



# Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie

M. Hennes und H. Heister



## 1 Motivation

Die in der Metrologie hochgeschätzte *Kunst des Messens* wird in den Ingenieurdisziplinen zur Kunst des *adäquaten* Messens. Dies bedeutet, dass das „Wofür“ im Vordergrund steht und erst durch entsprechend präzise Aufgabenstellungen „gute“, d.h. zielgerechte Messungen hervorgebracht werden können. Da die Messaufgaben der Ingenieurgeodäsie nicht aus der Geodäsie selbst stammen und normalerweise auch die Forderung einer bestimmten Unsicherheit des Messergebnisses enthalten, wird die Auseinandersetzung mit Genauigkeitsmaßen anderer Fachdisziplinen zwingend erforderlich. Auch die in der Geodäsie eingebürgerten Genauigkeitsmaße sind hinsichtlich ihrer Bedeutung und Aussagekraft für spezielle Messaufgaben einerseits und artfremde Aufgabenstellungen andererseits zu hinterfragen. Adäquates Messen fordert deswegen einerseits die ingenieurmäßige Durchdringung der Genauigkeitsforderungen und *der damit verbundenen* Genauigkeitsmaße, um diese sachgerecht anzuwenden, andererseits die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit *möglichen* Genauigkeitsmaßen, um diese entsprechend fortzuentwickeln.

Das Messen wird zukünftig immer mehr Bedeutung erlangen, sei es als Basis für Abrechnungen, zum Treffen von Entscheidungen oder zur Generierung von Mehrwert. [KUNZMANN et al, 2005] führen hierfür den Begriff *produktive Metrologie* ein. Deswegen wird die Chance, die in der (Ingenieur-)Geodäsie ausgeprägte Metrologiekompetenz in Nachbardisziplinen erfolgreich einzubringen, erhalten bleiben. Aktuell öffnet die steigende Akzeptanz optischer Messsysteme, die weitgehend auf den in der Geodäsie bekannten Prinzipien beruhen, die Türen im

Maschinenbau. Hier, sowie im Bauwesen, stellen immer enger werdende Toleranzen steigende Anforderungen an die Qualität der Messergebnisse. Als quantitatives Genauigkeitsmaß kommt der Messunsicherheit, die in unterschiedlichen „Dialekten“ angegeben sein kann, besondere Bedeutung zu. An dieser Stelle ist der Ingenieurgeodät mit seiner Kompetenz gefordert, diese Dialekte richtig zu interpretieren und eine Abstimmung anzustreben bzw. sich international anerkannten Begriffen anzupassen.

Aus geodätischer Sicht steht ein Paradigmenwechsel bevor: In der Vergangenheit wurde davon ausgegangen, dass die Instrumentengenauigkeit den größten Teil des Fehlerbudgets ausmachte und dass die durch Wiederholungsmessungen erzeugten Stichproben normalverteilt waren. Dies rechtfertigte die Ableitung und statistische Bewertung von Genauigkeitsmaßen nach den klassisch bekannten Verfahren – was ja auch völlig richtig ist, solange sich alle Störeinflüsse in den redundanten Beobachtungen normalverteilt niederschlagen. Heute bildet die Instrumentengenauigkeit oftmals nicht mehr den überwiegenden Anteil des Fehlerbudgets und somit auch nicht mehr den limitierenden Genauigkeitsanteil. Neben systematischen Messabweichungen können auch Modellabweichungen zu nicht-normalverteilten Messgrößen führen. Deswegen kann in einer Ausgleichung redundanter Beobachtungen in der Regel das gesamte stochastische Verhalten nicht abgebildet werden, was adäquatere Strategien bei der Bestimmung von Genauigkeitsmaßen erfordert. Der Paradigmenwechsel wird vollzogen sein, wenn sich diese Strategien, die wahrscheinlich aus Kombinationen unterschiedlicher Verfahren bestehen werden, durchgesetzt haben. Zuvor gilt es, die Trends in der Messtechnik und der Ingenieurvermessung bezüglich der Anforderungen an zukünftige Verfahren der Genauigkeitsbestimmung zu analysieren und entsprechende Methoden im Konsens mit anderen Fachdisziplinen zu entwickeln.

## 2 Genauigkeitsmaße im Kontext von Messtechnikrends

### 2.1 Vorbemerkungen

Dieser Abschnitt wird exemplarisch Aspekte aufzeigen, die die Ableitung und Angabe von Genauigkeitsmaßen beeinflussen. Er erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Beispiele sind überwiegend aus den Arbeitsge-

bieten der Autoren gewählt, die Bereiche wie z.B. GIS und Facility Management werden daher vollständig ausklammert.

## 2.2 Relevante Trends in der Ingenieurvermessung

### 2.2.1 Funktions- und eigenschaftsorientiertes Messen

Versteht sich der Ingenieurgeodät als Vermessungsingenieur im wörtlichen Sinn, besetzt er Aufgabenfelder, die die Funktion eines Objektes oder seiner Eigenschaft einbeziehen. Die Vermessung eines Teilchenbeschleunigers ist hierfür ein klassisches Beispiel: Es geht nicht um die Absteckung nach *absoluten* Koordinaten, sondern die Funktion erfordert lediglich die *ungefähre Anpassung* von Bauteilen an die projektierte Magnetposition, wobei jedoch die entstehende Teilchenbahn „ausreichend glatt“ sein muss – was trotz der lapidaren Formulierung immer noch eine extreme Herausforderung in Anbetracht der hohen Genauigkeitsforderungen ist. Die primäre Vermessungsleistung besteht also darin, die Forderung „ausreichend glatt“, zunächst vorliegend in elektrischen Größen, in geometrische Größen umzusetzen. Wenn einfache physikalische Gesetzmäßigkeiten gelten, gelingt die Umsetzung der Funktionsforderung in geometrische Größen wesentlich einfacher. Dies demonstriert das folgende Beispiel. Traditionell wird die Abnahmevermessung von (Zylinder-)parabol„spiegeln“, die ein Mikrowellenfernfeld erzeugen sollen, mit der Bestimmung eines Koordinatensatzes gleichgesetzt. Dieser beschreibt geometrisch die Oberfläche der Parabole, um dem Hersteller die Justierung der einzelnen Paneele des Spiegels zu ermöglichen. Da aber für Mikrowellen in diesem Zusammenhang ausreichend genau die Gesetze der geometrischen Optik gelten, lässt sich die optimale Position des (Zylinder-)parabols relativ zum speisenden Mikrowellensender recht einfach bestimmen, womit auch die Justieraufgabe erheblich vereinfacht werden kann: Denn nun kann allein durch die Bestimmung der Absteckelemente für die Module basierend auf den tatsächlichen Parabolparametern bereits ein Fernfeld (paralleles Strahlenbündel) mit ausreichender Qualität erzeugt und die Justierarbeit an einzelnen Paneelen minimiert werden. Als Genauigkeit ist letztendlich die erreichte Qualität des Fernfeldes anzugeben.

Die Auseinandersetzung mit der Funktion des Objektes wird immer häufiger erforderlich, um die Kernaufgabe der Vermessung zu erfassen und adäquat lösen zu können. Naturgemäß können die hiermit verbundenen Forderungen an die Messqualität auch nicht-geometrischer Natur sein, und sie richten sich nur in den seltensten Fällen nach dem geodätischen Sprachgebrauch. Um derartige Aufträge sinnvoll und effizient bearbeiten zu können, ist die Aneignung von metrologischen Standards wie z.B. GUM [DIN V ENV 13005 ,1999; ISO, 1995], VIM [ISO, 2001] eine wesentliche Grundlage.

### 2.2.2 Kinematisches Messen

Unter kinematischem Messen soll die Bestimmung der Relativbewegung zwischen dem Objekt und dem Messsystem oder auch umgekehrt verstanden werden. Die aktu-

elle Instrumentenentwicklung erschließt heute eine Vielzahl an Aufgaben, bei denen der Echtzeitananspruch sehr unterschiedlich sein kann. In der Regel wird dabei einer Folge von Positionen jeweils ein Zeitpunkt (und eventuell auch eine Objektorientierung) zugewiesen, d.h. eine Trajektorie bestimmt. Positions- und Zeitangabe sind über die Bewegungsgeschwindigkeit streng korreliert. Die Messaufgabe entscheidet, welche der unterschiedlichen Betrachtungsweisen „zu welchem Zeitpunkt ist definierte Position erreicht“ oder „an welchem Ort befindet sich das Objekt zu einem definierten Zeitpunkt“ zu bevorzugen ist. Da sowohl die Erfassung der geometrischen Größen als auch der Zeit einer gewissen Unsicherheit unterliegt, müssen beide Unsicherheitstypen auf die Zielgröße vereinigt werden. Hierbei ist zu klären, wie der Echtzeitananspruch definiert ist, denn hier kommen auch einseitige (nicht-früher-als- bzw. nicht-später-als-Beziehungen) und gleichmäßige Verteilungen in Betracht. Hohe Geschwindigkeiten erfordern die Berücksichtigung der Latenzzeiten zwischen der sensorischen Erfassung der einzelnen Messelemente und dem Datentransferzeitpunkt. Sobald ein Regelungsprozess involviert ist, z. B. in der Navigation, wird nicht nur die Synchronisation der für die raumzeitliche Erfassung benötigten Sensoren erforderlich (was üblicherweise bereits durch das 3D-Messsystem annähernd gelöst sein kann), sondern auch zu den weiteren am Prozess beteiligten Akteuren (und Sensoren). Deswegen müssen messprozessesstartende Trigger-Signale und deren Wirkung in die Unsicherheitsbudgetierung mit einbezogen werden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass oftmals die Bewegungsrate des Objekts und die erwünschte Datenrate so groß sind, dass es nicht möglich ist, zur Redundanzhöhung Wiederholungsmessungen durchzuführen, um die Positionsunsicherheit zu reduzieren. Derartige Wiederholungsmessungen erfüllen nicht mehr die Forderung nach Stationarität, sie müssen vielmehr als Beobachtung eines neuen Zustandes bzw. einer veränderten Geometrie angesehen werden.

### 2.2.3 Objektgebundenes und flächenhaftes Messen

Zukünftige Aufgabenstellungen werden – bis auf Ausnahmen – das Vermessungsnetz auch als Referenzrahmen mehr und mehr verdrängen, weil Hard- und Softwarelösungen eine erheblich größere Flexibilität erlauben und gleichzeitig die notwendige messtechnische Adaption an das Messobjekt, eine der speziellen Herausforderungen der Ingenieurgeodäsie, vereinfachen. Ingenieurvermessung wird sich immer weniger auf diskrete (und künstliche) Punkte am oder auf dem Objekt, sondern mehr und mehr ganzheitlich auf das Objekt selbst fokussieren. Dies wird zu objektimmanenten Referenzrahmen führen, die aus dem Objekt selbst heraus definiert sind, beispielsweise als Definition aus drei sich schneidenden Flächen oder anderen der Messaufgabe sinnvoll angepassten Konstruktionen. Derartige Definitionen sind in Nachbardisziplinen durchaus üblich und finden zunehmend auch Eingang in die geodätische Denkweise durch die vermehrte Nutzung von Punktwolken beim Laserscanning. Dies bedeutet, dass die Genauigkeitsmaße nicht mehr für Fixpunktfelder, sondern für andere referenzrahmendefinierende (abgelei-

tete) Elemente berechnet werden müssen. Eine besondere – und noch zu lösende – Herausforderung ergibt sich, wenn zur Definition des Referenzrahmens am Objekt dieses über die Erfassung von Freiformflächen in ein gegebenes CAD-Modell transformiert werden muss, denn für die Varianzfortpflanzung der Genauigkeit der Punktwolke auf die Freiformflächenmodellierung nach klassisch geodätischer Methode liegen erst wenige Arbeiten vor [Ansätze z.B. in NUCKELT, 2007]. Die erreichbare Genauigkeit flächenhafter messender Systeme könnte besser ausgeschöpft werden, wenn die – mittlerweile doch vermehrt ermittelten – Kalibrierparameter von flächenmessenden Systemen (Laserscannern) auch entsprechend vollständig und durchgängig von den Auswertesoftwarepaketen berücksichtigt würden. Auf der anderen Seite ist die Kalibrierung von Laserscannern noch nicht wirklich standardisiert. Mangelnde Standardisierung trifft auch auf die Spezifizierung ihrer Leistungsfähigkeit und ihre Prüfung; als Beispiel für eine der wenigen Standards sei die VDI/VDE-Richtlinie 2634 genannt, siehe [HEISTER, 2006]. Diese basieren – in der Geodäsie noch ungewöhnlich – auf objekt- und nicht messelementspezifische Genauigkeitsmaße.

#### 2.2.4 Bauen im Bestand/Reverse Engineering

Die Ingenieurgeodäsie nimmt in den – scheinbar sehr unterschiedlichen – Bereichen „Bauen im Bestand“ und „Reverse Engineering“ die gleiche Aufgabe wahr, nämlich die Aufnahme (Vermessung) eines bestehenden Objektes, um die aktuelle Geometrieinformation für die Strukturanalyse, Modifikation, Um- oder Neugestaltung zu nutzen. Abhängig von Zweck und Objekttyp werden die Geometrieinformationen entweder als Parameter von Regelgeometrien (Ebenen, Kugeln, Zylinder, etc.) und Flächen höherer Ordnung abgeleitet oder als Freiformfläche extrahiert. Weil beide Kategorien CAD-System-kompatibel sein müssen, wird die Nutzung von Freiformflächen auch in der Architektur zukünftig vermehrt Verbreitung finden. Die Qualität des erzeugten Geometriemodells ist in beiden Fällen nicht nur von der verfügbaren Messgenauigkeit, sondern auch von der gewählten Punktdichte abhängig. Für diese Aufgaben sind zur Zeit noch keine Standards verbreitet, selbst bei der Spezifizierung von Messsystemen bleibt es oft bei der Angabe der Genauigkeit und/oder der Auflösung der Messelemente, oder selten, objektbezogenen Genauigkeitsmaßen. Auch in den Softwarepaketen zur Flächenextraktion ist die Varianzfortpflanzung, wenn überhaupt, nur rudimentär verankert. Da die wissenschaftliche Bearbeitung derartiger Problemstellungen in den Nachbardisziplinen weitaus fortgeschrittener ist, könnte sie die Ingenieurgeodäsie bereichern, z. B. [LI, LUI, 2003; KONG et al, 2007, FORBES 2006, CHEUNG et al, 2006].

#### 2.2.5 Hybride Messsysteme

Zukünftig werden vermehrt aus verschiedenen Messsystemen zusammengesetzte Beobachtungsanordnungen die Ingenieurgeodäsie bereichern, weil sie durch ihre jeweils unterschiedlichen Möglichkeiten sowie Vor- und Nachteile einander positiv ergänzen und unterstützen. Gerade

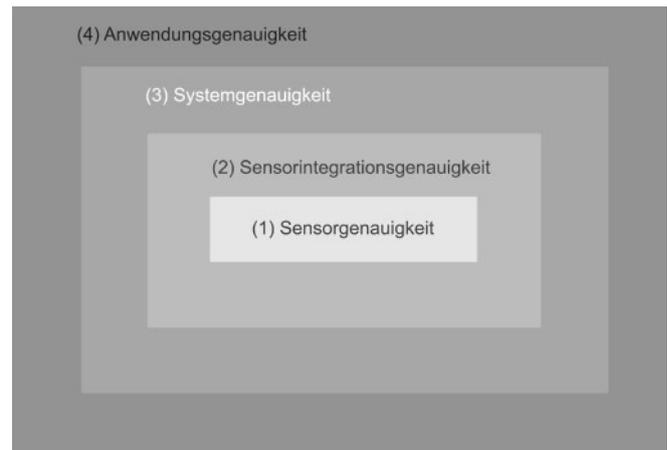


Abb. 1: Modifiziertes Vierschalenmodell zur strukturierten Erfassung von Messunsicherheitskomponenten von hybriden Messsystemen

in automatisierten Messprozessen wird die zunehmende Forderung nach Integrität den Einsatz hybrider Messsysteme bedingen. Für die Ableitung von Genauigkeitsmaßen bedeutet dies, dass das zum Tragen kommende Varianz-Kovarianzmodell äußerst sorgfältig abgewogen sein muss, um allen Messprozessen im Einzelnen und in ihrer Kombination gerecht zu werden.

Die Verallgemeinerung des OSIS-Vierschalenmodell (OSIS = Optical Sensor Interface Standard, [KEFERSTEIN et al., 2003]) für mehrere Sensoren kann ein Gerüst bilden, um alle beteiligten Unsicherheitskomponenten sachgerecht zu integrieren und dem Anwender die Möglichkeit einer objektiven und systematischen Erfassung der Messunsicherheitskomponenten zu ermöglichen. In Schale 1 wird der Sensor bzw. ein einzelnes beteiligtes Messsystem betrachtet, das jeweils getrennt anhand seiner Leistungsfähigkeit gemäß der zutreffenden Standards und Prüffregeln zu spezifizieren ist. Schale 2 enthält alle zusätzlichen Einflüsse, die durch die Integration mehrerer Sensoren/Messsysteme auftreten können, wie z.B. gegenseitige Erwärmung, elektrische Störungen, Vibrationen, Synchronisationsfehler etc. An dieser Stelle sind für das hybride Messsystem spezifische Prüffregeln zu entwickeln, um entsprechende Genauigkeitsmaße abzuleiten. Schale 3 beschreibt die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, wobei hier schon gegenseitige Stützung und Redundanzen zu berücksichtigen sind. Schale 4 dient zur Erfassung aller äußeren Einflüsse, wobei als Regelwerk der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) hilfreich sein wird.

## 2.3 Trends in der Metrologie

### 2.3.1 Produktive Metrologie und Prüfprozessfähigkeit

Fertigungstechnische Prozesse werden heute mit Methoden der statistischen Prozessregelung (SPC, Statistic Process Control) gelenkt und optimiert. Hierbei werden auf so genannten Qualitätsregelkarten verschiedene Stichprobenkennwerte (z.B. Mittelwert und Standardabweichung) als Zeitreihe dargestellt sowie Eingriffsgrenzen markiert (z.B.  $2\sigma$  als Warngrenze und  $3\sigma$  als Eingriffsgrenze).

Diese werden aus den vorhandenen Prozessdaten berechnet und spiegeln somit *nicht* den Toleranzbereich wider. Diese Zeitreihen werden nach festgelegten Kriterien analysiert, um Rückschlüsse auf den Fertigungsprozess zu gewinnen und ihn ggf. entsprechend zu lenken. Aus der Toleranzweite bzw. der minimalen Prozessgrenznähe (minimale Differenz zwischen Prozessmittelwert und oberem bzw. unterem Grenzwert) und der Prozessstreuung werden Prozessfähigkeitsindices ( $c_p$  und  $c_{pk}$ ) abgeleitet, die in direkter Beziehung zur Fehlerrate stehen. Sie ermöglichen die Bewertung unterschiedlicher Prozesse sowie den Vergleich des Prozessverhaltens und führen letztendlich zu Prozesslenkungsentscheidungen. Da nun naturgemäß auch die Erfassung des (Fertigungs-)prozesses durch die Messunsicherheit überlagert ist, werden die Prozessfähigkeitsindices verfälscht. Deswegen werden nun Prüfprozesse als solche nach festgelegten Verfahren analysiert und analog die Messmittelfähigkeitsindices berechnet. Wenn diese Analyse des Messprozesses diesem eine hohe Qualität bescheinigt, ist er prüfprozessfähig. Es ist nun zu untersuchen, inwieweit diese Methoden auch geeignet sind, die Messinstrumente und -methoden der Ingenieurgeodäsie zu bewerten.

### 2.3.2 Aufteilung von Toleranzen

Der klassische Umgang mit Toleranzen in der Ingenieurgeodäsie sieht vor, etwa ein Drittel des angegebenen Toleranzwertes als Standardabweichung für die zu vermessende Größe zuzulassen, weil hierdurch 99,7 % einer gegen Unendlich gehenden Stichprobe innerhalb des Toleranzbereiches liegen würde. Da nun neben der Vermessungstoleranz auch Bau- bzw. Fertigungstoleranzen auftreten werden, kann die Vermessung nicht mehr den gesamten Toleranzumfang für sich beanspruchen. Weiterhin wird von den Konstrukteuren gerne der *gesamte* Toleranzbereich für Konstruktion und Fertigung gefordert. Da nun aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Toleranzbereiche immer kleiner werden und dem Fertigungsprozess ein immer geringerer Ausschuss (1 ppm, knapp  $5\sigma$  entsprechend) zugestanden wird, kommt der Aufteilung der Toleranzbereiche in die beiden Komponenten „bauen/fertigen“ und „prüfen“ immer größere Bedeutung zu. Die Verfahrensweise der Aufteilung wird aktuell diskutiert und sollte von den ausführenden Vermessungsingenieuren zumindest aufmerksam verfolgt (wenn nicht mit gesteuert) werden, um den zugestandenen Toleranzanteil in der Konzeption des Messprozesses entsprechend zu berücksichtigen, wobei eben auch ein akzeptiertes Unsicherheitsmaß für die Zielgröße verwendet werden sollte. Hier bietet sich der vereinheitlichende Leitfaden des GUM an.

### 2.3.3 Virtuelle Messsysteme

Die in der Geodäsie üblichen Verfahren der Berechnung von Unsicherheiten durch Varianzfortpflanzung und Ausgleichsalgorithmen hat in der Metrologie erst wenig Verbreitung gefunden. Der Monte-Carlo-Methode (Ermittlung der Verteilung der Zielgröße durch rechnerische Simulation mit entsprechend ihren Unsicherheiten variierenden Eingangsgrößen bzw. Beobachtungen) wird in anderen Fachdisziplinen wesentlich mehr Vertrauen ge-

schenkt. Auf dieser Basis entstehen so genannte virtuelle Messsysteme, die in einer Softwaresimulation den gesamten Messprozess einschließlich der einfließenden Störparameter nachbilden, wobei die „virtuelle Koordinatenmessmaschine“ [WÄLDELE et al, 2004] wohl das bekannteste ist. Der Anwender kann hierbei die Streuung einer umfassenden Palette von Einflussgrößen (einschließlich Kalibrierparameter) vorgeben und erhält als Ergebnis die Unsicherheiten eines virtuell zu vermessenden Objekts. Ähnliches ist der Ingenieurgeodäsie in Form von a-priori-Netzanalysen bekannt, wobei hier anstelle eines Messsystems eine Messanordnung (Vermessungsnetz) abgebildet wird. Allerdings werden hierbei nur zufällige Streuungen angenommen, was bei der Konstruktion von virtuellen Messsystemen in der heute vorliegenden Form als unzureichend anzusehen ist. Mit den in der Ingenieurgeodäsie gängigen Techniken sind jedoch hervorragende Handwerkzeuge gegeben, auch für andere Situationen und Messtechniken derartige virtuelle Messsysteme auszuarbeiten, die im Kontext der immer stärker nachgefragten Messunsicherheiten ein großes Potential besitzen. Virtuelle Messsysteme werden insbesondere bei der Entwicklung und Verwendung von komplexen Messanlagen Bedeutung erlangen. Allerdings sollten die Ergebnisse in einer fachgebietsneutralen Sprache verfügbar gemacht werden und einem neutralen Regelwerk (heute: GUM) folgen.

## 3 Anforderungen an Genauigkeitsmaße

### 3.1 Zielgerechte Genauigkeitsmaße

Möglicherweise wurde dem Vermessungsingenieur bislang nur wenig Expertentum zugesprochen, weil er lediglich *Koordinaten mit ihren Standardabweichungen* geliefert hat, aber keine Aussage zu der *Unsicherheit von (abgeleiteten) Objektmaßen oder anderen Zielgrößen* (innerhalb eines Prozesses) getroffen wurden. Hierbei wird das Verständnis der Funktion des Objekts dem Vermessungsingenieur die Bereitstellung eines zielgerechten Genauigkeitsmaßes erleichtern. Im Fall der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Parabolspiegelvermessung wäre nicht die Standardabweichung von ausgeglichenen Oberflächenpunkten gefordert, sondern eine visuell ansprechende Darstellung der Fernfeldqualität, die mit Worst-case-Abweichungen unterlegt ist. Gleichermaßen werden Kenntnisse über die Zusammenhänge eines raumzeitlich zu erfassenden Prozesses, sei es nun ein Deformations- oder ein Fertigungsprozess, für die Angabe zielgerechter Genauigkeitsmaße förderlich sein. NIEMEIER [2007] erläutert, dass das Studium des (physikalischen) Verhaltens eines Untersuchungsobjektes beim Monitoring von entscheidender Bedeutung für die Ableitung belastbarer Aussagen ist. Hierbei sind natürlich die Genauigkeitsmaße einzuschließen. Außerdem ist bei raumzeitlichen Messprozessen, bei denen die zeitliche Unsicherheit nicht mehr vernachlässigbar ist, zu analysieren, welchem der beiden Parameter, Raum oder Zeit, die Unsicherheit zuzuordnen ist, oder ob sogar die Angabe einer raumzeitlichen „Unschärferelation“ sinnvoller ist. Hierbei erhebt sich – analog zur Geometrie – die Frage, ob die Unsicher-



heit in Bezug auf eine absolute Zeitskala von Bedeutung ist oder eher die zeitliche Unsicherheit in Bezug auf einen vorgegebenen (relativen) Systemtakt.

### 3.2 Vollständiges Abbilden des Messprozesses

Qualitätskontrolle wurde bisher aus den Messungen selbst heraus, also überbestimmend, realisiert. Hierfür ist zwingend erforderlich, dass die Redundanz in den Messdaten *alle* Informationen über die Qualität des Messprozesses enthält. Diese Voraussetzung ist in der Regel nicht (mehr) oder nicht ausreichend erfüllt, selbst wenn die klassische Messanordnung der „Netzmessung“ betrachtet wird. Vor allem bei kinematischen Messprozessen kann diese Voraussetzung nicht erfüllt werden. Aber auch beim funktionsorientierten Messen und bei der Generierung von objektimmanenten Referenzrahmen gelingt es nur selten, die Messunsicherheit über Redundanz zu fassen, unter anderem deshalb, weil oftmals eine redundante Ankopplung an das Messobjekt nicht realisierbar ist.

Im letztendlich resultierenden Genauigkeitsmaß muss aber der gesamte Messprozess mit all seinen Störeinflüssen und Unsicherheiten berücksichtigt sein. Da mehr und mehr hybride Messsysteme eingesetzt werden, wird einerseits die Vielfältigkeit der Unsicherheitsquellen (Störeinflüsse) wachsen, andererseits wird sich die Möglichkeit bieten, einzelne Unsicherheitsquellen durch die Informationen anderer beteiligter Sensoren zu minimieren oder kompensieren. Letztendlich ist die vollständige Erfassung und Integration *aller* auf das Endergebnis wirkender Unsicherheitskomponenten gefordert.

### 3.3 Prüfprozessfähigkeit sowie Kongruenz zu Toleranzmaßen und Prüfprozessregeln

Das Ziel ist die adäquate Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Design der Prozesskette. Prozessintegrierte Qualitätsregelkreise erfordern die Minimierung von messstrategiebedingten Unsicherheiten. Geodätische Genauigkeitsmaße sollten also über die Messunsicherheiten in Prüfprozessfähigkeitsaussagen überführt werden. Gerade bei der Integration einer (permanenten) Vermessung in eine Prozesskette wird dies bedeutungsvoll werden und die Diskussion um die Aufteilung der Gesamt toleranz in Konstruktions- und Fertigungstoleranz sowie Messunsicherheitsanteil erleichtern.

Vermessungsaufgaben innerhalb eines Prozesses fordern die Richtigkeit für sämtliche Prozeduren, und zwar jederzeit und auf Anhieb. Dies bedeutet, dass die entscheidungsrelevanten Parameter so frühzeitig bekannt sein müssen, dass nicht schon wegen der Verzögerung in ihrer Bestimmung der Prozess einen nicht zu vertretenden Ausschuss produziert. Deswegen ist die Integrität der eingesetzten Messverfahren wichtig. Integrität stützt sich wiederum auf inline-Kalibrierungen (d.h. vor allem Selbst- und Simultankalibrierungen), in der einfacheren Form auf Feldkalibrierung und Feldprüfung, deren Genauigkeitsmaße mit in den Prozesslenkung mit einfließen müssen.

### 3.4 Akzeptanz

Ingenieurvermessungen sind nicht Selbstzweck: die Ergebnisse und damit auch die Genauigkeitsmaße müssen immer von anderen (Ingenieur-)Disziplinen verstanden und anerkannt werden. Dies ist zwar nichts Neues, aber immer noch eine nicht ausreichend gelöste Aufgabe. Der Akzeptanz förderlich ist eine allen Disziplinen gemeinsam verständliche und in ihnen anerkannte Vorgehensweise bei der Bestimmung von Genauigkeitsmaßen. Diese Vorgehensweise ist dem GUM folgend bereits 1999 in einem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [DIN V ENV 13005] niedergelegt worden und wird inzwischen in der Regel von anderen Fachdisziplinen verwendet, viel häufiger jedenfalls als im Vermessungswesen. Deswegen wird die Ingenieurvermessung nicht umhin können, sich mit diesem Vorgehen anzufreunden, um marktfähig zu bleiben. Weil der Leitfaden als „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ von internationalen Gremien wie z.B. BIPM, ISO, OIML entwickelt wurde und über die ISO international verbreitet ist, haben seine Grundgedanken auch in einer immer globalisierteren Welt Bedeutung. Gewiss kann dieser Leitfaden nicht von vorneherein alle Sonderfälle abdecken und gleichzeitig den Leitfadencharakter bewahren. Er ist als Rahmenrichtlinie zu sehen, die bis zum Zeitpunkt der Überführung in fachspezifische Standards auch bei individuellen Messaufgaben nützlich ist. Zusätzlich kommt es auf eine gegenseitige Verständigung zwischen den Fachdisziplinen an, die eventuell sogar zu einer Ergänzung des Leitfadens führen könnte.

## 4 Bewertung der verfügbaren Methoden zur Ableitung von Genauigkeitsmaßen

### 4.1 Leistungsfähigkeit des klassischen Ansatzes und seiner Weiterentwicklungen

Bekanntlich muss neben dem funktionalen Modell auch das stochastische Modell mitsamt seinen Eingangsparametern richtig formuliert sein, damit der klassische Ansatz die statistische Information richtig berücksichtigt. Hierbei wird leicht übersehen, dass das stochastische Modell der einfließenden redundanten Beobachtungen nicht immer alle Einflussgrößen auf die Unsicherheit umfassend, d.h. in einem für die Messung relevanten, Umfang widerspiegelt. Obwohl diese Einflüsse jeweils stochastischer Natur sein können, können sie auf den betrachteten Messprozess nicht-stochastisch wirken. Dann wirken die Streuungen des verfügbaren Datenmaterials nicht in der wirklich notwendigen Bandbreite und die in der Ausgleichung berechnete Standardabweichung täuscht einen in der Regel zu optimistischen Wert vor. Insbesondere bei der heute verfügbaren Qualität des Messinstrumentariums, das generell zu einem optimistischen Varianzansatz verführt, können die nicht vollständig erfassten Unsicherheiten durchaus Größenordnungen erreichen, die die aus der Ausgleichung erhaltenen Unsicherheiten sogar um ein vielfaches übertreffen. Die Qualität und die Verlässlichkeit der berechneten Standardabweichungen sind also entscheidend von den gewählten Eingangsparametern für das

stochastische Modell abhängig. Gerade in Fällen, in denen mit zusätzlich wirkenden systematischen Einflüssen gerechnet werden muss, ist die Varianzkomponentenschätzung gefährlich, weil diese sich primär nur auf die im Beobachtungsmaterial enthaltene statistische Information beziehen kann.

Dies soll am Beispiel der Richtungsübertragung beim Tunnelvortrieb durch einen überbestimmt gemessenen offenen Polygonzug demonstriert werden: Hierbei können Situationen auftreten, in denen Refraktionseinflüsse die Instrumentengenauigkeit überlagern. Ohne Berücksichtigung der Refraktion im stochastischen Modell wird die Ausgleichung eine zu optimistische Standardabweichung der Querkomponente liefern. Auch wenn versucht wird, den Refraktionseinfluss in die Abschätzung der Standardabweichung der Richtungsmessung „einzubeziehen“, wird die in der Ausgleichung ermittelte Standardabweichung zwar größer, aber der einseitigen Verschwenkung immer noch nicht gerecht. Die messtechnische Erfassung dieser einseitigen Abweichung gelingt durch die Einbeziehung von Kreiselmessungen, die autonom – wenn auch mit geringerer Genauigkeit – „Abschlussazimute“ erzeugen. Wird nun das Kreiselazimut als weitere Beobachtung mit den typischen Werten für die a-priori-Standardabweichung (1,5 mgon für die Kreiselbeobachtung und 0,3 mgon für die Richtungsmessung) in das Ausgleichungsmodell einbezogen, ist das Gewichtsverhältnis 1:25, was die Stabilisierungswirkung der Kreiselmessung nahezu gänzlich unterdrückt. Der Polygonzug bleibt verschwenkt und die Standardabweichung wird viel zu optimistisch geschätzt. Eine Veränderung der Gewichte zu Gunsten der Kreiselmessung würde zwar die systematische Verschwenkung korrigieren, aber die Aussage der dabei erreichten Standardabweichung der Endpunktposition in unvertretbarem Ausmaß verzerren. Wenn allerdings die Kreiselmessung vorab zur Berechnung eines Winkelabschlussfehlers benutzt wird und die daraus resultierenden Richtungskorrekturen vorab an die beobachteten Brechungswinkel angebracht werden, kann der messtechnische Aufwand einer Kreiselmessung vollständig genutzt werden. Die strenge gemeinsame Modellierung von Richtungs- und Kreiselmessungen lässt sich als Ausgleichungsmodell der bedingten Beobachtungen formulieren. Da dies aber nicht in den klassischen Netzausgleichungssoftwarepaketen realisiert ist, sollten in der Praxis vorab die aus dem Winkelabschlussfehler abgeleiteten Richtungskorrekturen berücksichtigt werden. Das Varianz-Kovarianzmodell für die korrigierten Richtungen ist entsprechend zu entwickeln, um die somit belastbarste Genauigkeitsaussage zu erhalten. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass ein sehr umsichtiger Umgang mit den im Datenmaterial vorhandenen systematischen Einflussgrößen erfolgen muss und die unüberlegte Anwendung von – a priori hochwertigen – Algorithmen zu falschen Aussagen führen kann.

Dieses Beispiel verdeutlicht weiterhin, dass eine strenge Unterstellung der Normalverteilung in praktischen Anwendungen der Geodäsie problematisch werden kann. Beispielsweise unterliegen auch Distanzmessverfahren zu Oberflächen oft einseitigen Verteilungen: bei taktilen Verfahren werden die Distanzen bei nur näherungsweise

bekannter Flächennormalen zu kurz gemessen, bei berührungslosen (Laserscanning) wegen der unbekanntem Eindringtiefe typischerweise zu lang. Da klassische Hypothesentests Normalverteilung voraussetzen, ergeben sich Abweichungen in den Konfidenzintervallen, wenn andere Verteilungen gewählt werden. Bei der Unterstellung von Gleich- oder Rechteckverteilungen ändert sich die Größe der Konfidenzintervalle um wenige Prozent z.B. [KUTTERER, SCHÖN, 2004]. Eine adäquatere Modellierung versprechen KUTTERER und SCHÖN [2004] mit alternativen Ansätzen aus der Intervallmathematik und der Fuzzy-Theorie. NEUMANN und KUTTERER [2006] beschäftigen sich mit der adäquaten Beschreibung von Messungen bei Impräzision. Diese Modelle können ihre Bedeutung in all denjenigen Fällen erlangen, in denen zwar systematische Anteile in den Beobachtungen vermutet werden, ihre konkrete Größe innerhalb der möglichen Streubreite dieses Anteils aber unbekannt ist. Zukünftig wird der Validierung des zutreffenden Ansatzes sowie der exakten Quantifizierung Eingangsparameter große Bedeutung zukommen.

## 4.2 Leistungsfähigkeit des GUM

Die grundsätzliche Bedeutung des „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ (dt.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, vgl. [DIN V ENV 13005, 1999]) liegt bekanntlich in der Behandlung von zwei Genauigkeitstypen. Typ A beschreibt den aus Experimenten und Wiederholungsmessungen bestimmbaren stochastischen Unsicherheitsanteil, wie er beispielsweise als Standardabweichung aus einer Netzausgleichung folgt. Typ B beinhaltet all diejenigen Unsicherheiten, die nur aufgrund von Voruntersuchungen und Erfahrungen abgeschätzt werden müssen, weil das Experiment/die Messung nicht alle notwendigen Informationen abbilden konnte. Dem Anwender ist demzufolge auch erlaubt, unscharfe (Fuzzy) Angaben in Typ-B-Unsicherheiten umzusetzen.

Als Beispiel sei das geometrische Nivellement betrachtet. Neben anderen Effekten tragen auf einer Nivellementsline Einsinkeffekte der Latte beim Instrumentenstandpunktwechsel und Unebenheiten des Lattenfußes etc. zu einem Abschlussfehler bei. Ein solcher Abschlussfehler ist dann die einzige Stichprobe für diese Effekte, die in *Kombination* auf einer *einzig*en Nivellementsline auftreten. Um nun diese Effekte als Unsicherheit des Typs A mit sinnvoller Stichprobenzahl berechnen zu können, würde eine sehr große Anzahl von Nivellements benötigt. Diese Vorgehensweise kann in der Ingenieurvermessung nicht als praktikabel angesehen werden. Die Einführung der Typ B-Unsicherheiten erlaubt nun Berücksichtigung und Einführung der durch die einzelnen Störungen aufgetretenen Unsicherheiten, die aus der Stochastik einer oder weniger Nivellementslinien nicht ableitbar wären. Nach GUM können dann Typ-A- und Typ-B-Unsicherheiten (ggf. auch unter Berücksichtigung von Korrelationen) nach der bekannten Varianzfortpflanzung (Unsicherheitenfortpflanzungsgesetz) zusammengefasst werden – was für den Geodäten ja eine alltägliche Operation ist. Der GUM betont ausdrücklich, dass *alle* involvierten Un-



sicherheiten zu berücksichtigen sind. Diese standardisierte Vorgehensweise führt zu einer verlässlichen Unsicherheitsangabe, auch wenn keine ausreichenden stochastischen Messinformationen vorliegen – eine Situation, der sich die Ingenieurgeodäsie zunehmend stellen muss. Weiterhin gibt der GUM eine Anleitung, wie mit einfachen Verteilungen wie Sägezahn- oder Rechteckverteilung umzugehen ist, was hilfreich ist, wenn beispielsweise Quantisierungsfehler zu betrachten sind oder von einem gleichverteilten Parameter lediglich die Grenzen seiner Schwankungsbreite bekannt sind. Beispiele hierzu finden sich in [HEISTER, 2005]. Sollten derartige Verteilungen unterstellt worden sein, sind jedoch die allgemein verwendeten Hypothesentests – wie in der klassischen Geodäsie auch – nicht mehr unmodifiziert anwendbar (siehe Abschnitt 4.1). Allerdings könnte den Anwender der auftraggebenden Fachdisziplin weniger die (verhältnismäßig kleinen) Modellfehler eines Hypothesentests interessieren als die (große) Verlässlichkeit der dem Messergebnis beigefügten Unsicherheitsangabe, die durch Typ-B-Unsicherheiten ergänzt ist. In diesem Zusammenhang bleibt zu betonen, dass der Leitfadencharakter des GUM bezüglich der Typ-B-Unsicherheiten auch bei der Anwendung der weiterentwickelten klassischen Methode (vgl. Abschnitt 4.1) seine Bedeutung beibehalten wird, weil er dem Nutzer ein objektiviertes Vorgehen bei der Bemessung von Einflüssen auf den gesamten Messprozess vorgibt. Der GUM wird aktuell um die Nutzung der nach der Monte-Carlo-Methode berechneten Standardabweichung erweitert. Die Bedeutung des nach GUM berechneten Wertes wird durch den Begriff „Standardunsicherheit“ zum stochastischen Begriff „Standardabweichung“ abgegrenzt.

### 4.3 Toleranzbasierte Genauigkeitsmaße und Feldprüfverfahren

Toleranzbasierte Genauigkeitsmaße unterscheiden sich von Standardabweichungen bzw. von Standardunsicherheiten durch die Festlegung klar definierter Fehlergrenzen, die von dem zugeordneten Messergebnis bzw. Parameter „niemals“ überschritten werden dürfen. Ein solches Genauigkeitsmaß ist der MPE (maximum permissible error). Toleranzen nehmen immer deutlich größere Werte an als die in der Geodäsie verbreiteten Standardabweichungen. Wenn die Verteilung innerhalb des Fehlerbandes bekannt ist, lassen sich toleranzbasierte Genauigkeitsmaße in „Standardabweichungen“ umrechnen; bei der Annahme einer Normalverteilung und der Interpretation von „niemals“ als „1 ppm“ ergäbe sich etwa ein Fünftel des Wertes. Toleranzbasierte Genauigkeitsmaße haben den Vorteil der leichten Handhabbarkeit bei Feldprüfverfahren, weil dann Messabweichungen unmittelbar (und nicht nach statistischen Tests wie beispielsweise bei der „full test procedure“ nach der ISO-Reihe 17123) beurteilt werden können.

## 5 Aspekte zur Weiterentwicklung von Genauigkeitsmaßen

### 5.1 Metrologische Aspekte

Auch wenn die in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten Genauigkeitsmaße schon jetzt über die klassische Standardabweichung, basierend auf einem redundanten Messprozess, hinausgehen, werden sich die Unsicherheitsangaben auch zukünftig weiterentwickeln. Die Metrologie wird als Wissenschaft des Messens die Analyse von Messumgebungen und Messprozessen befruchten. Mit diesen Kenntnissen wird sich auch die Angabe von Messunsicherheiten wandeln. Dies gilt auch für die Wirkung einer Kalibrierung auf die abzuleitenden Zielparameter: Die Qualität einer Messunsicherheitsangabe wird steigen, sobald die Unsicherheit der einzelnen (auch der instrumenteninternen) Kalibrierparameter exakt auf die Zielparameter fortgepflanzt werden und gleichzeitig eventuell entstehende sekundäre Fehler- und Störquellen adäquat berücksichtigt werden. Beispielsweise korrigiert ein Neigungskompensator die Stehachsschiefe bei der Vertikalwinkelmessung, aber der instrumenteninterne Bezugspunkt (Schnittpunkt Stehachse-Kippachse) liegt bei schlechter Vorhorizontierung unter Umständen nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit in der angenommenen Stehachse. Das heißt, dass bei der Industrietachymeterserie TPS 5005 bereits ein Drittel der erreichbaren Lagegenauigkeit verbraucht wird, wenn der Arbeitsbereich des (fehlerfrei arbeitenden!) Kompensators zur Hälfte ausgenutzt wird. Darüber hinaus kann einerseits die Unsicherheit der Neigungskorrektur von der Neigung abhängen; andererseits wird dann abhängig von der Vorhorizontierung der Vertikalwinkel mehr oder weniger gut korrigiert, d.h. die Messunsicherheit ist abhängig von der Vorhorizontierung.

Da die Qualität der Kalibrierparameter von ihrem Alter abhängen kann, sind die Kalibrierzyklen zu optimieren. Wenn der produktionstechnische Trend der numerischen Korrektur von Messergebnissen mit betragsmäßig großen Kalibrierwerten anhält, könnte die Messunsicherheitsangabe zeitabhängig werden. Feldprüfverfahren sollen zumindest die Funktionsfähigkeit eines Messsystems vor Ort aufdecken. Hierbei werden momentan Genauigkeitsmaße für die Entscheidung verwendet, die zum einen aus redundanten Beobachtungen und zum anderen aus Restriktionen abgeleitet werden; in der Neufassung der DIN 17123-Reihe wird die Berücksichtigung der Messumfeldbedingungen nach dem Leitgedanken des GUM angestrebt (ein erster Aspekt ist abgehandelt in [HENNES, 2006]). Wenn die vom Hersteller vorgeschlagenen Feldtests sich von den ISO-Vorgaben und/oder von der gängigen Praxis der Anwender unterscheiden, entsteht die Forderung nach einer durchgreifenden Standardisierung. Erste Schritte werden momentan für Laserscanning unternommen vgl. [HEISTER, 2006]. Außerdem besteht Bedarf in der Entwicklung effizienter Verfahren, die eine solche Genauigkeit erreichen, die die Qualität des Messergebnisses beurteilbar macht. Anzustreben sind Selbstkalibrierverfahren, die auf geometrischen Restriktionen basieren und somit möglichst die Herausforderung einer Rückfüh-

rung umgehen. Die aus der Prüfprozesseignung bekannten Verfahren sind nach Möglichkeit auf die geodätischen Prüfverfahren zu übertragen.

## 5.2 Aspekte zur klassischen Vorgehensweise

Die klassische Vorgehensweise der Ableitung von Unsicherheitsmaßen aus Ausgleichungen hat den entscheidenden Nachteil, dass die im Datenmaterial enthaltene Redundanz nicht alle Unsicherheitskomponenten abbildet. Manchmal wird diesem Manko durch die Einführung von Korrelationen entgegengewirkt, die aber entweder auch aus Erfahrungswerten geschätzt werden oder durch aus anderen Prozessen gewonnene Korrelationsfunktionen ermittelt werden. Sowohl diese Erfahrung als auch weitere zusätzlich auftretende Störeinflüsse können – adäquater als *allein* durch Korrelationen – durch Typ-B-Unsicherheiten nach dem GUM berücksichtigt werden und mit den üblichen Standardabweichungen durch Varianzfortpflanzung zur kombinierten Standardunsicherheit zusammengefasst werden. Wenn dies bei den a-priori-Standardabweichungen geschieht und nach der Ausgleichung Hypothesentests nach bewährtem Muster durchgeführt werden sollen, müssen hierfür entsprechende Algorithmen entwickelt werden, die auch eine eventuelle Nicht-Normalverteilung der Eingangsgrößen erlauben. Entscheidend dabei ist die korrekte Berechnung der Quantilwerte für die jeweils zutreffende Verteilung. Die Implementierung einer solchen Vorgehensweise in kommerzielle Ausgleichungsprogramme ist vorläufig nicht zu erwarten – wohl auch, weil eine umfassende Analyse relevanter Verteilungen und deren Modellierung noch nicht vorliegen. Da in einigen (wenigen) Anwendungsfällen – auch bei vorliegender Normalverteilung – die Linearisierung der Beobachtungsgleichungen nicht nach dem ersten Glied abgebrochen werden darf, sind auch hierfür spezielle Ausgleichungsalgorithmen zu entwickeln.

## 5.3 Nutzungsrelevante Aspekte

Welche Maßnahmen sind nun dem Praktiker zu empfehlen? Zunächst einmal sollte das Beobachtungsmaterial daraufhin analysiert werden, welche Unsicherheitsinflüsse nicht durch redundante Daten abgedeckt sind. Solange noch umfassende, geschlossene Ausgleichungsmodelle, die diese Unsicherheiten berücksichtigen, fehlen, wird vorgeschlagen, die Regeln des GUM mit der klassischen Methode zu kombinieren. Das bedeutet, dass zusätzlich auftretende Unsicherheiten beherzt nach den Regeln des GUM als Typ-B-Unsicherheiten ermittelt und dann entweder den a-priori-Varianzen oder gegebenenfalls auch den a-posteriori-Varianzen beigelegt werden. Falls keine Normalverteilung garantiert werden kann, gelten die mittels Hypothesentests ermittelten Entscheidungen zwar nicht in aller Strenge, sind jedoch unter ingenieurgeodätischen Aspekten häufig noch vertretbar. Über das Ausmaß der Fehlentscheidung geben [KUTTERER, SCHÖN, 2004] Auskunft. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die vom Praktiker aus Erfahrung veranschlagte „Sicherheitsmarge“ nun auf eine belastbare

und standardisierte Basis gestellt werden kann, die gleichzeitig vom Auftraggeber akzeptiert und meist auch von ihm selbst angewendet wird. Wenn zukünftig umfassende Ausgleichsroutrinen vorliegen, die alle Unsicherheitstypen in geschlossener Form verarbeiten, wird auch dann vom Anwender dieser Programme verlangt werden, das Unsicherheiten-Modell in geeigneter Weise aufzustellen, wobei ihm der Umgang mit Typ-B-Komponenten und unterschiedlichen Verteilungen erleichtert wird, wenn er bereits durch die Nutzung des GUM-Regelwerks mit dieser Vorgehensweise vertraut ist. Bis zur Ausreifung und Umsetzung derartiger alternativer Methoden, die durch Zusammenwachsen der klassischen Methode und des GUM-Vorschlags entstehen könnten, wird jedoch soviel Zeit vergehen, dass in der Zwischenzeit die Anwendung des GUM sehr zu empfehlen ist.

Eine verbindliche Entscheidungsbasis für die Wahl der adäquaten Methode in Form eines „best-practise-guide“ könnte die Hemmschwelle herabsetzen. Als praxistaugliches Regelwerk sollte es ingenieurgeodätische Standardfälle behandeln. Neben der Thematik der Berechnung von Genauigkeits- bzw. Unsicherheitsmaßen kommt der Aufarbeitung fachspezifischer relevanter Normen, die in Verbindung mit Messaufgaben stehen, große Bedeutung zu. Hier sind die fachspezifischen Begriffe in die Sprache des Vermessungswesens zu übersetzen und die Inhalte von Genauigkeits- und Unsicherheitsmaßen sowie von Toleranzen zu analysieren. Wünschenswert wäre eine Implementierung in aktuelle (und zukünftige) Routinen zur Auswertung von Messergebnissen, wie es in anderen Fachdisziplinen bereits verbreitet ist. Beispielsweise liefert die Bediensoftware einer Koordinatenmessmaschine bei der Vermessung eines Werkstücks als Ergebnis sofort das Signal „In-“ bzw. „Aus-der-Toleranz“, wobei lediglich die CAD-Daten (Sollwerte und Toleranzklasse) vorgegeben werden und die Formerkennung (Kugel, Kegel, Zylinder etc.) automatisch erfolgt. Allerdings bleibt hier meist die Vermessungsunsicherheit im Detail unberücksichtigt. Diese gegenseitige Ergänzung ist in zahlreichen Aufgabenfeldern erforderlich. Beispielsweise sind in den kommerziellen Softwarepaketen zur Flächenrückführung bisher wenig (bis keine) belastbaren Genauigkeitsmaße implementiert. In diesem Zusammenhang müssen Methoden zur Ableitung von Genauigkeitsmaßen für (Flächen-)Koordinaten (oder andere abgeleitete Größen) entwickelt werden, die auf beliebig gekrümmten Flächen (Freiformflächen) mit unsicher definierten Formparametern definiert werden. An dieser Stelle könnten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Reverse Designs Beiträge leisten. Die hier aufgeführten nutzungsrelevanten Aspekte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, der ja in einem derart vielfältigen Bereich wie der Ingenieurvermessung sicher vermessen wäre.

## 6 Resumee

Ein Messergebnis ohne Unsicherheitsangabe ist wertlos. Dies ist das Fundament der Metrologie und somit aller messenden Disziplinen. Da sich die Genauigkeitsmaße mehr oder weniger schnell weiter entwickeln werden,



wird der Praktiker vergeblich auf einen „Endzustand“ warten. Ihm sei deswegen die Ergänzung der klassischen „inneren“ Genauigkeitsmaße durch Hinzufügung der den Messprozess charakterisierenden Messunsicherheitskomponenten dringend empfohlen. Als Wegleitung kann der bereits in Nachbardisziplinen etablierte GUM dienen. Die Autoren erhoffen sich, dass er sich in einer ersten Phase auch im Vermessungswesen etabliert, um die Anknüpfung an die auftraggebenden Nachbardisziplinen nicht zu verlieren. In der Zwischenzeit können dann weitere Methoden mathematisch weiterentwickelt werden, die hinsichtlich zusätzlicher nutzungsrelevanter Aspekte optimiert sind. Es wäre zu wünschen, dass dann diese – von *allen* messtechnischen Ingenieurdisziplinen anerkannt – auch den GUM befruchten und erweitern werden. Letztendlich schließen sich die Autoren den Worten unseres Fachkollegen Prof. BRUNNER [BRUNNER, 2007] an „if one element of the sequence of quality control is omitted, problems may very likely arise in a later stage of a project“ und möchten betonen, dass diese Aussage auch auf die Ermittlung von Genauigkeitsmaßen zutrifft.

## 7 Literatur

- [1] BRUNNER, F. K. [2007]: On the methodology of Engineering Geodesy. *Journal of Applied Geodesy*, S. 57 – 62
- [2] CHEUNG, C. F.; HUIFEN, L.; KONG, L.; LEE, W. B.; TO, S. [2006]: Measuring ultra-precision freeform surfaces using a robust form characterization method. *Measurement Science and Technology* 17 (2006), S. 488–494
- [3] FORBES, A. B. [2006]: Uncertainty evaluation associated with fitting geometric surfaces to coordinate data. *Metrologia* 43 (2006), S. S282–S290
- [4] HEISTER, H. [2006]: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: 72. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning, Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda, DVW Schriftenreihe, Band 51, S. 35–44
- [5] HEISTER, H. [2005]: Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen (I) und (II). *Geoinformation und Landmanagement*, 103. Jahrg., S. 604–607 u. 670–673
- [6] HENNES, M. [2007]: Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *AVN*, S. 136–146
- [7] HENNES, M. [2006]: Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. *AVN* 3/2006, S. 85–94
- [8] KEFERSTEIN, C.; MARXER, M.; ZÜST, R.; VETTER, W. [2003]: Messunsicherheit bei der optischen Antastung von Oberflächen zur Geometriemessung. *VDI-Berichte* Nr. 1805, S. 211–221
- [9] KUNZMANN, H.; PFEIFER, T.; SCHMITT, R.; SCHWENKE, H.; WECKENMANN, A. [2005]: Productive Metrology – Adding Value to Manufacture. *Annals of the CIRP*, Vol 54, p. 691–703
- [10] KUTTERER, H.; SCHÖN, S. [2004]: Alternativen bei der Modellierung der Unsicherheit beim Messen. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 129. Jahrg., S. 389–398
- [11] KONG, L. B.; CHEUNG, C. F.; TO, S.; LEE, W. B.; CHENG, K. W. [2007]: Measuring optical freeform surfaces using a coupled reference data method. *Measurement Science and Technology* 18 (2007), S. 2252–2260
- [12] LI, Y. F.; LIU, Z. G. [2003]: Method for determining the probing points for efficient measurement and reconstruction of freeform surfaces. *Measurement Science and Technology* 14 (2003), S. 1280–1288
- [13] NEUMANN, I.; KUTTERER, H. [2006]: Modellwahl unter Berücksichtigung unpräziser Daten, *Geodätische Woche* 2006, München, 11.10.2006. [http://ifen.bauw.unibw-muenchen.de/gw06/down/GW\\_Neumann\\_Kutterer\\_final.pdf](http://ifen.bauw.unibw-muenchen.de/gw06/down/GW_Neumann_Kutterer_final.pdf), zuletzt besucht 3.10.2007
- [14] NIEMEIER, W. [2007]: Monitoring – was ist der Beitrag der Geodäsie? Brunner, F. (Hrsg): Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 19.–20.04.2007, S. 215–230
- [15] NUCKELT, A. 2007: Dreidimensionale Plattenkinematik: Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone/Rumänien. Diss. Univ. Karlsruhe, <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/254/>, zuletzt besucht: 4.10.2007
- [16] WECKENMANN, A. [2006]: Bedeutung der Messunsicherheit bei der Bewertung von Messergebnissen. Seminar Messtechnik, Inst. f. Mess- und Regeltechnik, Schw. Ges. f. Automatik (SGA), AK Messtechnikdozenten Schweiz, Zürich, 23.03.2006, <http://www.mmm.ethz.ch/dok01/d0000681.pdf>, zuletzt besucht 3.7.2007
- [17] WÄLDELE, F.; FRANKE, M.; HÄRTIG, F.; SCHWENKE, H.; TRAPET, E. [2004]: Simulationsverfahren für die Koordinatenmesstechnik. *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, 4. November 2004, Braunschweig
- [18] DIN V ENV 13005 [1999]: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. ENV 13005. Beuth-Verlag, Berlin
- [19] ISO [1995]: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Hrg: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML
- [20] ISO [2001]: International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM) <http://www.ntmdt.com/download/vim.pdf>, zuletzt besucht 3.10.2007
- [21] VDI VDE [2002]: VDI / VDE 2634. Optische 3D-Messsysteme Blatt 1: Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. Optische 3D-Messsysteme Blatt 2: Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. Beuth-Verlag

Anschrift der Verfasser:  
 Prof. Dr.-Ing. M. HENNES,  
 Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe,  
 Englerstr. 7, D-76728 Karlsruhe,  
 E-Mail: [hennes@gik.uni-karlsruhe.de](mailto:hennes@gik.uni-karlsruhe.de)

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. HANS HEISTER,  
 Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor,  
 Universität der Bundeswehr München,  
 Werner-Harenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg,  
 E-Mail: [h.heister@unibw-muenchen.de](mailto:h.heister@unibw-muenchen.de)