit Nicht-Normalverteilung involviert sind, ist dieser Nachteil gegenüber der eher pragmatischen Vorgehensweise abzuwägen, die den Vorteil bietet, durch die allgemeinen Typ-B-Unsicherheiten eine *umfassendere* Unsicherheitsangabe zu bestimmen. Messende Nachbardisziplinen anerkennen ebenfalls das Potential umfassender Genauigkeitsvorgaben, indem Entscheidungen in Prüfprozessen unter Berücksichtigung

von Messunsicherheiten unter eher pragmatischen Gesichtspunkten gefällt werden, die sachgerecht sind, aber nicht mehr einer geläufigen Testtheorie zugeordnet werden können. Im Hinblick auf zukünftige Messaufträge eines Ingenieurvermessers mag dieser Einblick hilfreich sein.

KUTTERER und SCHÖN [2004] diskutieren die Behandlung einer so genannten impräzisen Messgröße, d.h. einer Messgröße, die mit einer in ihrem tatsächlichen Wert unbekanntem Abweichung behaftet ist, von der bekannt ist, dass sie systematisch wirkt und in einem bekannten Intervall liegt. Der Vorschlag des GUM ist sehr pragmatisch, indem diese Größe als zufällige weiterbehandelt wird, indem sie in eine Standardunsicherheit transformiert wird, wobei eine Rechteckverteilung unterstellt wird. KUTTERER, SCHÖN [2004] analysieren diese Vorgehensweise. Sie betrachten das Zusammenwirken eines rein zufälligen Anteils (mit der Standardabweichung σ) und einem systematisch wirkenden Anteil (rechteckverteilt innerhalb des Intervalls $\pm \Delta$) und stellen fest, dass bei etwa gleich großen Anteilen ($\sigma = \Delta$) der Modellfehler vernachlässigbar ist, weil sich die resultierenden Konfidenzintervalle nach GUM um weniger als 1 % von den streng berechneten unterscheiden. Erst bei $\Delta = 3\sigma$ differieren die Konfidenzintervalle merklich (bei 95 % Wahrscheinlichkeit um 7 %, bei 99 % um 15 %). Dem resultierenden Unsicherheitsmaß kann *keine* Normalverteilung unterstellt werden und deswegen können Hypothesentests streng nicht in üblicher Weise durchgeführt werden. Deswegen empfiehlt es sich, bei großen systematisch wirkenden Anteilen und großer Bedeutung von Testergebnissen hoher Wahrscheinlichkeit alternative Verfahren, beispielsweise die Intervallmathematik anzuwenden. Die Vorgehensweise erfolgt dann analog den Schritten A–F, wobei D mittels intervallmathematischer Methoden erfolgt, die beispielsweise in [SCHÖN, 2003] beschrieben sind.

6 Monte-Carlo-Methode

6.1 Motivation

Die Monte-Carlo-Methode bietet einen intuitiven Zugang zu der Wirkung von Messabweichungen auf ein Endergebnis und erscheint Laien auf dem Gebiet der Varianzfortpflanzung in der Regel plausibler, weil nach dem Zufallsprinzip durch rechnergestützte Simulation mit einer Vielzahl von streuenden Beobachtungen quasi in einem virtuellen Experiment deren Einfluss auf das Endergebnis ermittelt wird. Ein Beispiel hierfür ist die so genannte „virtuelle KMM“, ein Softwarepaket, das auf diese Weise das Verhalten einer Koordinatenmessmaschine simuliert und es ermöglicht, die Unsicherheit einer Objektgeometrie mit geringem Aufwand anzugeben [WÄLDELE, SCHWENKE, 2002]. Für Lasertracker wird derzeit an einem solchen Softwarepaket gearbeitet.

6.2 Wesen

Bei der Monte-Carlo-Methode wird sichergestellt, dass die Stichproben eines Einflussfaktors seiner – möglicherweise auch physikalisch vorgegebenen – Verteilung genü-

³ Eine unkomplizierte Methode, Informationen über die resultierende Verteilungsfunktion zu erhalten, liefert die Monte-Carlo-Methode (vgl. Abschnitt 6).

gen. Die Berücksichtigung der Verteilung wird in [SIEBERT, SOMMER, 2004] anschaulich beschrieben und ist leicht programmtechnisch zu realisieren. Mit jeder einzelnen dieser m Stichproben wird das funktionale Modell durchgerechnet und man erhält m Ergebnisse. Das arithmetische Mittel wird als Erwartungswert angesehen und die Standardabweichung bzw. Standardunsicherheit nach dem bekannten Verfahren berechnet. Aus dem Häufigkeitsdiagramm der simulierten Abweichungen lässt sich die Verteilung des Endergebnisses ableiten, die ja nicht notwendig mit der Normalverteilung übereinstimmen muss, selbst wenn die Eingangsgrößen der Normalverteilung genügen. Dies soll folgendes Beispiel verdeutlichen. Zwei Maßstäbe mit bekannter Referenzlänge werden aneinandergesetzt, um die Summenlänge als Referenzlänge zu realisieren (auch anwendbar auf Klappnivellierlatten, geknickte Basislatten, Abbé'sches Komparatorprinzip etc.). Weil die gegenseitige Ausrichtung beider Stäbe nur mit gewissen Abweichungen realisierbar ist, wird bereits allein aus der Anschauung klar, dass die resultierende Länge wegen des von 180° abweichenden Knickwinkels immer kürzer oder gleich, aber nie länger als die Summe beider Längen wird. Die Monte-Carlo-Methode kommt unmittelbar zu demselben Ergebnis, während die klassische Varianzfortpflanzung eine Normalverteilung um den Summenwert vortäuschen würde. Die klassische Varianzfortpflanzung würde also vortäuschen, dass durch ungeradlinige Ausrichtung beider Referenzmaßstäbe auch Summenlängen realisiert werden, die länger sind als der Erwartungswert – was offensichtlich falsch ist und aus der Vernachlässigung höherer Terme bei der Linearisierung resultiert. Darüber hinaus können natürlich noch Unsicherheiten aus der Referenzlänge selbst etc. auftreten, die mit ihrer eigenen Charakteristik fortzupflanzen sind. Hier liefert die Monte-Carlo-Methode elegant eine sinnvolle Information über die Verteilung der Abweichungen in der Summenlänge. Dies vermindert Fehleinschätzungen beispielsweise beim Entscheid über die Einhaltung von Passungen gefügter Bauteile.

Neben der hier bereits erwähnten Berechnungsmöglichkeit der (approximierten) Verteilungsfunktion des Endergebnisses und der einfachsten Berücksichtigung beliebiger Verteilungsfunktionen der Eingangsgrößen sind als weitere Vorteile der Monte-Carlo-Methode die folgenden zu nennen: Die Wirkung der Eingangsparameter auf das Messergebnis muss nicht als geschlossene analytische Funktion angegeben werden. Es ist keine Linearisierung erforderlich, weswegen auch die Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung nicht zu trügerischen Ergebnissen führen kann. (Beispielsweise wird nach dem klassischen Ansatz der Varianzfortpflanzung die Standardabweichung eines Produktes aus zwei Beobachtungen zu 0 berechnet, wenn die Beobachtungen den Wert 0 annehmen, unabhängig davon, wie groß die Standardabweichung der Beobachtungen ist. Anhang C der DIN 1319 Teil 3 weist darauf hin.) Korrelationen können problemlos berücksichtigt werden; selbst die Funktion digitaler Filter kann nachempfunden werden. Prinzipiell können mit der Monte-Carlo-Methode auch Kovarianzen zwischen zwei Ausgangsgrößen bestimmt werden, indem beide jeweils paarweise mit demselben Stichprobensatz für die Ein-

gangsparameter berechnet werden. Dem stehen folgende Nachteile gegenüber: Bei komplexen funktionalen Modellen steigt der Rechenaufwand erheblich und die Qualität der nach der Monte-Carlo-Methode berechneten Standardunsicherheiten hängt von der Anzahl der Stichproben ab. Deswegen ist abzuwägen, inwieweit die sachgerechte Berücksichtigung spezieller Verteilungen (in den Beobachtungen als auch im Ergebnis) im Vordergrund steht oder ob die komfortabel berechnete Unsicherheit nach Varianzfortpflanzung wichtiger ist (beispielsweise bei vergleichsweise geringer zur Verfügung stehender Rechnerleistung und unkritischen Verteilungen). Interessanterweise nutzt das Softwarepaket Spatial Analyzer (New River Kinematics) für die Auswertung geometrischer Daten klassische geodätische Ausgleichsalgorithmen, wobei aber bei der Berechnung der Standardabweichungen der Zielparаметer (Koordinaten) die Monte-Carlo-Methode verwendet wird.

Es kann auch durchaus lohnen, mit der Monte-Carlo-Methode die Berechnung nach GUM zu überprüfen⁴, um Unzulänglichkeiten der Varianzfortpflanzung aufzuspüren. Allerdings können die Standardabweichungen selbst bei $m = 100\,000$ Stichproben noch um ca. 20 % differieren (Beispiel in [ACKO, GODINA, 2000]). Oftmals wird $m = 10^6$ als vernünftig angesehen. Es ist eine Ergänzung zu GUM in Arbeit, die die Monte-Carlo-Methode integriert.

6.3 Beurteilung

Die Monte-Carlo-Methode liefert folgende Vorteile: Die Verteilungen der Eingangsparameter (nicht notwendig normalverteilt) werden intuitiv richtig berücksichtigt und im Ergebnis wird außerdem die Verteilung der (bzw. des) Zielparаметer(s) erhalten. Dies wird beispielsweise bedeutsam bei Entscheidungen über Passungen. Darüber hinaus treten keine Fehlkalkulationen der Messunsicherheit in den Fällen auf, in denen die klassische Methode der Varianzfortpflanzung wegen der Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung versagt. Im Hinblick auf die Berücksichtigung störender Einflussfaktoren auf einen Messprozess bzw. die Zielgröße ist die Art der funktionalen Abhängigkeit entscheidend: bei speziellen Anordnungen und Situationen ist die Monte-Carlo-Methode der klassische Varianzfortpflanzung weitaus überlegen. Allerdings sind die Rechenzeiten nicht zu vernachlässigen, was allerdings mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Prozessoren nicht mehr bedeutsam sein sollte. Die Monte-Carlo-Methode ist bei Eichinstituten anerkannt und von sehr vielen anderen Disziplinen als leicht nachvollziehbare Methode beliebt.

7 Fazit

Die von Geodäten vielfach als konkurrierend empfundene Vielzahl an verwendeten Genauigkeitsmaßen stellt sich bei näherer Betrachtung als einander ergänzend heraus.

⁴ Dies gilt weniger für etablierte Netzausgleichsprogramme mit typischen Datensätzen, sondern für Unsicherheitsangaben, die in Ingenieurprojekten aus heterogenen und hybriden Daten abgeleitet werden müssen.

Jedes Genauigkeitsmaß hat seine Berechtigung, wobei jeweils das Verständnis über seine Aussagekraft vorausgesetzt wird. Aus der jeweiligen Fragestellung ergibt sich, welches Maß als das sinnvollste und vernünftigste anzusehen ist. Auch die Wahl der Berechnungsmethoden der resultierenden Unsicherheit (Unsicherheitsfortpflanzung oder Monte-Carlo-Methode) hängt wesentlich von den Randbedingungen und den Anforderungen an das Ergebnis ab. Der Vorgehensweise nach GUM und nach der Monte-Carlo-Methode wird häufig vorgeworfen, dass die resultierenden Unsicherheiten nicht notwendig normalverteilt seien und demzufolge klassische (in der Geodäsie typischerweise verwendete) Hypothesentests nicht unmittelbar anzuwenden sind. Hier muss der Anwender entscheiden, welche Randbedingungen zu einer aus ingenieurmäßiger Sicht zweckmäßigeren Aussage führen: Es kann durchaus sein, dass die Mitberücksichtigung (großer) nicht-normalverteilter Einflüsse (nach GUM oder Monte-Carlo) zu einer verlässlicheren Aussage führen, auch wenn die üblichen statistischen Testverfahren versagen: Denn die Aussage eines Tests wird zumindest fragwürdig, wenn von vorneherein nicht alle Unsicherheitskomponenten in die Kalkulation eingeführt werden. Die Monte-Carlo-Methode ist ebenfalls zu bevorzugen, wenn die Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung in der klassischen Varianzfortpflanzung zu Modellfehlern führen: Im Falle normalverteilter Größen könnte dann zwar die bekannte Teststatistik angewendet werden, aber die Finesse eines stringenten (klassischen) Tests ist bedeutungslos, wenn im Verfahrensansatz bereits Modellfehler von 50 % gemacht werden (vgl. Beispiel zur Aneinanderfügung von Referenzmaßstäben) und kann fatal enden, wenn beispielsweise Passungsprüfungen Ziel einer Vermessung sind. Hier entsteht der Wunsch nach der Implementierung geeigneter Routinen in Standardauswerteprogramme, wobei es dann dem Anwender obliegen wird, neben den Messdaten auch deren Verteilung sinnvoll zu übergeben. Da zukünftig auch die Monte-Carlo-Methode im GUM verankert sein wird, und der GUM vom Prinzip her die klassische Varianzfortpflanzung beinhaltet und gleichzeitig eher den Ansprüchen eines ingenieurgeodätisch tätigen Anwenders genügt, wird die Beherrschung des GUM dringend empfohlen. Dies sowie die Auseinandersetzung mit den übrigen erwähnten Standards verschafft dem Geodäten eine dringend notwendig gewordene Kommunikationsbasis in der Auseinandersetzung mit anderen Disziplinen.

Literatur

- [1] ACKO, B.; GODINA, A. [2005]: Verification of the Conventional Measuring Uncertainty Evaluation Model with Monte Carlo Simulation.. International Journal of Simul. Model.; H. 4, S. 76–84
- [2] DUTSCHKE, W.; KEFERSTEIN, C. P. [2005]: Fertigungsmesstechnik. 5. Auflage, Teubner-Verlag, Wiesbaden
- [3] FRADEN, J. [1996]: Handbook of Modern Sensors. Springer Verlag, New York
- [4] HEISTER, H. [2006]: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). 72. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning, 9.–10.11.2006 Fulda, Band 51, S. 35–44, Wißner-Verlag
- [5] HEISTER, H. [2005]: Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen. Géomatique Suisse, Teil 1 S. 604–607, Teil 2: S. 670–673

- [6] HEISTER, H. [2002]: Zu Genauigkeitsangabe bei geodätischen Instrumenten. Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte zur Emeritierung. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, S. 73–82
- [7] HENNES, M. [2006]: Zur Flächenrückführung mit Lasertrackern. Seminar Terrestrisches Laser-Scanning. DVW Mitteilungen Bd. 51/2006, S.201–112
- [8] KUTTERER, H.; SCHÖN, S. [2004]: Alternativen bei der Modellierung der Unsicherheit beim Messen. ZfV 6/2004, S. 389–398
- [9] PHILLIPS, S. [2006]: Laser Tracker Standards Update and NIST 60 m Ranging Facility. In: Proceedings of the 3rd NIST Workshop on the Performance Evaluation of 3D Imaging Systems. March 2–3, 2006, NISTIR 7357
- [10] PROFOS, P.; PFEIFER, T. [1997]: Grundlagen der Meßtechnik. Oldenbourg Verlag, München Wien, ISBN 3-486-24148-6
- [11] SCHÖN, S. [2003]: Analyse und Optimierung geodätischer Messanordnungen unter besonderer Berücksichtigung des Intervallansatzes. Diss. Universität Karlsruhe, DGK, Reihe C, 567
- [12] SOMMER, K.-D.; SIEBERT, B. [2004]: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. Technisches Messen, S. 52–65, Oldenbourg Verlag
- [13] WÄLDELE, F.; SCHWENKE, H. [2002]: Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis (Automated Calculation of Measurement Uncertainties on CMMs – Towards Industrial Application). Technisches Messen, S. 550–557
- [14] WEISER, K.; WÖGER, W. [1999]: Messunsicherheit und Messdaten. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim
- [15] WITTE, B. [1986]: Zur Problematik der „inneren“ und „äußeren“ Genauigkeit elektrooptischer Distanzmesser. AVN, 1/1986
- [16] WOSCHITZ, H. [2003]: System Calibration of Digital levels: Calibration Facility, procedures and Results. Shaker-Verlag, Aachen
- [17] NN [1994]: Internationales Wörterbuch der Metrologie. 2. Aufl., Herausgeber: DIN, ISBN 3-410-13086-1

Normen und Standards:

- [18] ASME B89.4.19 [2006]: Performance Evaluation of Laser Based Spherical Coordinate Measuring Systems. American Society of Mechanical Engineers, New York
- [19] DIN 1319 [2005]: Teil 2: Grundlagen der Messtechnik – Begriffe für Messmittel. Beuth-Verlag
- [20] DIN 1319 [1996]: Teil 3: Grundlagen der Messtechnik – Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit. Beuth Verlag
- [21] DIN V ENV 13005 [1999]: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. ENV 13005. Beuth-Verlag, Berlin
- [22] DIN EN ISO 14253-1: Prüfung von Werkstücken und Messgeräte durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, Beuth-Verlag, Berlin
- [23] DIN 55350 [1987]: Teil 13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen. Beuth-Verlag
- [24] ISO 10360 [2003]: Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary, Part 2: Part 2: CMMs used for measuring size. Beuth-Verlag
- [25] ISO 17123: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Intern. Organization for Standardization, Switzerland

Herstellerinformationen:

- [26] FARO [2007a, b, c]: <http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=news&item=60&tab=2> und Techsheet vom 27.4.2006, herunterladbar von <http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=pro&item=3&subitem=7&tab=2>, zuletzt besucht 13.2.2007 und persönliche Kommunikation

Anschrift der Verfasserin:

Prof. Dr.-Ing. M. Hennes, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe, Englerstr. 7, D-76128 Karlsruhe, 0721-6082300, fax -6552, hennes@gik.uni-karlsruhe.de, www.gik.uni-karlsruhe.de