

Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale

Heiner Kuhlmann, Volker Schwieger, Andreas Wieser und Wolfgang Niemeier

Zusammenfassung

Dieser Beitrag fasst die Diskussion des Selbstverständnisses der Ingenieurgeodäsie innerhalb der betreffenden Sektion der Deutschen Geodätischen Kommission zusammen. Er präsentiert die Ingenieurgeodäsie anhand ihrer Aufgaben, Methoden und Charakteristika als anwendungsorientierte Wissenschaft, deren Forschungsfragen sich häufig aus beobachteten Phänomenen oder ungelösten Problemen der Praxis ergeben. Als wesentliches Merkmal zeigt sich die kompetente Bearbeitung geometriebezogener Fragestellungen unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsprinzips und mit durchgreifender Qualitätsbeurteilung von der Planung über die Messung bis zur Auswertung und Interpretation. Die aktuellen methodischen Entwicklungen sind vor allem von der zunehmenden Integration der Messung und Analyse in anspruchsvolle Bau-, Fertigungs- und Überwachungsprozesse gekennzeichnet, sowie vom Übergang auf raumkontinuierliche Verfahren. Am Ende des Beitrags schlagen wir eine neue Definition der Disziplin vor.

Summary

This article summarizes the discussion of the self-conception of engineering geodesy within the respective section of the German Geodetic Commission. It presents engineering geodesy by means of its tasks, methods and characteristics as an application-oriented science whose research questions often arise from observed phenomena or unsolved practical problems. A fundamental characteristic is the professional handling of geometry related problems taking into account the economic principle and realizing end-to-end quality assessment from the planning stage and the measurements to data processing and interpretation. The current methodical developments are primarily characterised by the increasing integration of measurement and analysis into challenging construction, production and monitoring processes as well as by the transition to spatially continuous methods. We conclude this paper with a new definition of the discipline.

Schlüsselwörter: Ingenieurgeodäsie, Begriffsdefinition, Kompetenzen, Selbstverständnis, Anwendungsfelder

1 Einleitung

Die Einführung von Begriffen und deren gemeinsames Verständnis sind in jeder wissenschaftlichen Disziplin fundamental. Sie ermöglichen die Kommunikation sowohl fachintern als auch mit Nachbardisziplinen und spiegeln ebenso das Selbstverständnis des Fachgebietes wider. Seit Helmert (1880) die Geodäsie als die »Wissenschaft von

der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche« bezeichnet hat, ergaben sich zahlreiche Veränderungen im Methodenschatz, in der Sensorik und Technologie und in den Aufgaben- und Anwendungsfeldern der Geodäsie. Dieses gilt auch für ihre Teildisziplinen. Vor diesem Hintergrund hat in der Sektion Ingenieurgeodäsie der Deutschen Geodätischen Kommission eine Diskussion des Selbstverständnisses stattgefunden, die sowohl Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale als auch zukünftige Forschungsfragen und universitäre Ausbildungsinhalte beleuchtete. Dieser Beitrag fasst diese Diskussion aus Sicht der Autoren zusammen und definiert den Begriff »Ingenieurgeodäsie« neu.

Wir sehen die Ingenieurgeodäsie als anwendungsorientierte Wissenschaft, deren Kernarbeitsgebiete und Forschungsfragen sich häufig aus beobachteten Phänomenen oder ungelösten Problemen der Praxis ergeben. Entsprechend berücksichtigt dieser Beitrag sowohl Aspekte der eher wissenschaftlich als auch der eher praktisch ausgerichteten Ingenieurgeodäsie, so eine solche Trennung überhaupt möglich oder zielführend ist.

2 Historische Entwicklung der »Ingenieurgeodäsie«

Die Diskussion über den Begriff »Ingenieurgeodäsie« ist nicht neu. Als Reaktion auf verbreiterte oder zusätzliche Anwendungsfelder wurde das Fachgebiet in der Vergangenheit mehrfach neu definiert, wie die chronologische Zusammenfassung in Tab. 1 zeigt.

Man erkennt an den Definitionen in Tab. 1, dass die Ingenieurgeodäsie als eigenständige geodätische Teildisziplin noch relativ jung ist. Es fällt auf, dass sich alle Definitionen aus den Anwendungsfeldern heraus ableiten: Der Schwerpunkt lag zunächst auf Anwendungen im Bauwesen; heute wird das Spektrum breiter gesehen. Technologische Entwicklungen in der Sensor- oder Auswertetechnik haben keinen direkten Einfluss auf die Begriffsentwicklung gehabt. Erstmals wird die Definition von Brunner (2007) nicht mehr nur aus den zu vermessenden Objekten heraus abgeleitet und in DIN (2010) wird allgemein die wichtige enge Verbindung zu anderen Disziplinen explizit hergestellt.

Als Bezeichnung für die Disziplin hat der Begriff »Ingenieurgeodäsie« den früher gebräuchlicheren Begriff der »Ingenieurvermessung« ersetzt, da sich letzterer häufig nur auf technische Vermessungen bezogen hat, wohingegen der Begriff Ingenieurgeodäsie weiter gefasst

Tab. 1: Definitionen der Ingenieurvermessung/Ingenieurgeodäsie in chronologischer Reihenfolge

Quelle	Beschreibung
FIG, 1971	»Technische Vermessungen, die im Zusammenhang mit der Projektierung, Ausführung, Abnahme und späteren Beobachtung von Bauwerken erforderlich sind.«
Rinner, 1971; Rinner, 1978	»Demnach gehören zur Ingenieurgeodäsie alle jene Vermessungsarbeiten, welche in Verbindung mit der technischen Planung, der Absteckung und der Überwachung von technischen Objekten durchzuführen sind.« »... Sie [die Ingenieurgeodäsie] ist die praktische Nutzenanwendung des Gesamtgebietes der Geodäsie unter den erschwerenden Umständen der turbulenten Praxis der Ausführung technischer Projekte.«
DIN 18709-2, 1986	»Ingenieurvermessungen befassen sich mit Vermessungen für Planung, Baudurchführung, Abnahme und Überwachung von Objekten, z.B. Verkehrsbauwerke (Straßen, Eisenbahnen, Wasserstraßen), Maschinenanlagen.«
DIN 18709-1, 1995; FIG, 1997	»Vermessungen im Zusammenhang mit der Projektierung, Ausführung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten (siehe DIN 18709-2).«
Brunner, 2007	»Engineering geodesy is the production of geodetic information necessary for the planning of technical projects, setting out of the project design, control of the correct construction, and monitoring of deformations.«
DIN 18710-1, 2010	Vermessung im Zusammenhang mit der Aufnahme, Projektierung, Absteckung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten. Anmerkung: „Ingenieurvermessung – synonym für Ingenieurgeodäsie – bildet das Spektrum an Vermessungsarbeiten, die mit technischen Projekten anderer Disziplinen (z.B. Bauwesen) in Verbindung stehen.“

wird und den kompletten Methodenschatz zur Auswertung und Modellierung der Messgrößen und davon abgeleiteter Schätzgrößen mit umfasst.

3 Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale

Die Methoden, Prozesse und Charakteristika, welche die Arbeit des Ingenieurgeodäten in Praxis und Wissenschaft heute kennzeichnen, werden in den hier folgenden Abschnitten umrissen. Als wesentliches Merkmal hat sich dabei die kompetente Bearbeitung geometriebezogener Fragestellungen unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsprinzips und mit durchgreifender Qualitätsbeurteilung von der Planung über die Messung bis zur Auswertung und Interpretation gezeigt. Die Aufgabenstellungen bzw. Anwendungsfelder liegen fast ausschließlich im interdisziplinären Umfeld und fordern vom Ingenieurgeodäten daher in besonderem Maße auch Kenntnisse und Verständnis übergeordneter Prozesse der Nachbardisziplinen.

3.1 Aufnahmevermessung

Bei der Aufnahme, Aufnahmevermessung (siehe auch DIN 18710-2 2010) oder – häufig ebenfalls synonym verwen-

deten – Bestandserfassung handelt es sich um die geometrische und semantische Erfassung und Modellierung des Ist-Zustandes eines Objektes oder eines Gebietes, fallweise auch unter Hinzunahme weiterer raumbezogener Parameter. Dabei kann es sich um ein einzelnes Bauwerk, eine Maschinenanlage, einen ganzen Stadtteil oder die abgerutschte Masse eines Hanges handeln. Bestandserfassungen sind häufig als topographische (Gelände-) Aufnahmen zu verstehen und dienen der Erstellung von Planungsunterlagen, die wiederum die Basis eines nachfolgenden Bau-, Fertigungs- oder Veränderungsprozesses bilden.

Die Aufnahme umfasst auch entsprechende Schritte im Zusammenhang mit der Abnahme eines technischen Objektes, die zur Qualitätssicherung und Abrechnung nach der Erstellung eines Bauwerkes oder Durchführung anderer Maßnahmen erfolgt. Häufig dient die Erfassung des Ist-Zustandes hierbei dem Vergleich mit dem Soll-Zustand und wird nach Baufertigstellung durchgeführt; in diesem Zusammenhang wird sie häufig auch als Kontrollvermessung bezeichnet (Möser u. a. 2012).

In den letzten Jahren lassen sich Tendenzen feststellen, den Bestand auch während des Bauerstellungs-, Herstellungs- oder Veränderungsprozesses zu erfassen, um Zwischenschritte zu dokumentieren und zu bewerten. Häufig ist die Dokumentation in Echtzeit oder mit kurzer zeitlicher Verzögerung umzusetzen. Hierfür ist ein umfassendes, über die ingenieurgeodätischen Prozesse hin-

ausgehendes, Prozessverständnis erforderlich. Man kann die Aufnahme in diesem Zusammenhang und auch ganz allgemein als wesentlichen Teil eines Monitorings ansehen (Heim 2002, Möhlenbrink und Schwieger 2007, Wunderlich 2013).

Die Gesamtheit der Aufnahmevermessungen, deren aufgabenspezifische und qualitätsgesicherte Planung und Auswertung sowie die Entwicklung der erforderlichen Methoden und Instrumente sind wichtige Aufgabengebiete der Ingenieurgeodäsie und stellen ganz sicher eine ihrer Kernkompetenzen dar.

3.2 Absteckung

Die Absteckung ist als Übertragung vorgegebener geometrischer Größen aus einem Planungsmodell in die Örtlichkeit definiert (DIN 18710-3 2010). Dabei werden Soll-Maße wie Koordinaten oder Abstände mit Hilfe eines Regelkreises in die Realität übertragen (Soll-Koordinaten oder Soll-Abstände als Regelziel) und in der Örtlichkeit kenntlich gemacht. Die Absteckung ist Kernkompetenz und Alleinstellungsmerkmal der Ingenieurgeodäsie.

Häufig werden sehr hohe Anforderungen an die Relativgenauigkeit benachbarter, abgesteckter Elemente gestellt. So sind beispielsweise für die Absteckung von Bahnhochgeschwindigkeitstrassen Standardabweichungen von unter 0,5 mm zu erreichen (Möhlenbrink u. a. 2004). Die Messungen selbst sind heute in hohem Maße automatisiert; lediglich das Einrichten des Messsystems erfolgt in der Regel noch manuell.

Besonders gefordert ist die Ingenieurgeodäsie bei der Übertragung der Soll-Trasse eines Tunnels in die Örtlichkeit: Hier ist sie für die Absteckung unter höchsten Anforderungen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit zuständig, wobei der ingenieurgeodätische Prozess heute vollständig automatisiert und in den Bauprozess integriert ist (Stolitzka und Scharler 1996, Niemeier 2006). Die Tunnelbohrmaschine wird auf der Basis ingenieurgeodätischer Messungen gesteuert. Die vollständige Automatisierung ist erforderlich, um die notwendige Echtzeitintegration in den kontinuierlichen Bauprozess sicherzustellen. Die Maschinensteuerung kann damit im Sinne der Ingenieurnavigation als kinematische Verallgemeinerung der Absteckung betrachtet werden (Möhlenbrink u. a. 2004, Wunderlich 2013).

Im Verkehrswegebau und ganz allgemein im Tiefbau ist diese Form der kinematischen Absteckung bereits weit verbreitet (Stempfhuber und Ingensand 2008). Für den Hochbau wird sie noch erforscht. Bei der Errichtung schlanker sehr hoher Bauwerke, wie z. B. des Burj Chalfa in den Vereinigten Arabischen Emiraten wurden bereits erfolgreich GNSS-Tachymeter Kombinationen zur quasi-kinematischen Absteckung und Dokumentation im Bauprozess entwickelt und eingesetzt (Van Cranenbroeck 2007).

Die Absteckung der Geometrie und die darauf aufbauenden Regelungsaufgaben inklusive der unumgänglichen Qualitätssicherung in Echtzeit sind im Kanon der geodätischen Disziplinen allein der Ingenieurgeodäsie zuzuordnen.

3.3 Monitoring/Überwachungsmessungen

Allgemein versteht man in den Ingenieurwissenschaften unter Monitoring die Erfassung, Beobachtung oder Überwachung (DIN 18710-4 2010) von natürlichen und künstlichen Systemen. Ein Monitoringsystem ermöglicht zum Teil auch Eingriffe in die betreffenden Prozesse oder sogar deren Steuerung, sofern sich abzeichnet, dass der Prozess nicht den gewünschten Verlauf nimmt, also z. B. Bewegungen nicht innerhalb eines definierten Toleranzbereichs bleiben (Niemeier 2006, Schwieger u. a. 2010).

In der Ingenieurgeodäsie werden darunter insbesondere die messtechnische Erfassung des geometrischen Ist-Zustandes eines Objektes und der Vergleich desselben mit den Ist-Zuständen der Vergangenheit verstanden. Ziel ist es dabei, Starrkörperbewegungen und Verformungen zu detektieren und diese in Relation zu den Ursachen der Deformationen zu analysieren. Hierfür sind speziell auf die Bedürfnisse des Monitorings abgestimmte Überwachungsnetze oder Messsysteme zu konzipieren. Diese sind hinsichtlich der Sensitivität gegenüber angenommenen Deformationen und Bewegungen, geringer Fehlalarmrate, Robustheit und weiterer technischer und nicht-technischer Kriterien zu optimieren. Für die Analyse eingetretener Veränderungen bedient sich die Ingenieurgeodäsie eines eigenständig entwickelten Spektrums an statistischen Methoden, die es erlauben, Punktverschiebungen, Objektbewegungen sowie Verformungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Messungen und Modelle nachzuweisen (z. B. Heunecke u. a. 2013, Pelzer 1985).

Zurzeit wird erforscht, wie diese Methoden von punktbezogenen Messungen auf flächenhafte Messverfahren zu übertragen sind. Aufbauend auf der in der Vergangenheit erfolgten Charakterisierung der Auswertemodelle in Kongruenzmodell, kinematisches, statisches und dynamisches Modell, wird außerdem insbesondere die dynamische Modellierung erforscht (Welsch und Heunecke 2001). Diese erfordert neben der Einbeziehung der Zeit die Kenntnis der Einflussgrößen, die die Veränderungen am überwachten Objekt hervorrufen, sowie eine mindestens ungefähre Kenntnis vom Übertragungsverhalten des Objektes und damit des dynamischen Systems. Durch Messung der Eingangs- und Ausgangsgrößen (geometrischen Veränderungen) kann dann eine Systemidentifikation stattfinden, deren Resultate Rückschlüsse auf den Erhaltungszustand des überwachten Objektes zulassen. Zur Beschreibung des Modellverhaltens sind in der Ingenieurgeodäsie vielfältige parametrische und nicht-parametrische Ansätze entwickelt worden.

Die Deformationsanalyse selbst kann im dynamischen Modell nur interdisziplinär bearbeitet werden. Bauingenieur, Geologe, Geotechniker und Vertreter anderer Nachbardisziplinen bringen dabei die dynamische Modellvorstellung des Objekts, z.B. das Finite-Elemente-Modell einer Staumauer (Güral 1997), ein. Die ingenieurgeodätische Kernkompetenz liegt in der Integration dieses Modells mit den Messungen (Lienhart 2007), z.B. in einem Kalman Filter (Heunecke 1995, Eichhorn 2005).

Typische Aufgabenbereiche des Monitorings sind etwa die Überwachung von Rutschhängen, Bodensetzungen oder Bauwerken wie Brücken, Staumauern oder Tunneln (Heunecke u. a. 2013). Neben der Bestimmung des zeitlichen Verlaufs von Bewegungen und Deformationen wird das Monitoring auch zur Beweissicherung eingetretener Schäden eingesetzt. Für die Überwachung natürlicher Phänomene, insbesondere der Veränderungen der Erdoberfläche und der Kryosphäre, hat sich auch in der Ingenieurgeodäsie der Begriff »Geomonitoring« durchgesetzt.

3.4 Geometriebezogene Phänomene

In fast allen ingenieur- und naturwissenschaftlichen Disziplinen stellen Messungen eine wesentliche Grundlage für Problemlösung oder Erkenntnisgewinn dar. Meist geht es dabei um die Bestimmung physikalischer Größen ohne direkten Bezug zu Geometrie. Die Ingenieurgeodäsie dagegen konzentriert sich in erster Linie auf geometrische Fragestellungen wie die Bestimmung und Kontrolle von Koordinaten, Abständen, Winkeln und davon abgeleiteten Eigenschaften wie Höhenunterschieden, Geradheit, Krümmung oder Neigung. Gleichwohl kann es bei vielen Anwendungen für die Modellierung des Messprozesses oder des Objektverhaltens und damit für die Analyse der Messresultate durchaus erforderlich sein, weitere raumbezogene Parameter ebenfalls zu erfassen und zu modellieren, etwa atmosphärische Bedingungen entlang der Signalausbreitungswege, Oberflächentemperaturen oder Materialeigenschaften. Wir subsumieren alle diese Parameter und ihre Variation mit der Zeit unter dem Begriff »geometriebezogene Phänomene«.

Die Änderung der Parameter mit der Zeit kann dabei sowohl das zu modellierende Objekt als auch das Messsystem selbst betreffen; letzteres etwa bei der kinematischen Aufnahme von Objekten oder ganzen Städten mittels Mobile-Mapping-Systemen, ersteres etwa bei der automatischen Steuerung von Baumaschinen im Tunnelbau (Stolitzka und Scharler 1996) – und beides, wenn diese Absteckung von bewegten Plattformen aus erfolgt (Foppe u. a. 2004).

In der Vergangenheit war die räumliche Diskretisierung eine grundlegende Methode der Ingenieurgeodäsie, siehe auch Brunner (2007). Auch heute gibt es Anwendungsfälle, bei denen von verteilten Einzelpunkten auf ein flächenhaftes Kontinuum geschlossen wird (Zeimetz und Kuhlmann 2011). Inzwischen wird die punktor-

ientierte Vorgehensweise häufig durch linien- und flächenhafte Mess- und Auswertemethoden ersetzt, wobei – ebenso wie bei den sogenannten zeit-kontinuierlichen Messverfahren – letztlich eine Abtastung mit regelmäßigem, vernachlässigbar kleinem Diskretisierungsintervall an die Stelle sorgfältig geplanter Einzelmessungen tritt und als »kontinuierliche« Messung bezeichnet wird.

Dabei spielt die prozessorientierte Herangehensweise eine wachsende Rolle. Die Prozesse, z.B. bei der Erstellung von Tunneln oder Brücken, werden beobachtet und die Beobachtungsergebnisse dienen zum Teil der sequenziellen Verbesserung der Prozessmodelle, zum Teil aber auch der Steuerung der Prozesse (z.B. Niemeier 2006).

3.5 Räumliche Skala: lokale und regionale Phänomene

Traditionell und auch noch heute beschäftigt sich die Ingenieurgeodäsie in hohem Maße mit geometriebezogenen Fragestellungen aus dem Bereich des Bauwesens, darüber hinaus auch aus dem Bereich des Maschinenbaus, der Geotechnik und weiterer Nachbardisziplinen. Die beobachteten und modellierten Phänomene haben daher vielfach einen, im Sinne der Geodäsie, lokalen Charakter, erreichen aber durchaus auch regionale Ausdehnung. Beispielhafte Skalenbereiche und Anwendungsfelder sind nachfolgend aufgeführt (Niemeier und Riedel 2006):

- 1–100 cm: Formkontrolle für die Qualitätssicherung im Maschinenbau (Hennes 2009 sowie Hennes und Runge 2006), Bestimmung von Geometrie und Wachstum von Nutzpflanzen für die Landwirtschaft (Paulus und Kuhlmann 2011);
- 10–100 m: Absteckung eines Einfamilienhauses, Überwachung einer Brücke (Kuhlmann 1996);
- 1–10 km: Einrichtung eines Sonder- oder Überwachungsnetzes (Kahmen u. a. 1998), Steuerung eines Tunnelvortriebs (Stolitzka und Scharler 1996);
- 10–1.000 km: Aufnahme von Verkehrswegen durch mobile Multi-Sensor-Systeme (Gräfe 2007), Erfassung postglazialer oder tektonischer Bewegungen (Adler u. a. 1994).

Die Abgrenzung der räumlichen Skala ist dabei nicht scharf möglich, ebenso die Abgrenzung zu geometriebezogenen Aufgabenstellungen in benachbarten Disziplinen wie etwa der Landesvermessung und physikalischen Geodäsie am oberen Ende des Skalenbereichs oder der Geotechnik und dem Maschinenbau am unteren. Eine Kernkompetenz der Ingenieurgeodäsie – und eine Abgrenzung zu benachbarten Disziplinen – liegt darin, geometriebezogene Problemstellungen, die sich über mehrere der oben angeführten Skalenbereiche erstrecken, in einem einheitlichen Referenzsystem zu bearbeiten.

3.6 Qualitätsbeurteilung und Qualitätssicherung

Die Ingenieurgeodäsie hat seit ihrer Entstehung besonderes Augenmerk auf die Definition, Planung und Sicherung der Qualität ihrer Messungen und ihrer Auswertergebnisse gelegt. Nur dadurch ist es möglich, die wechselnden Anforderungen aus der jeweiligen Applikation unter den ökonomischen Zwängen der Praxis zu erfüllen und gleichzeitig das Risiko für das Auftreten folgenschwerer Fehler zu beschränken.

Lange Zeit hat man sich dabei vor allem auf die Genauigkeit als Qualitätsmerkmal konzentriert. Die Erforschung der Modellierung, Fortpflanzung und Reduktion zufälliger Abweichungen und ihre Quantifizierung mit statistischen Präzisionsmaßen wie Standardabweichung, Konfidenz-ellipsen oder skalaren Funktionen (z. B. der Determinante) der Kovarianzmatrix in linearen und nicht-linearen Auswertemodellen sind zweifelsohne Kernkompetenzen der Ingenieurgeodäsie. Ebenso die bereits früh adaptierte Beurteilung der Zuverlässigkeit im Sinne der möglichst umfassenden Aufdeckbarkeit von Modellfehlern und der möglichst geringen Auswirkung allenfalls nicht aufgedeckter Modellfehler. Die Kenntnis der Messinstrumente und Messprozesse mit allen relevanten Einflussgrößen sowie die redundante Erfassung von Messgrößen unter Nutzung unterschiedlicher physikalischer Prinzipien sind wesentliche Grundlagen für die Beurteilung der Genauigkeit auf Basis von Präzision und Zuverlässigkeit.

Systematische Einflüsse konnten durch Kalibrierung oder entsprechende Wahl von Messanordnung oder Auswerteverfahren eliminiert oder so weit reduziert werden, dass die verbleibenden systematischen Abweichungen gegenüber den statistisch beschriebenen zufälligen Abweichungen vernachlässigbar waren. Auch schien es möglich, befürchtete Systematiken durch entsprechende Maßnahmen im Zuge der Messung und Auswertung zu randomisieren (Schmitt 1977). Inzwischen ist es in vielen Fällen gelungen, die zufälligen Abweichungen mess- und auswertetechnisch deutlich zu reduzieren. Die verbleibenden systematischen Abweichungen sind damit häufig nicht mehr vernachlässigbar. Ein vertieftes Verständnis der Messprozesse sowie der physikalischen Sensormodelle hat auch zu der Erkenntnis geführt, dass die Randomisierung nicht durchgängig gelingt (Kutterer 2002) bzw. zu Korrelationen (Koch u. a. 2010) und Auto-Korrelationen führt, was zwangsläufig den Methodenschatz der stochastischen Prozesse adressiert (Li und Kuhlmann 2010). Die Modellierung und Fortpflanzung der Genauigkeit musste daher um die systematischen Anteile erweitert werden. Man spricht daher heute allgemeiner von Unsicherheitsmodellierung (Kutterer 2002; Neumann 2009) und berücksichtigt auch in der Ingenieurgeodäsie verstärkt den »Guide for the Expression of Uncertainty in Measurements (GUM)« (ISO 1995, Heister 2001, Niemeier 2008) bei der Einschätzung des gesamten Genauigkeits- bzw. Unsicherheitsbudgets von Messsystemen.

Die Ingenieurgeodäsie wird von Außenstehenden nicht selten über die Fähigkeit und den angeblichen Hang zu besonders hoher Messgenauigkeit definiert. Dies entspricht nicht dem Selbstverständnis der Disziplin: Der Ingenieurgeodät misst so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich. Gerade dieser Effizienzgedanke bei der Ableitung und Umsetzung der Qualitätsanforderungen aus dem übergeordneten Prozess ist eine der Kernkompetenzen der Ingenieurgeodäsie, wenn auch nicht ein Alleinstellungsmerkmal (Rehr u. a. 2011). Tatsächlich aber zeichnet sich die Ingenieurgeodäsie im Kanon der geodätischen Disziplinen unter anderem auch dadurch aus, dass sie bei Bedarf Messungen sehr hoher Genauigkeit im lokalen Bereich erreichen kann, zum Beispiel um eine Strecke von 1 km Länge mittels besonderer Messverfahren, deterministischer und stochastischer Modellierung unterschiedlichster Einflüsse mit einer Genauigkeit von weniger als 1 mm zu bestimmen (Heunecke 2012) oder Komponenten eines Teilchenbeschleunigers mit eigenständig entwickelten Instrumenten und Verfahren relativ zueinander mit Genauigkeiten von wenigen μm auszurichten.

Die Ingenieurgeodäsie hat die Reduktion des Begriffs Qualität auf das Merkmal Genauigkeit bereits früh aufgegeben und einen umfangreichen Methodenschatz aufgebaut, um etwa geodätische Netze durch ein umfassendes Qualitätsmodell zu beurteilen, welches auch Parameter wie Sensitivität und Trennbarkeit umfasst, siehe z. B. Grafarend u. a. (1979), Niemeier (1985a und 1985b), Li (1987). Zurzeit wird in interdisziplinärer Zusammenarbeit ein umfassendes Qualitätsmodell für Anwendungen im Bauwesen mit entsprechenden Methoden zur Fortpflanzung der Qualitätsparameter entwickelt (Schweitzer und Schwieger 2011).

Wegen der typischen Kombination aus hohen technischen Anforderungen einerseits, ökonomischen, zeitlichen und örtlichen Zwängen sowie widriger Arbeits- und Umgebungsbedingungen andererseits kommt der Überprüfung der Einhaltung von Qualitätsparametern in der Ingenieurgeodäsie eine immense Rolle zu. Diese Kontrolle muss häufig vor Ort und möglichst schon während der zu kontrollierenden Messungen erfolgen, sodass die Qualitätsprüfung nahtlos in den Mess-, Auswerte- und Bauprozess integriert werden kann (Möhlenbrink und Schwieger 2007, Schwieger u. a. 2010).

3.7 Sensorik und geodätische Messtechnik

Die Ingenieurgeodäsie ist eine messende Wissenschaft. Aus Sicht der Autoren ist sogar festzustellen, dass die Ingenieurgeodäsie – und auch die Geodäsie in ihrer Gesamtheit – ihre Relevanz für Gesellschaft und Wissenschaft ohne die messtechnische Erfassung verlieren würde. Die reine messtechnische Erfassung steht jedoch nicht im Zentrum, sondern die deterministische und stochastische Modellierung des Messprozesses, die Kenntnis des physi-

kalischen Sensormodells, die Erfassung und Modellierung der Umgebungsbedingungen und aller sonstigen relevanten Einflussgrößen, sowie die indirekte Bestimmung der Zielgrößen und ihrer Qualitätsparameter. Die Auswertung der Messwerte unter Kenntnis des Systemmodells mündete häufig in eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten im linearisierten Gauß-Markov- oder Gauß-Helmert-Modell. Inzwischen wurde diese methodische Basis der Parameterschätzung zunehmend durch robuste Schätzer (Wieser 2002, Caspary 2013) und Bayes-Schätzer (z.B. Niedermayr und Wieser 2012) sowie stochastische Verfahren wie Monte-Carlo-Verfahren (z.B. Schweitzer und Schwieger 2011) oder heuristische Methoden wie Genetische Algorithmen (z.B. Rehr u. a. 2011) erweitert.

Entsprechend der Breite an Anwendungsfeldern und Anforderungen, mit der die Ingenieurgeodäsie konfrontiert ist, greift sie auf eine umfangreiche Basis an Messinstrumenten und Sensoren zurück. Totalstationen, GNSS-Empfangssysteme, Nivelliere und Terrestrische Laserscanner sind die am häufigsten eingesetzten Standardinstrumente. Photogrammetrische Systeme, Inertialmess-einheiten, Optische Lote, Schlauchwaagen, Vermessungskreisel und Lasertracker sind weitere, in der Ingenieurgeodäsie typischerweise eingesetzte Messinstrumente, zunehmend auch terrestrische Mikrowelleninterferometer mit realer oder synthetischer Apertur. Darüber hinaus greifen Ingenieurgeodäten, insbesondere im Zusammenhang mit Monitoringaufgaben, auf einen Fundus an Sensoren zurück, wie etwa Neigungsmesser, Extensometer, Positionsdetektoren oder faseroptische Dehnungs- und Temperatursensoren. Im Zusammenhang mit der Kalibrierung von Sensoren werden Laserinterferometer, Kollimatoren und weitere Spezialinstrumente benötigt. Einen guten Überblick über die etablierten Instrumente und Sensoren geben Deumlich und Staiger (2001), Schlemmer (1996), Schwarz (1995); Information zu den neueren Instrumenten und Sensoren findet man z.B. bei Rödelsperger (2011), Habel und Brunner (2011), Juretzko u. a. (2008).

Um die Anforderungen aus übergeordneten Prozessen einzuhalten, sind die Entwicklung optimaler Messanordnungen und -konzepte sowie die qualitätsgesicherte Auswertung der Messergebnisse vom Ingenieurgeodäten zu leisten. Aus diesen Anforderungen kann sich auch die Notwendigkeit der zeitlichen und räumlichen Integration mehrerer Sensoren oder Instrumente in einem Multi-Sensor-System ergeben. Diese Multi-Sensor-Systeme können an einem Ort als redundante oder sich ergänzende Systeme integriert sein oder als Sensornetze räumlich verteilt aufgebaut sein (Heunecke 2012). Die Konzipierung, Entwicklung und Kalibrierung solcher Systeme inklusive ihrer Komponenten ist für das Berufsbild und die Forschungsaktivitäten der Ingenieurgeodäsie gleichermaßen von zentraler Bedeutung. Dabei nimmt die Kalibrierung eine besondere Rolle ein (Hennes 2010). Zum einen ist sie Voraussetzung für das Vordringen in extreme Genauigkeitsbereiche, wie sich am Beispiel von GNSS-Messungen mit Sub-Millimeter-Standardabweichungen zeigen lässt

(Zeimetz und Kuhlmann 2013). Zum anderen wird sie zunehmend herausfordernder, da die Messsysteme komplexer werden und vom Anwender nur noch als Black-Box aufgefasst werden können. Vor diesem Hintergrund löst die Systemkalibrierung die Komponentenkalibrierung in zunehmenden Maße ab (Hennes und Ingensand 2000; Heister u. a. 2005; Fuhlbrügge 2004). In Einzelfällen entwickelt der Ingenieurgeodät auch neue Sensoren für spezielle Fragestellungen.

3.8 Bezugssysteme

Die Verortung, Orientierung und Verknüpfung der durchgeführten Messungen mit Hilfe der Festlegung des geodätischen Datums – und besonders die weiterführende Analyse auf Basis von Koordinaten – machen die Einführung eines geeigneten Bezugssystems notwendig, wobei zwischen Beobachtungsraum und Koordinatenraum zu unterscheiden ist (Brunner 2007).

Für Objektvolumina von wenigen Kubikmetern kann das Koordinatensystem bspw. noch durch Koordinatenmessmaschinen direkt mechanisch realisiert werden (Schwarz 1995). Bei größeren Dimensionen gelingt das nicht mehr. Das Bezugssystem wird dann durch vermarktete Punkte (Bezugsrahmen) indirekt realisiert. Die Notwendigkeit, derartige Bezugsrahmen zu schaffen, geometrische Beziehungen durch Anbindung an diesen Bezugsrahmen abzuleiten und darzustellen, und dabei grundlegende physikalische Einflüsse zu berücksichtigen – wie etwa Lotabweichungs- und Geoidvariationen im Zuge der Absteckung eines Tunnels oder Teilchenbeschleunigers (Albert und Schwarz 2004) – ist ein wesentlicher Grund, weshalb die Bearbeitung der bereits angeführten geometriebezogenen Fragestellungen nicht nur eine Kernkompetenz, sondern auch weitgehend ein Alleinstellungsmerkmal der Ingenieurgeodäsie geblieben ist.

Bei ingenieurgeodätischen Anwendungen kommt häufig als Herausforderung hinzu, dass das Bezugssystem nicht starr und unveränderlich ist. Vielmehr ändert es sich durch Bewegungen der vermarkteten Punkte oder des äußeren Referenzrahmens während der Projektlaufzeit in nicht-vernachlässigbarem Ausmaß (Schlemmer 1998). Aufgrund dieser Instabilität des Referenzrahmens, der Erfassung und Modellierung sich bewegender Objekte oder Messsysteme und der zunehmenden Kombination und Integration verschiedener Sensoren zu Multi-Sensor-Systemen gewinnt die Zeit als vierte Dimension an Bedeutung: Man benötigt einen wohldefinierten und stabilen Referenzrahmen zur Modellierung zeitlicher Verläufe und zur Synchronisation der unterschiedlichen Sensoren (Foppe u. a. 2004).

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Dieser Beitrag fasst die Diskussion des Selbstverständnisses der Ingenieurgeodäsie innerhalb der Sektion Ingenieurgeodäsie der Deutschen Geodätischen Kommission zusammen. Er präsentiert die Ingenieurgeodäsie als anwendungsorientierte Wissenschaft mit eigenen konzeptionellen und methodischen Ansätzen, die zunächst vor allem über die zu vermessenden Objekte und Aufgaben im Zusammenhang mit dem Bauwesen definiert war, zunehmend aber als Disziplin im interdisziplinären Umfeld gesehen wird.

Die Methoden, Prozesse und Charakteristika, welche die Arbeit des Ingenieurgeodäten in Praxis und Wissenschaft heute kennzeichnen, wurden in Abschnitt 3 umrissen. Zusammenfassend soll hier nochmals hervorgehoben werden, dass als schöpferische Leistung die Entwicklung der zugehörigen Messkonzepte und Messanordnungen – und zwar sowohl theoretisch-methodisch als auch durch numerische Simulation und Optimierung – zu den Kernaufgaben der Ingenieurgeodäten gehören.

Im Hinblick auf aktuelle Entwicklungen sind folgende Trends zu erkennen:

- Das Objekt für Aufnahme und Überwachung wird häufig nicht mehr durch sorgfältig ausgewählte, wohl definierte und signalisierte Einzelpunkte repräsentiert, sondern mit einer Punktwolke überzogen, die vornehmlich mit Laserscannern oder aus den Aufnahmen digitaler Kameras erzeugt wird. Die relevanten Objektinformationen werden also nicht direkt bei der Messung, sondern erst anschließend in der Auswertung extrahiert.
- Insgesamt ist eine zunehmend verstärkte Wechselbeziehung mit der Photogrammetrie gegeben, sei es im Bereich der Bildverarbeitung bzw. Objektextraktion oder bei Orientierungs- und Positionierungsalgorithmen, z.B. für Laserscanning-Aufnahmen. Auch die neuesten Tachymeter und Scanner oder die Zusatzsysteme T-Probe, T-Scan und T-Cam bei Lasertrackern beinhalten wesentliche photogrammetrische Konzepte und Lösungen.
- Häufig bewegt sich das Aufnahmesystem kinematisch entlang des zu vermessenden Objektes. Dies gilt inzwischen vielfach auch bei der Absteckung, wenn die zu erstellende Geometrie unmittelbar, ohne vermarktete Zwischenpunkte, durch eine gesteuerte Maschine in die Örtlichkeit übertragen wird.

Insofern sind für die »Ingenieurgeodäsie – kontinuierlich in Raum und Zeit« (Kuhlmann 2004) weiterhin innovative und richtungsgebende Entwicklungen zu erwarten, die das Bild dieser Disziplin auch in den nächsten Jahren prägen und verändern werden.

Aufbauend auf der Diskussion der Kernkompetenzen und Charakteristika sowie des Selbstverständnisses der

Ingenieurgeodäsie, schlagen wir abschließend die folgende neue Definition für diese Disziplin vor:

Die Ingenieurgeodäsie ist die Disziplin von der Aufnahme, der Absteckung und dem Monitoring lokaler und regionaler geometriebezogener Phänomene mit besonderer Berücksichtigung von Qualität, Sensorik und Bezugssystemen.

Literatur

- Adler, R., Pelzer, H., Foppe, K., Melzer, Y.: Geodetic Monitoring of Recent Crustal Activity along the Dead Sea Jordan Rift. In: Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models, Workshop Proceedings, 29.8.–1.9., Haifa, Israel, S. 56–68, 1994.
- Albert, J., Schwarz, W.: Messtechnische Entwicklungen für die Zukunftsprojekte »Linearbeschleuniger«. In: Ingensand, H. (Hrsg.): Ingenieurmessung 2004, ETH Zürich, Zürich, S. 39–50, 2004.
- Brunner, F.K.: On the methodology of Engineering Geodesy. In: Journal of Applied Geodesy (1), S. 57–62, 2007.
- Caspary, W.: Fehlertolerante Auswertung von Messdaten: Daten- und Modellanalyse, robuste Schätzung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 313 S., 2013.
- Deumlich, F., Staiger, R.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Aufl., Herbert Wichmann Verlag, 435 S., 2001.
- DIN 18709-1: Deutsche Norm: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen, Teil 1: Allgemeines, Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- DIN 18709-2: Deutsche Norm: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen, Teil 2: Ingenieurmessung, Beuth Verlag, Berlin, 1986.
- DIN 18710-1: Deutsche Norm: Ingenieurmessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- DIN 18710-2: Deutsche Norm: Ingenieurmessung – Teil 2: Aufnahme, Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- DIN 18710-3: Deutsche Norm: Ingenieurmessung – Teil 3: Absteckung, Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- DIN 18710-4: Deutsche Norm: Ingenieurmessung – Teil 4: Überwachung, Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- Eichhorn, A.: Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 585, 2005.
- FIG: FIG-Fachwörterbuch, Heft 10 – Ingenieurmessung. Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt, 1971.
- FIG: FIG-Fachwörterbuch, Band 10: Ingenieurmessung. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt, 1997.
- Foppe, K., Schwieger, V., Staiger, R.: Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechniken. In: Schwieger, V., Foppe, K. (Hrsg.): Kinematische Messmethoden – »Vermessung in Bewegung«. Beiträge zum 58. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 45, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 3–18, 2004.
- Fuhlbrügge, H.-J.: Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Universität Bonn, Nr. 91, Bonn, 2004.
- Grafarend, E., Heister, H., Kelm, R., Kropff, H., Schaffrin, B.: Optimierung Geodätischer Messoperationen. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 499 S., 1979.
- Gräfe, G.: Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, <http://athene.bibl.unibw-muenchen.de:8081/doc/86001/86001.pdf>, 2007.
- Güral, E.: Geodätische Überwachung einer Talsperre: eine Anwendung der Kalman-Filtertechnik. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 224, 1997.
- Habel, W.R., Brunner, F.K.: Faseroptische Sensoren für den Einsatz im Monitoring: ein Überblick. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (118), S. 204–211, 2011.

- Heim, M.: Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen – unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen. Technische Universität Darmstadt, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2002.
- Heister, H.: Zur Angabe der Messunsicherheit in der geodätischen Messtechnik. In: Heister, H., Staiger, R. (Hrsg.): Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. Beiträge zum 54. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 42, S. 108–119, 2001.
- Heister, H., Woschitz, H., Brunner, F.K.: Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (112), S. 233–238, 2005.
- Helmert, F.R.: Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie. Teubner, Leipzig, 1880.
- Hennes, M.: Freiformflächenerfassung mit Lasertrackern – eine ergonomische Softwarelösung zur Reflektoroffsetkorrektur. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, S. 188–194, 2009.
- Hennes, M.: Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Kutterer, H., Neuner, H. (Hrsg.): Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Beiträge zum 93. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 61, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 239–252, 2010.
- Hennes, M., Ingensand, H.: Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In: Schnädelbach, K., Schilcher, M. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166–177, 2000.
- Hennes, M., Runge, P.: Chancen der Ingenieurvermessung im modernen Maschinenbau. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, S. 242–250, 2006.
- Heunecke, O.: Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung (Hannoversches Filter). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, 1995.
- Heunecke, O.: Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (119), S. 380–385, 2012.
- Heunecke, O.: Anwendungen von Geosensornetzen in der Ingenieurgeodäsie. In: Schwarz, W. (Hrsg.): Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2012. Beiträge zum 115. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 68, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 171–186, 2012.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Eichhorn, A., Neuner, H., Welsch, W.: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2013.
- ISO: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Genève, 1995.
- Juretzko, M., Hennes, M., Schneider, M., Fleischer, J.: Überwachung der raumzeitlichen Bewegung eines Fertigungsroboters mit Hilfe eines Lasertrackers. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (115), S. 171–178, 2008.
- Kahmen, H., Wunderlich, T., Retscher, G., Kuhn, M., Plach, H., Teferle, F., Wieser, A.: Ein modulares Konzept zur Absteckung von Hochgeschwindigkeitstrassen. Zeitschrift für Vermessungswesen (123), S. 115–121, 1998.
- Koch, K.R., Kuhlmann, H., Schuh, W.D.: Approximating covariance matrices estimated in multivariate models by estimating auto- and cross-covariances. Journal of Geodesy (84), S. 383–397, 2010.
- Kuhlmann, H.: Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, 1996.
- Kuhlmann, H.: Bestimmung von Bewegung – eine geodätische Sicht. In: Flächenmanagement und Bodenordnung, Verlag Luchterhand, Heft 5, S. 225–231, 2004.
- Kuhlmann, H., Heister, H.: Steering problems and solutions during constructions of roads. In: Proceedings of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurement Baden, Österreich, 22.–24.05., 2006.
- Kutterer, H.: Zum Umgang mit Ungewissheit in der Geodäsie – Bausteine für eine neue Fehlertheorie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 553, 2002.
- Lienhart, W.: Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- Li, D.: Trennbarkeit und Zuverlässigkeit bei zwei verschiedenen Alternativhypthesen im Gauß-Markov-Modell. Zeitschrift für Vermessungswesen (112), S. 555–563, 1987.
- Li, L., Kuhlmann, H.: Deformation Detection in the GPS Real-time Series by the Multiple Kalman Filter Model. Journal of Surveying Engineering (136), S. 157–164, 2010.
- Möhlenbrink, W., Kuhlmann, H., Dünisch, M.: Prozessintegrierte kinematische Absteckung am Beispiel »Feste Fahrbahn«. In: Schwieger, V., Foppe, K. (Hrsg.): Kinematische Messmethoden – »Vermessung in Bewegung«. Beiträge zum 58. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 45, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 265–282, 2004.
- Möhlenbrink, W.; Schwieger, V.: Zur Prozessintegration der geodätischen Messtechnik. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (114), S. 403–410, 2007.
- Möser, M., Hoffmeister, H., Müller, G., Staiger, R., Schlemmer, H., Wanning, L.: Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2012.
- Neumann, I.: Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaushaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 634, 2009.
- Niedermayr, S., Wieser, A.: Combination of feature-based and geometric methods for positioning. In: Proceedings of 3rd International Conference on Machine Control and Guidance, Stuttgart, S. 301–310, 2012.
- Niemeier, W.: Netzqualität und Optimierung. In: Pelzer, H. (Hrsg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985.
- Niemeier, W.: Analyse von Überwachungsnetzen. In: Pelzer, H. (Hrsg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985.
- Niemeier, W., Riedel B.: Mehrskaliges geodätisches Beobachtungskonzept für die Überwachung großflächiger Rutschungsgebiete. In: Proceedings 7. Geokinematischer Tag, TU Freiberg, 2006.
- Niemeier, W.: Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. 2. Aufl., de Gruyter Verlag, 2008.
- Niemeier, W.: Geodetic Techniques for the Navigation, Guidance and Control of Construction Processes. In: Proceedings of 3rd IAG International Symposium on Geotechnical and Structural Engineering and 12th International Symposium on Deformation Measurements, Baden, Österreich, 22.–24.5., 2006.
- Paulus, St., Kuhlmann, H.: Nahbereichsscanning – Messprinzipien und Einsatzmöglichkeiten bei Nutzpflanzen. In: Wunderlich, T., Ohlmann-Lauber, J. (Hrsg.) Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge, Beiträge zum 107. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 66, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 17–30, 2011.
- Pelzer, H. (Hrsg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985.
- Rehr, I., Rinke, N., Kutterer, H., Berkhahn, V.: Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung tachymetrischer Netzmessungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (118), S. 2–14, 2011.
- Rinner, K.: Über die zunehmende Bedeutung der Ingenieurgeodäsie. Zeitschrift für Vermessungswesen (96), S. 209–217, 1971.
- Rinner, K.: Entwicklungstendenzen in der Ingenieurgeodäsie. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (85), S. 161–166, 1978.
- Rödelsperger, S.: Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 668, 2011.
- Schlemmer, H.: Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Wichmann Verlag, 1996.
- Schlemmer, H.: Trends in der Ingenieurvermessung – gegenwärtige Leistungsfähigkeit und Perspektiven für die Zukunft. In: Schwarz, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung aktuell, Beiträge zum 47. DVW-Seminar, Schriftenreihe des DVW, Band 32, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 11–16, 1998.
- Schmitt, G.: Monte-Carlo-Design geodätischer Netze. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (84), S. 87–94, 1977.
- Schwarz, W. (Hrsg.): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1995.
- Schweitzer, J., Schwieger, V.: Modeling of Quality for Engineering Geodesy Processes in Civil Engineering. In: Journal of Applied Geodesy (5), S. 13–22, 2011.

- Schwieger, V., Beetz, A., Wengert, M., Schweitzer, J.: Echtzeit-Integration ingenieurgeodätischer Messsysteme in Bauregelkreise. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung* 10, Wichmann, Berlin, S. 45–56, 2010.
- Stempfhuber, W., Ingensand, H.: Baumaschinenführung und -steuerung – von der statischen zur kinematischen Absteckung, *Zeitschrift für Vermessungswesen* (133): S. 36–44, 2008.
- Stolitzka, G., Scharler, H.: Funktionskriterien für die Beurteilung von TBM-Leitsystemen. In: Brandstätter, G., Brunner, F.K., Schelling, G. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung* 96, Dümmler, Bonn, S. B4/1–7, 1996.
- Van Cranenbroeck, J.: Advanced Surveying Control Services for Building the Vertical Cities. In: *Proceedings, FIG Working Week 2007*, Hong Kong, China, 13.–17.05.2007, 13 S.
- Wieser, A.: Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. Shaker Verlag, Aachen, 274 S., 2002.
- Wieser, A., Aschauer, R.: Estimating platform kinematics using multi-antenna GNSS. *Vermessung und Geoinformation* (99): S. 180–190, 201.
- Welsch, W., Heunecke, O.: Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations. FIG Publication No. 25, ISBN 87-90907-10-8, 2001.
- Wunderlich, Th.: Die Zukunft der geodätischen Absteckung von Bauwerken. In: *Tagungsband »Geodätische Arbeiten für Bundeswasserstrassen«*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, in Druck, 2013.
- Zeimetz, Ph., Kuhlmann, H.: Use of parametric models for analyzing ground movement measurements in the Rhenish lignite mining area. *World of Mining – Surface & Underground* (63), S. 256–264, ISSN 1613-2408, 2011.
- Zeimetz P., Kuhlmann H.: Einsatz kalibrierter GNSS-Antennen zur genauen Längenmessung. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (120), S. 3–8, 2013.
- Anschrift der Autoren**
Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Geodäsie und Geoinformation
Professur für Geodäsie
Nußallee 17, 53115 Bonn
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de
- Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger
Universität Stuttgart
Institut für Ingenieurgeodäsie
Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart
volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de
- Prof. Dr. Andreas Wieser
ETH Zürich
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Wolfgang-Pauli-Str. 15, 8093 Zürich, Schweiz
andreas.wieser@geod.baug.ethz.ch
- Prof. Dr. Wolfgang Niemeier
TU Braunschweig
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig
w.niemeier@tu-bs.de
- Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.