

**Festschrift anlässlich des
65. Geburtstages von Herrn
o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen**

**Veröffentlichung des Instituts für
Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie**

ISSN 1811 - 8380

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Heft Nr. 71, 2005

Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen

**Veröffentlichung des Instituts für
Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie**

ISSN 1811 - 8380

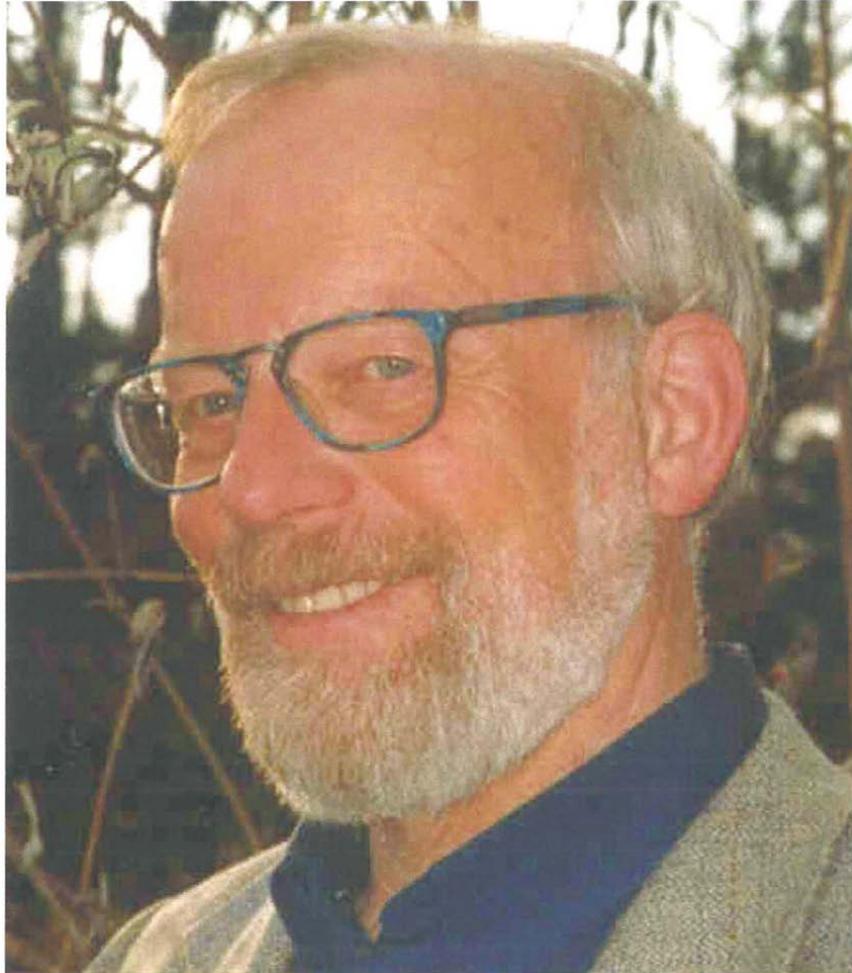
Herausgeber und Verleger:

Dr. Johannes Fabiankowitsch
Dipl.-Ing. Andreas Eichhorn
Dr. Michaela Haberler
Dr. Alexander Reiterer

Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29

Die Kosten für den Druck werden aus dem Globalbudget des Institutes getragen.

Druck: KOPIE, A-1040 Wien
Auflage: 150 Stück



Vorwort

Am 23. März 2005 begeht Universitätsprofessor Dr.-Ing. Heribert Kahmen seinen 65. Geburtstag. Mit dieser Festschrift gratulieren ihm Kollegen und Schüler sehr herzlich.

Im vorliegenden Band ist es auf hervorragende Weise gelungen, aktuelle Beiträge zu den Themenschwerpunkten bildgebende Messsysteme, Fuzzy-Methoden in der Ingenieurgeodäsie, Anwendung wissensbasierter Techniken in der Deformationsanalyse, Sensortechnik und Monitoring zusammenzustellen. Alle Autoren standen im Laufe der Jahre mit dem Jubilar als Kollegen, Assistenten oder Doktoranden in enger Verbindung.

Heribert Kahmen hat es immer vortrefflich verstanden, neue Technologien, komplexe Messkonzepte und anspruchsvolle Auswertemethoden für die Ingenieurgeodäsie zu nutzen und am Institut für Geodäsie und Geophysik wie auch innerhalb des Studiengangs Vermessung und Geoinformation der TU Wien zu vertreten. Mit großem Erfolg hat er sein umfangreiches Wissen, seine Neugier und Risikobereitschaft und sein „Gespür“, zukünftige Trends innerhalb des weitgestreuten Betätigungsfeldes der Ingenieurgeodäsie zu erkennen, in Lehre und Forschung eingebracht. Daraus resultieren eine umfangreiche Zahl von Veröffentlichungen, mehrere Lehrbücher, Gastprofessuren und Beteiligungen an zahlreichen nationalen und internationalen Kooperationsprojekten. Die vielen Absolventen der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, die in den entsprechenden Berufsfeldern in Wirtschaft, Industrie und Forschung sehr erfolgreich tätig sind, bestätigen seine Leistungen als Hochschullehrer.

Stellvertretend für den ganzen Fachbereich und für das Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien, im Namen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, wie auch als Kollege und Freund wünsche ich dem Jubilar alles Gute zum Geburtstag und beste Gesundheit. Weiterhin viel Spaß und Freude bei seinen Aktivitäten außerhalb der Universität, sei es im Chorgesang oder im Kreise seiner Familie.

Wien, im März 2005

Harald Schuh

(Vorstand des Instituts für Geodäsie und Geophysik)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Institut für Geodäsie und
Geophysik

Einladung

zum

Festkolloquium

anlässlich des 65. Geburtstages von

**Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing.
Heribert Kahmen**

Am Mittwoch, dem 23. März 2005
Beginn um 14:00 Uhr
Im Geodätenhörsaal, 3. Stock
Gußhausstr. 27-29, 1040 Wien

Programm

Durch das Programm führt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Schuh
Institut für Geodäsie und Geophysik

Grußworte

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Peter Skalicky**
Rektor der Technischen Universität Wien

Univ.-Prof. Dr. phil. Dietmar Dorninger
*Dekan der Fakultät für Mathematik und
Geoinformation*

Laudatio

Em. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte
*Geodätisches Institut
Universität Bonn*

Festvorträge

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Wolfgang Niemeier**

*Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Technische Universität Braunschweig*

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Thomas Wunderlich**

*Lehrstuhl für Geodäsie
Technische Universität München*

Schlussworte

Im Anschluss an das Festkolloquium wird
zu einem Stehempfang im Seminarraum 121,
3. Stock, Raumnummer CA0322 eingeladen.

Um Antwort wird bis 11. März 2005 gebeten

Tel.: +43-1-58801-12804/12841 oder 12804
Fax: +43-1-58801-12894
e-mail: fabian@pop.tuwien.ac.at
silvia.spitaler@tuwien.ac.at

INHALTSVERZEICHNIS

Laudatio

- Bertold Witte
Heribert Kahmens Beitrag zur Geodätischen Messtechnik und zur Ingenieur-
geodäsie-Laudatio zur Vollendung des 65. Lebensjahres 11

Fachvorträge

- Wolfgang Niemeier
Mehrskaliges geometrisches Monitoring - Aufgaben für die Ingenieurgeodäsie 23
- Thomas Wunderlich
Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten 29

Beiträge von Mitarbeitern und Dissertanten

- Klaus Chmelina
Anwendung Wissensbasierter Techniken zur Analyse von Verschiebungen im
Tunnelbau 43
- Andreas Eichhorn
Identifikation von dynamischen Deformationsprozessen mit Methoden der
adaptiven KALMAN-Filterung 49
- Johannes Fabiankowitsch
Untersuchungen an einem Inclinometer vom Typ Lucas Schaevitz T335 57
- Michaela Haberler
Einsatz von Fuzzy Methoden in der Ingenieurgeodäsie am Beispiel eines tek-
tonischen Überwachungsnetzes 65
- Ismail Kabashi
Ermittlung des Beitrags des wirksamen Refraktionskoeffizienten durch simul-
tane Videotheodolit-Messungen 73
- Sinisa Mastelic Ivic
Modellanpassung mit modifizierten Kalman-Filtern bei Deformationsanalysen 81
- Anton Niessner
Ausnutzung der Farbinformation bei automatischen Theodolitmesssystemen
mit integrierten CCD-Kameras 89
- Alexander Reiterer
Wissensbasierte Entscheidungsfindung für bildgebende Messsysteme 95
- Günther Retscher
Allgegenwärtige Positionierungsmethoden für Intelligente Navigationssysteme 103
- Miodrag Roić
NSDI based on Spatial Databases 111
- Lebenslauf** 117
- Veröffentlichungen** 123
- Dissertationen** 131

Heribert Kahmens Beitrag zur Geodätischen Messtechnik und zur Ingenieurgeodäsie

Laudatio zur Vollendung des 65. Lebensjahres

Bertold Witte, Bonn

1 Vorbemerkung

Als ich die ehrenvolle Einladung erhielt, aus Anlass der Vollendung des 65. Lebensjahres von Herrn o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen die Laudatio zu halten, habe ich die Möglichkeit gerne wahrgenommen, die großen Verdienste des Jubilars zu würdigen, die er sich insbesondere bei der Weiterentwicklung der Ingenieurgeodäsie erworben hat. Deren weiterer Ausbau ist uns beiden zu einer Herzensaufgabe geworden. Schließlich bietet diese Feier für mich die Gelegenheit, die Verbundenheit zwischen der TU Wien und der Universität Bonn, zwei klassischen geodätischen Ausbildungsstätten, zum Ausdruck zu bringen. Diese Verbundenheit, die nicht nur mit der Person von Heribert Kahmen sondern auch durch andere Kollegen gegeben ist, möchte ich als einen Mosaikstein im Einigungsprozess der europäischen Völker sehen, den zu fördern uns allen ein aufrichtiges Bedürfnis ist.

Zur Vollendung des 65. Lebensjahres - in Deutschland ist damit üblicherweise die Emeritierung verbunden - gehören die Besinnung auf das Erreichte und damit die Beiträge des Jubilars zur eigenen Disziplin, der Ingenieurgeodäsie, aber auch eine kurze Vorschau auf Entwicklungstendenzen dieser Disziplin. Es ist nicht möglich, hier auf die bisher veröffentlichten 112 Beiträge in Zeitschriften und Proceedings sowie auf die 20 Bücher einzugehen, die Heribert Kahmen selbst verfasst hat oder bei denen er als Herausgeber beteiligt war. Ich werde daher nur eine Auswahl treffen. Auch die vielen Forschungsprojekte und Kooperationen mit der Praxis können nur sporadisch vorgestellt werden.

Zunächst soll ausgeführt werden, was unter Ingenieurgeodäsie zu verstehen ist und welche Aufgaben dieser Disziplin zugewiesen sind. Die prägnante Definition der Aufgaben der Ingenieurgeodäsie ist Heribert Kahmen in einem Beitrag der AVN des Jahres 2003 meisterhaft gelungen, nämlich „1. die Aufnahme und Darstellung des örtlichen Bestandes, 2. die geometrische Übertragung (Absteckung) in die Örtlichkeit und 3. die messtechnische Kontrolle (Überwachung).“ In Anlehnung an Rinner [1977] möchte ich versuchen, diese Kernaussage in einen größeren Rahmen zu stellen.

2 Was ist Ingenieurgeodäsie?

Die Geodäsie ist nach der Bedeutung des Wortes die Wissenschaft von der Einteilung der Erde. Um einteilen zu können, müssen die Form und Größe des zu teilenden Objektes und die Prinzipien bekannt sein, nach welchen die Einteilung erfolgen soll. Die erste Frage betrifft die Figur der Erdoberfläche oder Teile derselben, die zweite die Ingenieur Tätigkeit zur Einteilung und Veränderung der Erdoberfläche. Demnach hat die Geodäsie zwei Wurzeln; eine physikalisch-geowissenschaftliche, welche sich mit Fragen der Figur der Erde und deren Darstellung befasst, und eine ingenieurwissenschaftliche, welche aus der Tätigkeit im Zusammenhang mit Ingenieurprojekten folgt. Als Ingenieurgeodäsie oder Ingenieurvermessung seien daher all jene Vermessungsarbeiten verstanden, welche in Verbindung mit der technischen Planung,

der Absteckung und der Überwachung von technischen Objekten durchzuführen sind. Als Beispiel möchte ich hier eine Vermessung nennen, die ungefähr 2500 Jahre zurückliegt: der Tunnel des Eupalinos auf Samos (Abb.1). Auf zwei weitere Beispiele sei ebenfalls verwiesen, nämlich auf die Vermessung des Gotthard Eisenbahntunnels vor 130 Jahren (Abb.2) und die des Gotthard-Basistunnels in der jetzigen Zeit (Abb.3). Diese außergewöhnlichen ingenieur-geodätischen Leistungen zeigen die Wertung, Anerkennung und Aufmerksamkeit, die diese Arbeiten nicht nur zu ihrer Zeit gefunden haben. Auch auf die jeweils unterschiedlichen technischen Hilfsmittel sei hingewiesen.

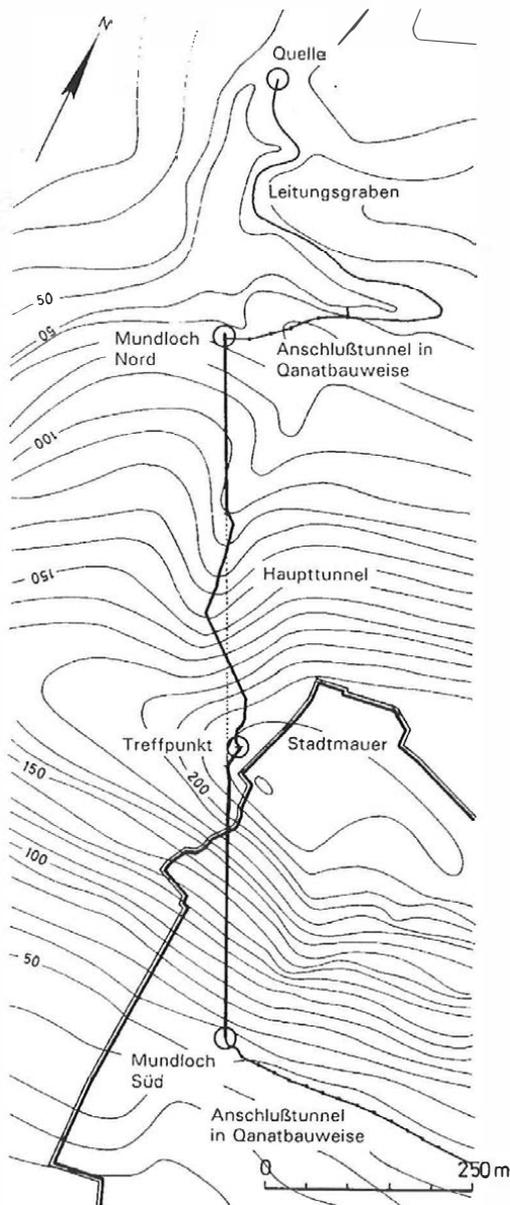


Abb. 1: Eupalinos-Tunnel nach Grewe [1998] und Kienast [1977]

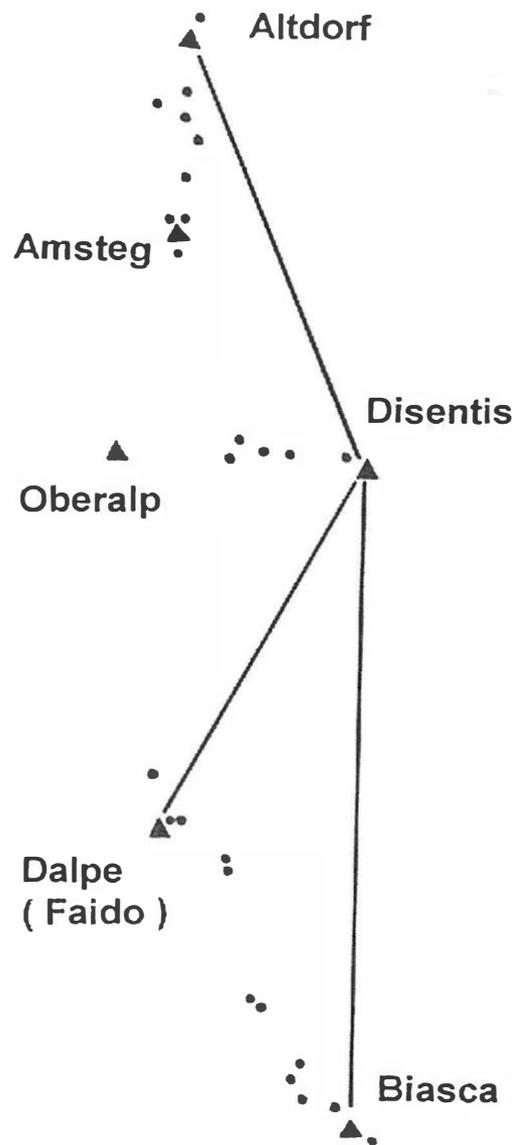
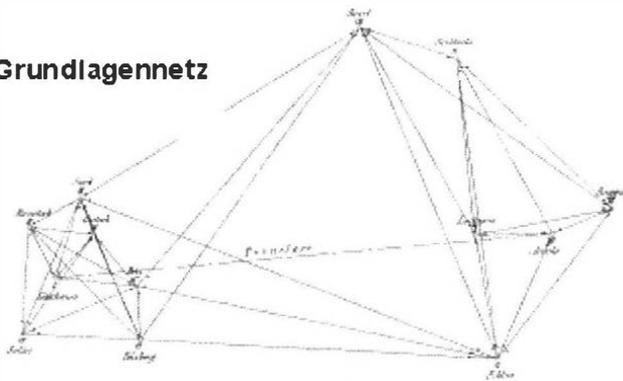
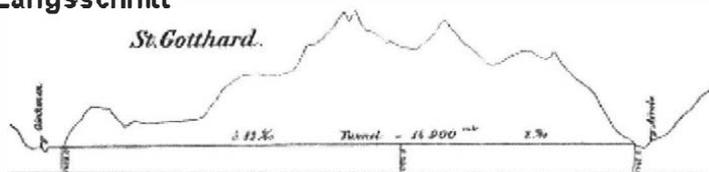


Abb. 3: GPS-Netz des Gotthard-Basistunnels nach Haag u.a. [1996]; die Punkte Biasca, Dalpe, Disentis u. Aldorf waren permanent besetzt

Grundlagennetz



Längsschnitt



**Repetitions-
theodolit**

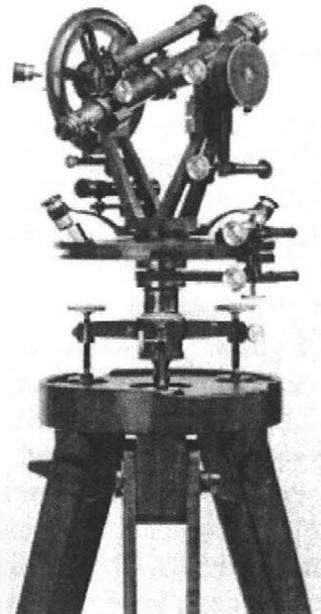


Abb. 2: Gotthard Eisenbahntunnel, Bauzeit 1872 – 1882, nach Schwarz [2004]

Der Name Ingenieurgeodäsie soll ausdrücken, dass geodätische Arbeiten oder Vermessungen in Verbindung mit technischen Projekten und wissenschaftlichen Experimenten anderer Disziplinen ausgeführt werden. Der Ingenieurgeodät ist daher Mitarbeiter anderer Ingenieure und übt seine Tätigkeit in einem Team, in unmittelbarem Kontakt und in Abhängigkeit vom Fortschritt eines technischen Projektes aus.

In allen Fällen muss der Ingenieurgeodät zahlenmäßig belegte Aussagen machen, welche Urkundswert haben und für weitere Überlegungen unbestritten verwendet werden können. Er muss daher auch in der Lage sein, die Güte der Aussagen objektiv zu beurteilen und numerisch belegte Aussagen über die im Zuge der Bauausführung zu erwartenden oder erfolgten Abweichungen vom Projekt zu machen. Auch wirtschaftliche Gesichtspunkte müssen beachtet werden, um neben befriedigenden fachlichen Lösungen die wirtschaftliche Forderung nach möglichst geringen Kosten zu erfüllen. Nicht Verfahren höchster Genauigkeit sind das Ziel sondern Verfahren, welche eine noch zulässige Abweichung und optimale Eigenschaften für technische und wirtschaftliche Erfordernisse besitzen.

Die konkreten Aufgaben der Ingenieurgeodäsie hängen naturgemäß von der Art der durchzuführenden technischen Projekte und von den angewendeten Verfahren ab. Da sich diese ständig ändern, neue Forderungen gestellt werden und neue Verfahren entstehen, ist auch die Ingenieurgeodäsie in ständiger Entwicklung. Die Problemstellungen ändern sich, die für die Durchführung verfügbare Zeit wird geringer, die Genauigkeit der geodätischen Aussage soll aber größer sein. Von der Ingenieurgeodäsie gehen daher Impulse an Wissenschaft und Industrie, neue Verfahren und neue Geräte für die Messung, Berechnung

und statistische Analyse zu entwickeln; eine Aufgabe, der sich unser Jubilar ganz besonders angenommen hat.

3 Beiträge des Jubilars zur Weiterentwicklung der geodätischen Messtechnik und der Ingenieurgeodäsie

Im ersten Jahrzehnt seiner wissenschaftlichen Tätigkeit hat sich Heribert Kahmen überwiegend den zu Beginn der 70er Jahre aktuellen Fragestellungen der geodätischen Messtechnik gewidmet, einer Teildisziplin der Ingenieurgeodäsie. In dieser Zeit war eines der großen Forschungsziele die Genauigkeitssteigerung der elektrooptischen Distanzmesser. Die hierfür benutzten Instrumente waren noch recht neu, und insbesondere deren Phasenmesssysteme ließen sich noch erheblich verbessern, was ganz besonders für die später nur noch verwendeten digitalen Phasenmesssysteme zutrif. Durch die von Heribert Kahmen durchgeführten Untersuchungen und die vorgeschlagene Optimierung der Anzahl von Einzelmessungen und der Messzeit konnten beachtliche Fortschritte erzielt werden. Ihm gelang es, die durch das elektronische Rauschen und die durch die Turbulenz des Ausbreitungsmediums hervorgerufenen Phasenschwankungen als eindimensionalen stochastischen Prozess mit dem Parameter Zeit zu beschreiben. Bei seinen experimentellen und theoretischen Ergebnissen zeigte sich eine weitgehende Übereinstimmung, so dass seine theoretischen Modellfunktionen für die Schätzung des günstigsten äquidistanten Zeitabstandes der Einzelmessungen – bekanntlich wird am Display das Mittel aus etwa 1000 Einzelmessungen angezeigt – eine gute Annäherung an die wirklichen Verhältnisse lieferten.

Nicht nur die Verbesserung von EDM-Instrumenten sondern auch die vergleichende Untersuchung der Leistungsfähigkeit von industriell gefertigten elektrooptischen Distanzmessern gehörte zum damaligen Forschungsgebiet von Heribert Kahmen. Derartige Untersuchungsergebnisse waren für die Vermessungspraxis sehr wichtig, weil so dem Praktiker Entscheidungskriterien an die Hand gegeben wurden. Berichte, wie „Die Bedeutung des Lasers für die Geodäsie“ oder ganz besonders das Buch „Elektronische Messverfahren in der Geodäsie“, zeigen die Breite von Heribert Kahmens Wissensstand in seinem damaligen Hauptarbeitsgebiet der geodätischen Messtechnik. Dieses Buch fand große Beachtung, wie die schon ein Jahr später herausgekommene zweite Auflage belegt. Auch die Publikation über „Mikroprozessoren und elektronische Tachymeter“ sowie weitere Arbeiten in den Jahren 1979 bis 1981 zeigen, wie Heribert Kahmen am Puls der Zeit die Entwicklung unserer geodätischen Instrumente kritisch verfolgt und durch Denkanstöße in die für die ingenieurgeodätische Praxis richtige Richtung gelenkt hat. Hierfür seien die vier von ihm identifizierten Fragekomplexe genannt: „Steuerung und Überwachung der Systeme, Analog-Digitalwandlung der Messwerte, Speicherung der Daten und Kommunikation mit Computern, Einsatzkriterien der Messsysteme“ (Abb. 4). Nicht nur instrumentelle Entwicklungen sondern auch die richtigen Modelle zur Berücksichtigung des refraktiven Einflusses der Atmosphäre während der Messung sind Forschungsgegenstand in dieser Zeit. In diesem Bereich wird sogar experimentell der bis heute äußerst aufwändige Weg über die Ausnutzung des Dispersionseffektes mit der 2-Farben-Methode beschritten. Darüber hinaus beschäftigte sich Heribert Kahmen mit komplexen Messsystemen, also mit unterschiedlichen Sensoren, zur „Geodätischen Kontrolle und Überwachung industrieller Ingenieurbauwerke“.

1983 erschien in der Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV) der Aufsatz „Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beob-

achter“. Diese durch die markscheiderische Praxis angestoßene Entwicklung war die Geburtsstunde der Robottachymeter, also der Instrumente, die selbstständig ein Ziel einstellen können, und stellt einen Meilenstein in der Entwicklungsgeschichte geodätischer Instrumente dar.

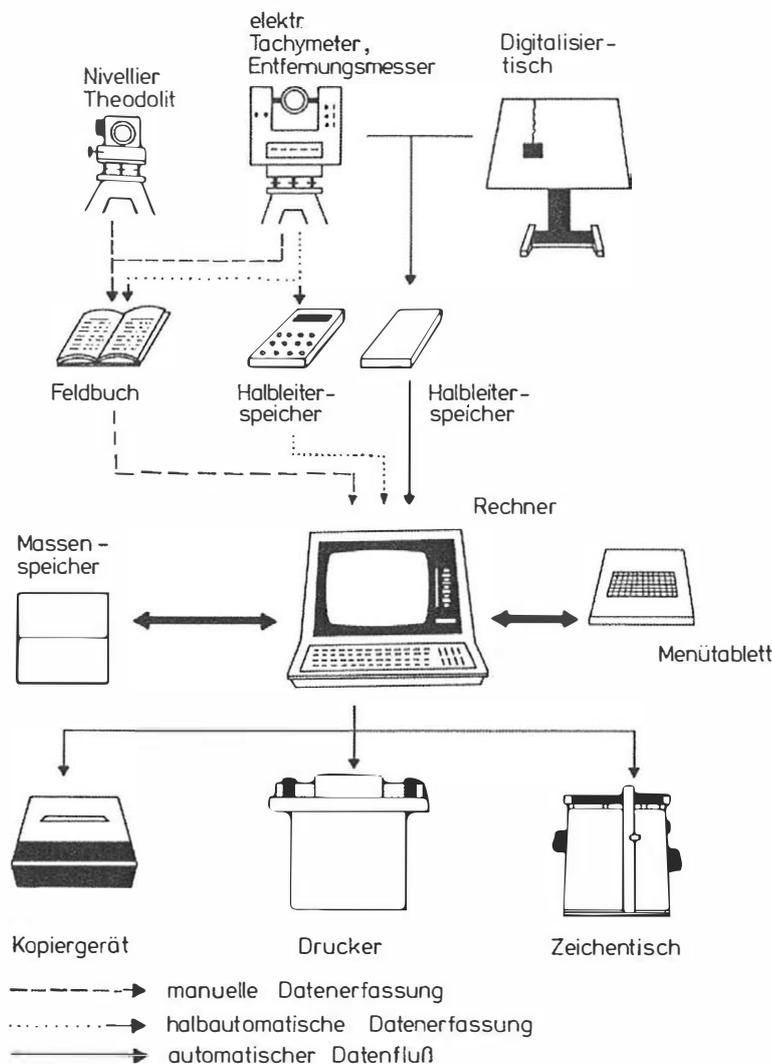


Abb. 4: *Komponenten eines interaktiven Vermessungssystems (1981)*

Die rein technische Lösung der automatischen Zielerkennung und Zieleinstellung reicht jedoch für den automatischen Einsatz eines polaren Vermessungssystems noch nicht aus; sie stellt nur eine erste Entwicklungsstufe dar. Äußere Störungen, wie z. B. längere oder kurzzeitige Zielstrahlunterbrechungen, Einflüsse wechselnder Witterungsbedingungen, plötzliches Fehlen von Zielmarken, Stromausfall usw., würden das System schnell außer Betrieb setzen. Es sollte zusätzlich lernfähig sein. In einer zweiten Entwicklungsstufe wurden dem System daher über Software all die Erfahrungen eingegeben, über die ansonsten der Operateur vor Ort verfügt. Eine dritte Entwicklungsstufe umfasst die Herstellung aufgabenspezifischer Software wie z.B. Absteckungsprogramme, Programme für Deformationsanalysen und die damit gekoppelte Auslösung von Warnsignalen. Ein derartiges modulares, polares Vermessungssystem, das den Namen „GEOROBOT“ (Abb. 5, 6) erhielt und sowohl ein einzelnes Ziel als

auch Punktgruppen verfolgen kann, wurde von unserem Jubilar entwickelt und später zum „GEOROBOT II“ verbessert.

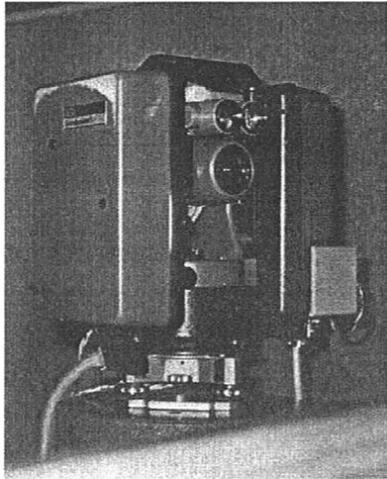


Abb. 5: GEOROBOT

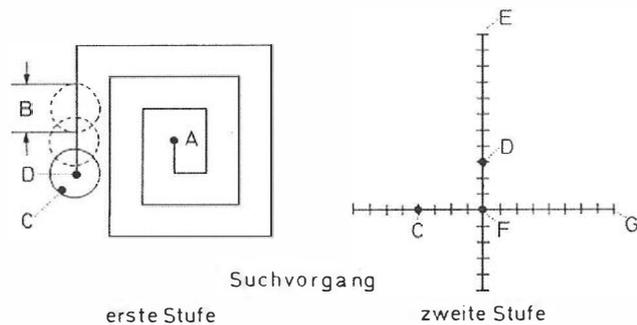


Abb. 6: Suchvorgang mit dem GEOROBOT

Eine hochinteressante Entwicklung in Verbindung mit der Industrie führte zu einem rechnergestützten vektoriellen Vermessungssystem für die Steuerung des Fertigungsprozesses und die Aufmessung von Kühlturmschalen. Die Problematik sei kurz behandelt: Rechnergestützte vektorielle Vermessungssysteme ermöglichen es, die Schale des Bauwerkes unmittelbar in einem Arbeitsgang in Bezug auf das Koordinatensystem des Messinstrumentes mit Raumvektoren abzustecken und aufzumessen. Die Raumvektoren können on-line von dem Mikroprozessor des Messinstrumentes in radiale Vektoren des Bauwerkes transformiert werden. Es liegen dann unmittelbar ausreichende Informationen vor, mit denen direkt steuernd in die Produktion eingegriffen werden kann. Der Übergang zum Computer-Aided Manufacturing (CAM) war so für den Kühlturmschalenbau möglich geworden.

Ein solches System muss erstens durch Software mit den Erfahrungen eines Vermessungsingenieurs über die Absteckung und Aufmessung von Bauwerken sowie Deformationsanalysen ausgestattet sein. Zweitens soll es über Kenntnisse eines Bauingenieurs verfügen, die die Produktion des Bauwerkes im Rahmen von spezifizierten Qualitätsanforderungen umfassen. Drittens sollen Erfahrungen über die Herstellungsgeschichte der bereits fertig gestellten Bauwerksteile gespeichert sein, damit diese bei der weiteren Produktion berücksichtigt werden können. Ein derartiges Expertensystem lässt es zu, die Produktion in Bezug auf die Ausführungsqualität in einem Regelkreis weitgehend automatisch ablaufen zu lassen. Ein Beitrag unseres Jubilars zur Rationalisierung von Bauabläufen.

Diese projektbezogenen Forschungsergebnisse wurden auf der ersten Tagung „Optical 3-D Measurement Techniques“ vorgestellt, einer weltbekannten Folge von Symposien, die Heribert Kahmen gemeinsam mit Armin Grün von der ETH-Zürich begründet hat, und die im 2- bzw. 4-jährigem Rhythmus in Wien oder in Zürich ausgerichtet werden.

Die Bedeutung von Messrobotern, der begrifflichen Verallgemeinerung für den GEOROBOT, zeigt sich z. B. bei der Triangulation, die sich jetzt in aktive und passive Verfahren unterscheiden lässt. Die passive Triangulation ist als klassisches Verfahren in der Geodäsie und

Photogrammetrie bekannt. Als Zielpunkt für Richtungsmessungen dienen kontrastreiche Ecken des Objektes oder an dem Objekt befestigte Zielmarken. Die aktive Triangulation basiert auf den Techniken der passiven Triangulation, nutzt jedoch aktive Lichtquellen, z.B. einen Laser, um punktweise, linienweise oder gitterweise Zielmarken auf dem Objekt entstehen zu lassen. Da diese Zielmarken sich jetzt vom Hintergrund abheben, kann die Zielerkennung und Zielverfolgung schneller erfolgen.

So lassen sich mit zwei Messrobotern Deformationsmessungen an einer Kühlturmschale ausführen. Ein erster Messroboter, dessen Basisinstrument ein Theodolit ist, wird so programmiert, dass Laserpunkte längs meridionaler Profile auf die Kühlturmschale projiziert werden, wobei der Laser koaxial zur Achse des Zielfernrohrs angeordnet ist. Zielpunkterzeugung und Richtungsbestimmung sind also miteinander kombiniert. Ein zweiter Messroboter, dessen Basisinstrument ein Videotheodolit ist, sucht sensorgeführt nacheinander die Zielmarken auf, um von einer zweiten Position aus Richtungen zu messen. Die Zielerfassung erfolgt nicht mehr mit Hilfe des Trägersignals des Distanzmessers sondern, wie die Instrumentenbezeichnung es schon erkennen lässt, mit einer integrierten CCD-Kamera. Videotheodolite lassen sich auch als Soloinstrumente zu Deformationsmessungen einsetzen, wie dies am hiesigen Institut erfolgreich bei der Belastungsprobe der neuen Donaubrücke bei Bratislava demonstriert wurde. Videotheodolite und ihr Potenzial wurden von jetzt ab zu einem Forschungsschwerpunkt unseres Jubilars und seines Teams.

Darüber hinaus gab es in dieser Zeit noch weitere Projekte wie die Untersuchungen von CCD-Zeilen-Sensoren für den Einsatz als Längenmesssensor in hydrostatischen Messsystemen. Auch das Potential der GPS-Technik, die sich weltweit in der Landesvermessung bewährt hatte, wurde von Heribert Kahmen in Form des DGPS für die Gewässervermessung genutzt, ein Projekt, das gemeinsam mit der Donaukraft AG angegangen wurde. Auf Grund der umfangreichen Versuchsmessungen konnte nachgewiesen werden, dass die on-line Positionierung mit DGPS und Codeverfahren eine ausreichende Genauigkeit für die Positionierung von Vermessungsschiffen liefert, weshalb auf der Donau mit dem Ortungsverfahren DGPS gearbeitet werden kann. Diese Methode beinhaltet gegenüber den bisherigen elektrooptischen Verfahren eine Reihe von Vorteilen, von denen ich hier nur die erhebliche Einsparung an Personalkosten nennen möchte.

1993 erscheint die völlig neu bearbeitete und erweiterte 18. Auflage der „Vermessungskunde“, das Standardwerk der angewandten Geodäsie, in dem das bisher in drei einzelnen Ausgaben, den Göschen-Bändchen, komprimierte Wissen unseres Fachs in einem repräsentativen Band zusammen gefasst wurde. Die einzelnen Göschen-Bändchen waren schon seit 1983 durch unseren Jubilar ständig aktualisiert worden. Jetzt gelang ihm eine Gliederung nach neuzeitlichen Gesichtspunkten in einer geschlossenen Darstellung über die gesamte Breite unserer Disziplin; ein Werk, das den Herausforderungen der heutigen Zeit entspricht. Der erfolgreiche Neubeginn zeigte sich schnell. Schon nach vier Jahren kam die nächste Auflage heraus; dies in einer Zeit, in der die Studienanfänger in unserem Fach und im Bauingenieurwesen stark rückläufig sind.

Die Verlegung von Schienen für Hochgeschwindigkeitsbahnen hat bekanntlich mit höchster Genauigkeit zu erfolgen, eine Aufgabe, die sich unser Jubilar mit seinem Team im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Gleisvermessung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren widmete. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die in dieser Zeit

neueren Positionierungsverfahren, wie Messroboter und DGPS, in Kombination mit weiteren Sensoren sich für die Neuverlegung oder Instandhaltung von Gleisanlagen bei höchsten Genauigkeitsanforderungen verwenden lassen, allerdings nur, wenn diese mit linearen Filterverfahren gekoppelt und die Filterparameter sehr sorgfältig betrachtet werden.

Für die der Gleisvermessung vorgelagerte Vermessung konnten Heribert Kahmen und sein Team ein modulares Konzept entwickeln und bei der Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln - Rhein/Main praktisch realisieren. Es wurde ein hierarchischer Aufbau gewählt, der auch die Sondernetze, wie Tunnel- und Brückennetze, einbezog. Das Grundnetz umfasste zwei Stufen, wobei in der Stufe 2 der Punktabstand etwa 1 km betrug. Die Beobachtungen erfolgten mit GPS-Zweifrequenzempfängern, jeweils getrennt für jede Stufe. Zur weiteren Verdichtung der Stufe 2 wurden trassennahe Polygonzüge von etwa 1 km Länge beidseits der Trasse mit rund 200 m Punktabstand und Verbindungsdiagonalen in der Mitte beobachtet. Die wirtschaftliche Realisierung basierte auf Simulationsrechnungen für die Netzentwürfe und Messanordnungen, um den Genauigkeitsanforderungen durch eine Optimierung zu entsprechen.

Die Bestimmung von Deformationen bei Verwendung von Videotheodoliten an nicht signalisierten Objekten ist Gegenstand eines Forschungsprojektes, mit dem sich der Jubilar und sein Team bis heute beschäftigen. Natürlich hat sich die Ausrichtung der Forschung mit dem Erkenntnisgewinn der zurückliegenden Jahre leicht geändert. Wie erfolgt nun die Objekterfassung bei Verzicht auf Zielpunktmarkierungen?: Das Messsystem besteht aus zwei Videotheodoliten, die nach dem Prinzip des räumlichen Vorwärtseinschneiden betrieben werden. Die Fokussierung der integrierten CCD-Farbkameras wird durch Motore nachgesteuert. Die Achsen der Theodolite sind mit Servomotoren gekoppelt, so dass sich über einen Computer, der über entsprechende Programme verfügen muss, die Kameras rotieren lassen und so ein Mosaik von Bildern entsteht. Bei geeigneter Kalibrierung des Systems sind alle Einzelbilder georeferenziert, da die Drehwinkel der Horizontal- und Vertikalachse mit hoher Genauigkeit zur Verfügung stehen. Für die Praxis werden zwei Kamerasysteme, ein Weitwinkelsystem für die Erzeugung von Übersichtsbildern und ein System zur stärkeren Vergrößerung, eingesetzt. Üblicherweise wird das Messsystem im Master-Slave-Modus betrieben. Zur Lösung des Problems sind verschiedene Verfahren auf Anregung des Jubilars entwickelt worden:

Der Master-Theodolit scannt die Szene, während der Slave-Theodolit dem Master folgt, in dem dieser automatisch nach homologen Bildausschnitten bzw. homologen Punkten sucht. Für diese Punkte P_i , die der Master-Theodolit zuvor identifiziert hat, müssen Näherungskoordinaten zur Verfügung stehen, die sich aus der Distanz zwischen Instrumentenstandpunkt T_I und homologem Punkt P_i sowie den Horizontal- und Vertikalwinkeln berechnen lassen (Abb. 7). Die Distanz lässt sich über die Autofokusfunktion des Theodolitfernrohrs indirekt oder über die reflektorlos gemessene Entfernung direkt bestimmen, wenn das Instrument über einen derartigen Distanzmesser verfügt. Für den Slave-Theodolit ist ein schneller Tracking-Algorithmus entwickelt worden, der auf der Geometrie der Epipolar-Linien aufbaut. Eine Epipolar-Linie ist durch den Schnitt zweier Ebenen gegeben, wobei hier die eine Ebene durch die Punkte T_I , T_{II} (Standpunkt des Slave-Theodolits) und P_i sowie die andere durch das CCD-Array des Slave-Instruments festgelegt wird. Dieses Verfahren lässt sich jedoch nur anwenden, wenn das Objekt durch Strukturlinien und Textur auf der Oberfläche eindeutig beschrieben wird.

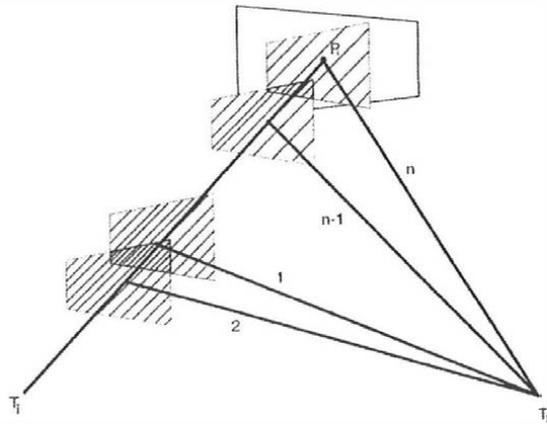


Abb. 7: Tracking-Verfahren des Slave-Theodolits

Falls dies nicht zutrifft, lassen sich Deformationen nicht nachweisen. Es muss dann ein modifiziertes Messverfahren angewandt werden, das mit virtuellen Gitterlinien arbeitet. Der Master-Theodolit muss jetzt zusätzlich über einen Laser verfügen, dessen sichtbarer Laserstrahl koaxial zur optischen Achse des Fernrohrs verläuft und mit dem leuchtende Punkte auf die Oberfläche des Objekts projiziert werden. Der Slave-Theodolit soll mit Hilfe seiner CCD-Kamera und entsprechender Bildverarbeitungssoftware diese Leuchtpunkte automatisch anzielen. Für die Berechnung der Koordinaten dieser Punkte über räumliches Vorwärtseinschneiden werden die Horizontal- und Vertikalwinkel benötigt, die nach dem Auffinden homologer Punkte von beiden Theodoliten erhalten werden. Dazu muss der Master-Theodolit iterativ längs der Gitterlinien die Durchstoßpunkte mit der Oberfläche identifizieren, wobei in gleichen Schritten der Slave dem Master folgt und schließlich die Durchstoßpunkte als homologe Punkte detektiert.

Ein weiteres Verfahren zur Objekterkennung und für Deformationsuntersuchungen bildet das menschliche visuelle Wahrnehmungsvermögen nach, in dem eine Untersuchung von Objekten im CCD-Bild nach unterschiedlichen Farben erfolgt, wozu ein Algorithmus entwickelt wurde, der einzelne Objekte extrahiert und deren Formänderungen analysiert. Als Ergebnis liegt eine semantische Aussage vor, ob Deformationen aufgetreten sind.

Schon jetzt lässt sich sagen, dass die automatisierte Zielpunkterfassung dank der Wiener Forschungsarbeiten Realität geworden ist, auch wenn einzelne Verbesserungen von mir nicht genannt wurden, wie z. B. die Verwendung von Interest-Operatoren. Mit diesem gelungenen Forschungsprojekt hat Heribert Kahmen die Ingenieurgeodäsie wieder einen entscheidenden Schritt weiter gebracht.

Die hier vorgelegte, subjektive Auswahl von nachhaltigen Forschungsarbeiten unseres Jubilars haben einen Einblick in die Breite seines Œuvre vermittelt und verdeutlichen seine wesentlichen Beiträge zur Weiterentwicklung der Ingenieurgeodäsie.

4 Akademischer Lebensweg

Die wissenschaftlichen Leistungen von Heribert Kahmen spiegeln sich auch in den akademischen Stationen seines Lebenswegs wider. Nach dem Studium der Geodäsie in Bonn und

Berlin und einer anschließenden verwaltungstechnischen Ausbildung im Referendariat, die er mit dem Assessorexamen abschließt, wird Heribert Kahmen im Jahre 1969 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut der Universität Bonn und Assistent von Hans Zetsche, dem zu dieser Zeit angesehensten Kollegen auf dem Gebiet der Geodätischen Messtechnik. Der Grundstein für sein profundes Wissen in dieser Disziplin wird hier gelegt. Zur vollständigen Durchdringung der im Rahmen des Dissertationsthemas bearbeiteten angewandten Forschung beschäftigt sich Heribert Kahmen auch mit den relevanten theoretischen Fragestellungen. Die Symbiose gelingt ihm so gut, dass wegen der starken theoretischen Komponente Erik Grafarend gerne das Korreferat übernimmt.

Seine Dissertation und weitere Publikationen haben ihn in der Fachwelt bekannt gemacht. So verwundert es nicht, dass die Kollegen Heinz Draheim und Eugen Kunz das Nachwuchstalente im Jahre 1973 nach Karlsruhe holen und ihn mit den Aufgaben eines Oberingenieurs am dortigen Geodätischen Institut betrauen. Hier kann sich Heribert Kahmen mit Arbeiten aus dem gesamten Gebiet der geodätischen Messtechnik einschließlich der Anwendung stochastischer Prozesse qualifizieren, die ihn als zukünftigen Hochschullehrer ausweisen.

Bereits nach fünf Jahren wird er 1978 auf die Professur für Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie der Universität Hannover berufen und kann hier auf der Basis seines breiten und gründlichen Fachwissens seinen Ruf als exzellenten Hochschullehrer aufbauen. Davon zeugen nicht nur die bedeutenden Publikationen und Forschungsprojekte, die im vorigen Abschnitt besprochen wurden, sondern auch ehrenvolle Beauftragungen als Gastprofessor an verschiedenen ausländischen Universitäten, wie in Griechenland, Brasilien und Kanada, sowie die Berufung in verschiedene Kommissionen der International Association of Geodesy (IAG) als Mitglied bzw. Präsident. Auch die Verleihung des international hoch angesehenen Carl-Pulfrich-Preises für außergewöhnliche Leistungen in der Geodäsie und Photogrammetrie belegt sein wissenschaftliches Renommee.

So erfolgreich Heribert Kahmen in Hannover auch wirkt und so wohl er sich dort dienstlich und privat auch fühlt, folgt er doch dem höchst ehrenvollen Ruf an die Technische Universität Wien auf den dortigen Lehrstuhl für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie als ordentlicher Professor im Jahre 1986. Hier in Wien entfaltet Heribert Kahmen eine solche Fülle von wissenschaftlichen Aktivitäten, wie kein anderer vor ihm. Davon zeugen die vielen Forschungsprojekte, die entweder staatlich oder mit Mitteln der Industrie oder auf Grund von internationalen wissenschaftlichen Kooperationen gefördert wurden, ebenso wie die zahlreichen Publikationen. Von diesen etwa 75 Veröffentlichungen, die hier in Wien entstanden sind, konnte ich im Rahmen dieser Würdigung nur einige herausgreifen. Wenn man diese Vielfalt von Einzelbeiträgen zur Weiterentwicklung unserer Disziplin betrachtet, so lässt sich feststellen, dass ohne die entscheidenden Beiträge von Heribert Kahmen die Ingenieurgeodäsie nicht dort stünde, wo sie heute steht. Die gemeinsam mit den international angesehenen Kollegen Brückl, Grün und Wunderlich ausgerichteten Symposien haben immer eine große Resonanz gefunden und bieten mit ihren in den Konferenzbänden bestens dokumentierten Vorträgen eine Fundgrube für spätere Arbeiten.

Natürlich ist Heribert Kahmen auch ein engagierter Lehrer, wie seine in mehreren Auflagen erschienen Lehrbücher belegen, von denen eines ins Englische übersetzt wurde. Auch die 23 betreuten Dissertationen, davon fünf als Korreferent, zeigen, dass Heribert Kahmen den wissenschaftlichen Nachwuchs motivieren kann. Sein Engagement für die IAG ist ungebrochen.

So ist er von 1995 – 2002 Präsident der Kommission 4 „Applications of Geodesy to Engineering“ und seit der Neuorganisation Chair der Sub-Commission 4.2 „Applications of Geodesy to Engineering“ von 2002 bis heute. Auch zahlreiche Gastprofessuren an verschiedenen ausländischen Universitäten bezeugen sein internationales Ansehen, wie die in Zagreb, Calgary, New-Brunswick, Wuhan und Sarajewo.

Abschließend möchte ich anfügen, wie ich persönlich und auch andere Kollegen und ehemalige Mitassistenten Heribert Kahmen sehen. Wir haben ihn als einen konzilianteren, hilfsbereiten Menschen erlebt, der stets ein offenes Ohr auch für die Probleme seiner Mitmenschen hat. Im persönlichen Umgang ist er trotz seiner großen Erfolge ein bescheidener Mensch geblieben. Einen Ausgleich für sein ungewöhnliches Engagement in Forschung, Lehre und in internationalen Kooperationen hat Heribert Kahmen in seiner Familie sowie in der Musik, am Klavier und als aktiver Chorsänger, gefunden. Auch anspruchsvolle Literatur begeistert ihn immer wieder. Seine verehrte Gattin hat ihn auf dem langen beruflichen Weg stets gefördert und diesen mitgetragen, wozu sicherlich oft viel Geduld aufzubringen war.

5 Ausblick und Schlussbemerkungen

Das so erfolgreiche bisherige Lebenswerk von Heribert Kahmen mag beim Leser vielleicht den Eindruck erwecken, auf dem Gebiet der Ingenieurgeodäsie seien nur noch wenige lohnenswerte Forschungsfelder übrig geblieben. Ich möchte daher einen Blick in die Zukunft wagen und einzelne Entwicklungstendenzen, die auch von unserem Kollegen Wilfried Schwarz aus Weimar [2004] geteilt werden, aufzeigen.

Mit Sicherheit werden sich der allgemeinen technischen Entwicklung folgend die instrumentellen Voraussetzungen für die Ingenieurgeodäsie verbessern. So kann ich mir gut vorstellen, dass Tachymeter, Laserscanner, Lasertracker und Laserradar zusammenwachsen. Ein erster Schritt für die Übernahme von Laserscanner-Aufgaben durch Tachymeter scheint mir die Entwicklung von Herrn Kollegen Scherer von der Ruhruniversität-Bochum zu sein. Die Verbindung von GPS-Empfänger und Tachymeter ist jetzt von der Firma Leica vollzogen worden; eine weitere Qualitätssteigerung wird durch das zukünftige europäische Satellitensystem Galileo erreicht. Auch die Kombination von CCD- mit PMD-Technologie (Photomischdetektor) und ebenso die faseroptischen Sensoren werden zu neuen Einsatzmöglichkeiten in der Ingenieurgeodäsie führen. Die seit über 100 Jahren versuchte Bestimmung des Refraktionseinflusses auf die Strecken- und Richtungsmessung scheint einer instrumentellen Lösung nahe. Schließlich sei noch das automatische Erkennen von Objektstrukturen in digitalen Bildern genannt, eine Aufgabe, mit der sich unser Jubilar auch beschäftigt hat. Was bedeuten diese Entwicklungen für die Messverfahren?

Zunächst scheint sich ein Wandel in der Messphilosophie abzuzeichnen, weil das charakteristische Verhalten eines Bauwerks nicht mehr durch Aufmessung einiger weniger repräsentativer Punkte sondern statt dessen durch eine ungeheuer große Zahl von Messpunkten flächhaft erfasst wird. Auch die permanente Überwachung von Bauwerken, wie von Talsperren, Brücken u. dgl., wird durch neue Sensoren verbessert werden. Das automatisierte Bauen einschließlich einer on-line geometrischen Qualitätskontrolle wird kommen und die Ingenieurgeodäten herausfordern. Die statische Anwendung wird mehr und mehr durch eine kinematische ersetzt.

Möge Heribert Kahmen noch lange diese herausfordernden Entwicklungen beeinflussen und befruchten. Auch in Zukunft muss der im Baugeschehen tätige Geodät sich durch Aufrichtigkeit, Gewissenhaftigkeit, Entscheidungs- und Überzeugungskraft sowie Sinn für die Rechtmäßigkeit seines Handelns auszeichnen; Eigenschaften, die auch unser Jubilar in die Ingenieurgeodäsie zum Wohle aller eingebracht hat. Für weitere erfolgreiche Jahre: Vivat, crescat, floreat!

Literatur

Grewe, K.: Licht am Ende des Tunnels – Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau, von Zabern Verlag, Mainz 1998

Haag, R.; Ryf, A.; Stengele, R.: Grundlagenetze für extrem lange Tunnel am Beispiel des Gotthard-Basistunnels (Länge: 57 km), Ingenieurvermessung 96, Bd. 2, E 9, Dümmler Verlag, Bonn 1996

Kahmen, H.: Die hier herangezogenen Beiträge von Heribert Kahmen finden sich in der Veröffentlichungsliste

Kienast, H.J.: Der Tunnel des Eupalinos auf Samos, Architectura 7, 1977, S. 97-116

Rinner, K.: Entwicklungstendenzen in der Ingenieurgeodäsie – Festrede aus Anlaß der Emeritierung von o. Prof. Dr. techn. F. Löschner, Aachen 1977

Schwarz, W.: Ingenieurgeodäsie – quo vadis? – Festvortrag anlässlich des 70. Geburtstages von em. Prof. Dr.-Ing. habil. K. Schnädelbach, München 2004

Anschrift:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte
Geodätisches Institut
Universität Bonn
Nußallee 17
D-53115 Bonn

Mehrskaliges geometrisches Monitoring - Aufgaben für die Ingenieurgeodäsie

Wolfgang Niemeier
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Technische Universität Braunschweig

1 Bedeutung von Monitoring

In der heutigen Zeit werden viele Aufgaben als Monitoring bezeichnet, die früher eher mit Überwachung und Kontrolle oder – ganz im geodätischen Sinne – mit Deformationsuntersuchung bezeichnet wurden. Eine Definition von Monitoring könnte sein :

Monitoring \equiv Bestimmung von Abweichungen vom normalen Verhalten

In dieser Definition wird ausgedrückt, dass

- a) für viele Objekte eine statische Auffassung nicht ausreicht, es vielmehr wichtig ist, das zeitliche, physikalisch oder thermisch bedingte Verhalten zu kennen, d.h. mögliche Veränderungen und deren Ursachen in die Bewertung mit einzubeziehen.
- b) es erforderlich ist, einen Normalzustand bzw. ein normales Verhalten zu definieren und mit funktionalen Abhängigkeiten zu beschreiben.
- c) es für die Abweichungen wichtig ist, eine Größenordnung zu kennen, die als verträglich, normal bzw. unkritisch anzusehen ist und entsprechend Schwellwerte als Warnung bzw. Grenzwerte für ein konkretes Eingreifen zu definieren.

Erst wenn alle diese Fragestellungen sachgerecht erörtert worden sind, ist es überhaupt möglich, ein Monitoringkonzept aufzustellen, das eine Instrumentierungs- bzw. Messvorgabe und eine Auswertestrategie beinhaltet. Grundsätzlich ist die so beschriebene Monitoringaufgabe natürlich eine interdisziplinäre Fragestellung, innerhalb der die Ingenieurgeodäsie die Bearbeitung der geometriebezogenen Aspekte übernehmen kann und sollte.

Bezogen auf die Arbeitsweisen hat sich in der Ingenieurgeodäsie in den letzten Jahren ein Paradigmenwechsel (Heunecke/Niemeier 2004) vollzogen, der durch die enormen Fortschritte in der geodätischen Mess- und Auswertetechnik begründet ist und bezogen auf Monitoringaufgaben durch folgende Änderungen gekennzeichnet werden kann :

- (zeit-) kontinuierliche, automatische Messungen statt weniger Messzeitpunkte und händischer Messungen
- flächenhafte (raum-kontinuierliche) Messungen statt weniger ausgewählter Punkte

2 Mehrskaliges geometrisches Monitoring

Besonderes Augenmerk soll hier auf die Mehrskaligkeit der Aufgabenstellungen gelegt werden, die z.T. völlig andersartige konkrete Lösungsansätze erfordern, die aber trotzdem durch eine Gleichartigkeit in der Methodik und gemeinsame theoretische Konzepte gekennzeichnet sind. Teilaspekte von grundsätzlich mehrskaligen geometrischen Fragestellungen, die aber bisher eigentlich stets separat behandelt werden, sind hier nach der Objektdimension gegliedert. Für einige dieser Anwendungsfälle werden in den folgenden Unterabschnitten ausgewählte Lösungsansätze präsentiert :

- cm – dm Veränderung von Bauteile unter unterschiedlichen Lasten, thermischen und chemischen Einflüssen
- cm – m Rissmonitoring an bestehenden Bauwerken
- m – 100 m Überwachung des Langzeitverhaltens ganzer Bauwerke
- m – km Überwachung rutschungsgefährdete Hänge, Ufer und Felsblöcke
- 10m – 100km Monitoring von Vulkane, Spaltengebiete
- global Global Earth Monitoring System

2.1 Rissmonitoring von Betonbrücken

Die DIN 1076 schreibt die regelmäßige Kontrolle von Brückenbauwerken vor und benennt die im Einzelnen durchzuführenden Kontrollaufgaben. Für die Sichtkontrolle von Betonoberflächen auf Rissbildung wird bisher eine einfache Risslehre eingesetzt, siehe Abb. 1, auf der Linien unterschiedlicher Breite angeordnet sind. Zur Bestimmung der Rissbreite wird durch einfachen Vergleich des realen Risses mit diesen Linien vom Kontrolleur ein Wert geschätzt.

Gefordert wird schon seit langer Zeit ein objektives, flexibles Messverfahren, deren Ergebnisse abgespeichert und damit nachvollziehbar sind. Für diese Aufgabe ist in Kooperation mit der Stadt Düsseldorf ein optisches Messsystem entwickelt worden, das nach den Prinzipien der Einbildphotogrammetrie mit festem Tubus arbeitet. Die Ermittlung der Rissufer erfolgt durch multispektrale Beleuchtung, die Auswertung erfolgt unter Ausnutzung der Fly-Fisher-Algorithmus (Fraser et al 2002), siehe auch Abb 1.

Neben dieser Aufnahme und Ausmessung des Risses muss eine Georeferenzierung realisiert werden, damit bei nachfolgenden Brückenprüfungen derselbe Rissabschnitt ausgemessen wird. Diese Georeferenzierung erfolgt über einen teach-in- Prozess während der Erstmessung, wobei ein koordinatenmäßiger Ansatz gewählt wurde, da jegliche Markierung am Objekt vermieden werden soll. Die Markierung der Messstellen bei Folgemessungen erfolgt dann mittels Laser-Pointer, eine Detailanpassung der Rissposition über Systeme der Bildverarbeitung.

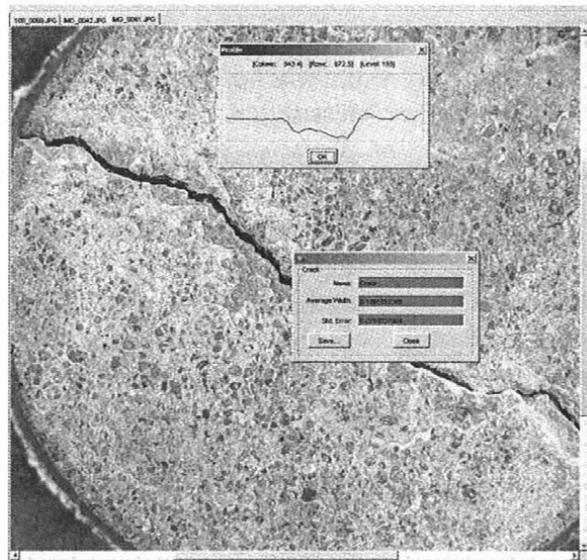
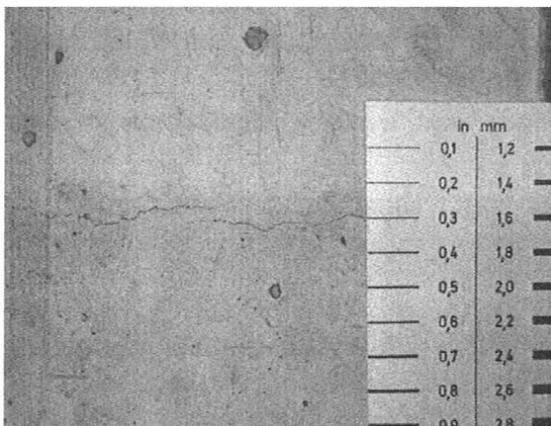


Abb. 1 : *Herkömmliche Risslehre und Ergebnisse für die neuentwickelte digitale Risslehre*

Abschliessender Schritt ist die Integration der Rissinformation in ein Brückeninformationssystem, in dem die Risshistorie in einer Datenbank abgelegt wird. Bei Überschreiten von Schwellwerten kann so jederzeit die zeitliche Entwicklung und das Verhalten auch benachbarter Risse für weitergehende Analysen mit hinzugezogen werden.

2.2 Kontinuierliche Überwachung einer Brücke

Als Beispiel für ein automatisches, kontinuierlich arbeitendes Monitoringsystem soll die Überwachung der Fallersleber-Tor-Brücke in Braunschweig vorgestellt werden, die jetzt seit knapp sechs Jahren im Dauereinsatz vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig bearbeitet wird. Die Aufgabenstellung besteht darin, eine 100 Jahre alte Stahlbetonkonstruktion, deren Widerlager einen Versatz bis zu 10 cm, Risse und Brüche aufweisen, kontinuierlich zu überwachen und die geometrischen Veränderungen quasi in Echtzeit an die Bauaufsicht zu übermitteln. Als erforderliche Genauigkeit wurde von besser als 1 mm ausgegangen, damit bei der weitestgehend unbekanntem Gründung des Bauwerks frühzeitig Veränderungen nachweisbar sind.

Etwa 180 Messpunkte an den Widerlagern und an den Zugbändern werden jetzt dreimal täglich mit einem automatischen Tachymeter Leica TCA 1800 unter Nutzung der Funktion „Automatische Zielerfassung (ATR)“ bestimmt, wobei sich dieses Instrument in einem ausfahrbaren Support unter der Brücke befindet, siehe Abb. 2. Für die Durchführung der Messungen wird das Instrument etwa 70 cm abgesenkt, ist ansonsten zwischen den Zugbändern versteckt und so gegen Vandalismus und andere Einflüsse geschützt. Die grundsätzlich variable 3D-Position des Messinstruments wird bei jeder Messung über 4 externe Referenzpunkte bestimmt/kontrolliert.

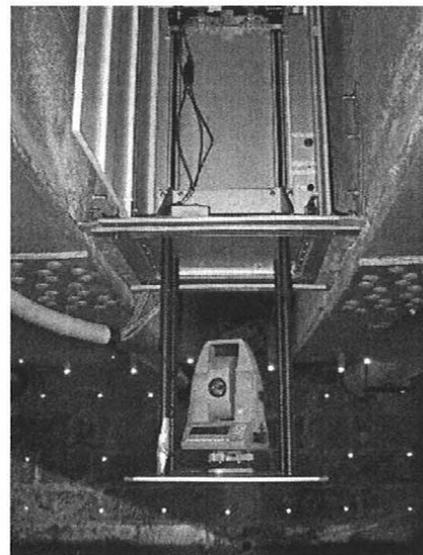


Abb. 2 : Die Fallersleber-Tor-Brücke und der ausfahrbare Support für das automatische Tachymeter

Die zeitnah nach Durchführung der Messungen erforderliche Mitteilung über die jeweiligen Verschiebungen der Bauwerkspunkte erfolgt seit kurzem über ein internet-basiertes Auskunftssystem, mit dem sich alle Berechtigten jederzeit über den geometrischen Zustand des Bauwerkes informieren können. Bedingt durch Korrosion an den Marken, Verschmutzungen und z.T. auch mechanische Veränderungen der Halterungen sind in den Auswerteprozess

aufwendige Filterfunktionen implementiert und für diese Aufgabe adaptiert worden, damit stets ein abgeprüftes, plausibles Ergebnis verfügbar ist (Heinert/Niemeier 2004).

Da die Gründung des Bauwerkes weitgehend unbekannt ist, also kein mechanisches Modell vorliegt, ist versucht worden, das Verhalten des Bauwerkes über ein nichtparametrisches Modell, hier ein Input-Output-Modell unter Anwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) und eine Fuzzy- Prozess-Modellierung zu beschreiben, siehe Miima/Niemeier (2004a und b). Der systemtheoretische Ansatz hierzu ist in Abbildung 3 dargelegt :

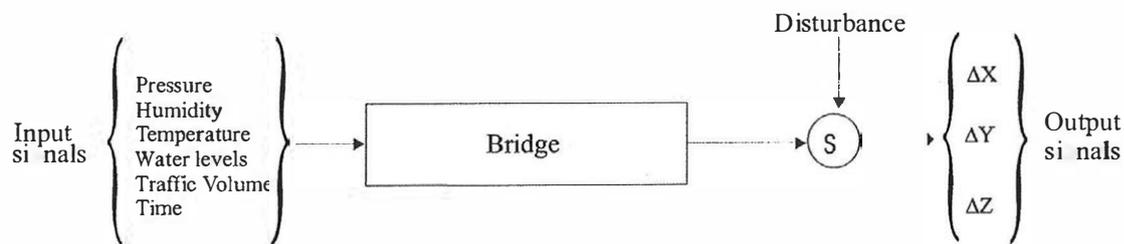


Abb. 3 : Systemtheoretischer Ansatz für die Beschreibung des Verhaltens der Fallersleber-Tor-Brücke

Als mögliche Einflussparameter auf das Verhalten, hier die geometrischen Veränderungen der Brücke, wurden die Luft- und Bauwerkstemperatur, der Luftdruck, die Feuchtigkeit, der Wasserstand im Fluss, die Verkehrslast und die Zeit eingeführt. Das Training des KNN sowie die Fuzzy-Modellierung war möglich, da jeden Tag drei Messepochen vorliegen und insgesamt ein Monitoring über mehrere Jahre erfolgte, also über mehrere Perioden der erwarteten und tatsächlich gefundenen saisonalen Effekte. Die Modelle erwiesen sich als so stabil, dass sogar eine Prädiktion des Bauwerksverhaltens für bis zu sechs Monaten allein aus den Einflussparametern möglich war.

2.3 Überwachung von Rutschungserscheinungen

Eine hochaktuelle, komplexe Monitoring-Aufgabe ist auch die Überwachung von rutschungsgefährdeten Hängen, Ufern und Felsformationen, die ebenfalls nur interdisziplinär bearbeitet werden sollte. Im Rahmen des EU-Projektes OASYS (Kahmen/Niemeier 2003) werden folgende Teilaufgaben vorrangig bearbeitet :

- Erkennung von Bereichen mit einem Gefährdungsrisiko
- Regelmäßige Überwachung der grundsätzlich gefährdeten Bereiche (Normal Operation : Level 1)
- Intensivere Überwachung von Bereichen mit einem höheren Rutschungsrisiko (Low margin operation : Level 2)
- Kontinuierliche Überwachung von akut gefährdeten Abschnitten mit Bereitstellung der Informationen in Echtzeit (Warning Level : Level 3)
- Begleitung einer prognostizierten Rutschungserscheinung(Emergency Level : Level 4)
- Bewertung einer erfolgten Rutschung (Post Mortem Dump : Level 5)

Daneben wird die Frage eines adäquaten Warnsystems für die Bevölkerung und deren technische Ausführung von einem Projektpartner bearbeitet.

Für eine optimale Bearbeitung dieser verschiedenen Aufgabenstellungen ist es absolut erforderlich, das gesamte Spektrum von Beobachtungs- und Analysetechniken mit in Erwä-

gung zu ziehen, dass in den Bereichen der Geodäsie, Fernerkundung, Geophysik, Geologie, Geomorphologie, Hydrologie, Bodenmechanik u.a. derzeit verfügbar ist. Nur durch interdisziplinäres Arbeiten in einem Team ist ein zutreffendes Warnsystem überhaupt zu realisieren.

Aus dem Gesamtspektrum von Aufgaben soll hier nur die regelmäßige und intensivere Überwachung (Level 1 und 2) als gefährdet eingestufte Gebiete diskutiert werden. Nach heutigem Kenntnisstand bietet sich hierfür in vielen Zonen die Nutzung von satellitengetragenen Radarsystemen an, insbesondere des Synthetic Aperture Radar im differentiellen interferometrischen Mode (DInSAR). Aus einer wiederholten Radar-Abtastung eines Geländes können, z.B.



Abb. 4 : Baota Landslide im Hinterland des Drei-Schluchten Staudamms in China

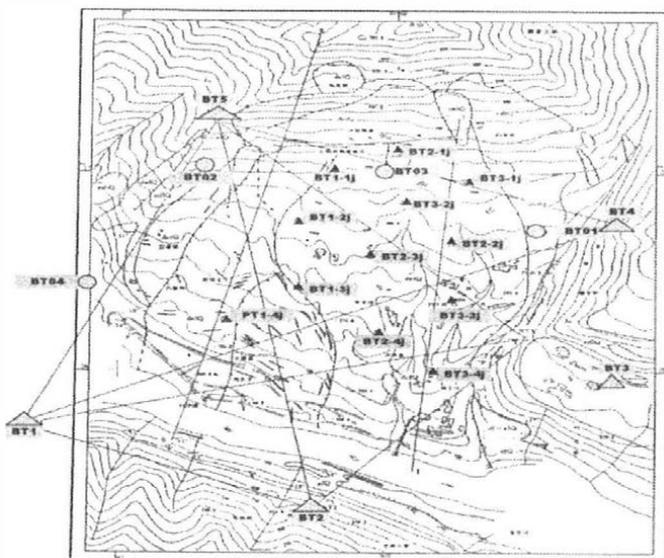


Abb. 5 :
GPS-Netz zur Bestimmung
von Deformationen im Bereich
des Baota Landslide

bei Vorliegen eines ausreichenden digitalen Geländemodells und einer hinreichenden Kohärenz zwischen den Datensätzen, mit extrem hoher Genauigkeit geometrische Veränderungen der Oberfläche bestimmt werden.

In Abbildung 4 ist der Bereich der Baota Landslide dargestellt, ein Hang am zukünftigen Stausee im Hinterland des Drei-Schluchten-Staudammes in China und eines der Testgebiete im OASYS-Projekt. Prof. Zhang und Kollegen von der Universität Wuhan haben mittels wiederholter GPS-Netzmessungen, siehe Abb. 5, Punktverschiebungen innerhalb eines Jahres in der Größenordnung von wenigen Zentimetern detektiert. Unter Nutzung von ERS1 und ERS2 Daten aus dem Jahre 1996 konnten mittels DInSAR für diesen Bereich Verschiebungen in nahezu identischer Größe bestimmt werden. Die grundsätzliche Nutzbarkeit der Radar-Technologie für das Monitoring von Hängen konnte damit bestätigt wurde, auch wenn die Vergleichsmessungen nicht aus demselben Jahr stammen.

3 Zusammenfassung

Mit diesen Ausführungen und Beispielen unterschiedlicher Objektgröße sollte gezeigt werden, dass für Aufgaben des Monitoring unterschiedlichste Konzepte zu entwickeln sind. Eine fachliche Voraussetzung für die Bearbeitung dieser Problemstellungen ist allerdings ein vertieftes Verständnis von den meist physikalischen Prozessen, die das Objektverhalten beeinflussen, ein fundiertes Wissen über das Leistungspotenzial sämtlicher geometrieorientierten Messtechniken sowie ein Beherrschen modernste Auswerte- und Analysekonzepte. Nur durch eine entsprechend fundierte, disziplinübergreifende Ausbildung in den theoretischen Grundlagen ist der Geodät in der Lage, innerhalb eines Teams von Experten an einer problemadäquaten Lösung auf der Entscheidungsebene gleichrangig mitzuwirken.

Anzumerken bleibt, dass bis heute ein ingenieurmäßiges Aufarbeiten der ganzheitlichen Fragestellungen des Monitoring auf sämtlichen Skalen nur selten erfolgt. Hier ist in Zukunft sicherlich wichtige Forschungsarbeit zu leisten, damit die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen in einem Gesamtrahmen eingepasst und auch ganzheitlich analysiert werden können.

Literatur

- Fraser C., Dare P., Niemeier W., Riedel B. (2002) : An operational approach of automatic feature extraction : the measurement of cracks in concrete. *Photogrammetric Record*, 17(99), p. 453-464
- Heinert M., Niemeier W. (2004) : Zeitreihenanalyse bei der Überwachung von Bauwerken. In : *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2004*. DVW Schriftenreihe, Band 46, Wißner Verlag Augsburg, 2004, S. 157-174
- Heunecke O., Niemeier W. (2004) : Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen. In : *Ingenieurvermessung 2004*, ETH Zürich, S. 131-142
- Kahmen H., Niemeier W. 2003 : OASYS – Integrated Optimization of Landslide Alert Systems. *Österr. Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, vol. 91, 2003, S. 99-103
- Miima J.-B., Niemeier W. 2004a : Adapting neural networks for modelling structural behaviour ingeodetic deformation monitoring. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, vol. 129, S. 160-174
- Miima J.-B., Niemeier W. 2004b : Fuzzy logic for modelling structural deformations in geodesy. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, vol. 111, S. 397-404

Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten

Thomas A. Wunderlich
Lehrstuhl für Geodäsie
Technische Universität München

1 Vorwort

Wenn wir heute in der Geodäsie selbstzielende Servotachymeter und Videotheodolite wie selbstverständlich benutzen, so mag der 65. Geburtstag von Herrn *o. Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen* ein denkbar geeigneter Anlaß sein, einmal den dornigen Weg der Entwicklung bis zur heutigen Perfektion nachzuskizzieren - hatte der Jubilar doch durch seine konsequenten Forschungsarbeiten und Praxistests daran wesentlichen Anteil.

2 Einführung

Der Antrieb, geodätische Instrumente mit einer automatischen Zielfunktion zu versehen, kam nicht aus dem Wunsch, den Beobachter überflüssig zu machen, sondern ursprünglich aus dem Bedürfnis, schwierige Beobachtungsumstände durch technische Unterstützung zu meistern. Erst später gesellten sich die immer stärker nachgefragten Wirtschaftlichkeitsüberlegungen hinzu, um gegenwärtig bereits zu dominieren. Mancherorts glaubt man, dass durch die Verfügbarkeit der hochautomatisierten Meßinstrumente das pure Studium des Manuals genügt, um ingenieurgeodätische Leistungen zu vollbringen, und solchermaßen der operative Vermessungsingenieur überflüssig wird. Dies ist natürlich blanker Unsinn; wahr ist, daß sich die Aufgaben des(r) akademisch ausgebildeten Fachmannes(frau) verändert haben – nämlich hin zum Entwerfen, Anpassen, Programmieren und Steuern komplexer Meßsysteme. Dafür herrscht, insbesondere im modernen Bauwesen, durch die empfindlich beschleunigten, maschinellen Fertigungsprozesse bei enger werdenden Toleranzen stetig steigende Nachfrage! Aus der Steuerung von Tunnelvortriebsmaschinen oder der kinematischen Absteckung von Gleiswegen im Konzept „Feste Fahrbahn“ sind solche Systeme nicht mehr wegzudenken.

3 Das elektrische Auge

Die ersten Versuche, einen Theodolit mit einer künstlichen Zielvorrichtung auszustatten, stammen aus der Zeit 1946/47 und wurden am Institut für Angewandte Geodäsie in Deutschland unternommen. Beweggrund dafür war, in der Triangulation 1. Ordnung auch bei visuell schlecht erkennbaren Leuchtzeichen Beobachtungen durchführen zu können. Vor 50 Jahren gelang es dann unter der Leitung von *Gigas*, die Entwicklung bis zur Feldtauglichkeit weiterzutreiben (Bild 1). Konstruktiv wurde das einfallende Lichtstrahlenbündel durch eine schräggestellte, zur Hälfte verspiegelte Planplatte so in 2 Teile aufgespaltet, dass die an einer Photozelle und einem Sekundärelektronenvervielfacher anliegenden Photoströme in ihrer Differenz zu Null gemacht werden konnten; dann war die perfekte Zielung erreicht. Die Versuchsmessungen des Niedersächsischen Landesvermessungsamts im Jahre 1955 verliefen so erfolgreich (es wurden Richtungsgenauigkeiten der Mittel aus 6 Sätzen von $\pm 1''$ erreicht), dass es sogar zur Herstellung einer Kleinserie des weiter verbesserten Geräts durch die Firma ASKANIA kam (Bild 2).

4 Das bewegte Ziel

Trotzdem dauerte es 25 Jahre bis eine völlig neue Problemstellung zu einer grundlegenden Neubeschäftigung mit dem Thema „Automatisches Zielen“ Anlaß gab. Zu Beginn der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts verlangte die Aufgabe, den Meeresboden in Küstennähe zu topographieren, nach wesentlich höheren Positionierungsgenauigkeiten für die hydrographischen Messschiffe als es die damaligen Funkortungs- und Satellitenverfahren zu leisten imstande waren. Weitreichende elektronische Distanzmesser und auch die ersten Tachymeter mit codierter Teilkreisablesung waren schon eingeführt, jedoch nicht dafür ausgelegt, bewegte Objekte zu verfolgen. Dieser Aufgabe verschrieb sich das Team *Kahmen-Schwäble-Suhre* am Geodätischen Institut der Universität Hannover. Im Zuge des Teilprojekts „Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern“ innerhalb des Sonderforschungsbereiches 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren“ wurden hier zwei Ansätze verfolgt. Der erste verwendet eine szintillierende Quecksilberdampflichtquelle am Zielpunkt (Bild 3) und detektiert deren Licht mit einer Vierquadrantendiode hinter dem Okular des Tachymeters. Dabei wird mit einem Regelkreis angestrebt, den Lichtfleck ständig symmetrisch im Zentrum zu halten und dazu entsprechende Servomotoren zur Nachführung anzusteuern. Eine fundamentale Voraussetzung bestand darin, dass das Instrument über Endlostriebesysteme verfügen musste, um Servomotoren anbringen und wirken lassen zu können, was damals nur auf das AGA Geodimeter 700 zutraf (Bild 4). Dieses hatte aber den Nachteil, noch mit unsicherer analoger Phasenmessung bei der Streckenbestimmung zu arbeiten und wurde daher später gegen ein Geodimeter 140 ersetzt. Neben digitaler Phasenmessung stand jetzt auch noch eine schnelle Trackingfunktion bei der Distanzmessung zur Verfügung. Der zweite Ansatz wollte das Laserlicht des Tachymeters selbst als Lichtquelle verwenden. Die Detektion sollte hier am Zielpunkt erfolgen und die Regelgrößen telemetrisch an den Standpunkt übermittelt werden. Dieses äußerst ambitionierte Konzept war aber seiner Zeit noch zu sehr voraus. Vielleicht noch anspruchsvoller als die konstruktiven Entwicklungen waren die Modellbildungen zur Verfolgung des Schiffes, das auf seinem Kurs rollt und giert. Dazu wurde pionierhaft die Kalman-Filterung eingesetzt und erlebte dabei großen Erfolg.

Welches Potential in der Automatisierung des Zielens und der Zielverfolgung plötzlich erkannt wird, zeigt sich einerseits daran, dass erste Produkte der Instrumentenhersteller rasch auf den Markt geworfen werden, andererseits daran, dass auch an anderen Universitäten Forschungen in diese Richtung angestoßen werden. Zunächst sind dies Bonn und Zürich. In Bonn beschäftigt sich seit 1981 *Ingensand* mit den vielversprechenden Möglichkeiten, die Intensitätsverteilung des reflektierten EDM-Signals selbst zur richtungssensitiven Zielung heranzuziehen. 1983 entwirft er ein „beobachterloses“ Tachymeter für topographische und ingenieurgeodätische Aufgaben, dessen 4 Hauptfunktionen er mit Ortung des Reflektors, Einstellen des Reflektors, automatische Richtungs- und Entfernungsmessung und Verfolgung des Prismas angibt – genau wie es heutzutage bei den modernen Tachymetern abläuft. Ebenso zu dieser Zeit beginnt an der ETH Zürich unter der Leitung von *Matthias* die Machbarkeitsstudie zu einem solchen Gerät unter der klingenden Bezeichnung „Topomat“.

5 Die Anwendungen treiben die Entwicklung

Kahmen in Hannover weiß um die Bedeutung seines Vorsprungs in der Entwicklung und schreitet zur Patentierung. Unter dem Namen „GEOROBOT“ wird sein, nun auf dem

Tachymeter Geodimeter 710 basierendes, selbsttätig zielendes polares Vermessungssystem für den Einsatz in der Überwachung von langsam beweglichen Böschungskanten im Tagebau optimiert und dort in großem Umfang praktisch eingesetzt. Das Gerät mit Steuerungsanlage und Energieversorgung wird mit seinem schützenden Container per Kran umgesetzt (Bild 5) und beobachtet nach seiner initialen Einrichtung selbsttätig umfangreiche Reflektorfelder. Nach einem groben Anfahren der jeweiligen Näherungsposition und einem etwaigen spiralförmigen Suchvorgang wird die Feinzielung mithilfe von Flankenmessungen der Intensität des zurückgeworfenen EDM-Signals auf wenige Zentimeter genau vorgenommen. Die Streckengenauigkeit hat sich dabei von der Anwendung auf rasch zu langsam bewegten Zielen hin um mehr als eine Zehnerpotenz auf unter 1 cm verbessert, was durch möglichst frontale Zielanordnungen geschickt für die Bewegungsdetektion genutzt wird.

Von 1984 an arbeitet eine Forschergruppe des Instituts für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart im Rahmen eines Teilprojektes „Zielverfolgungssysteme“ des SFB 228 „Hochgenaue Navigation“ an der Verfolgung und Führung von Baumaschinen. Hier kann bald auf einen motorisierten elektronischen Theodolit des Typs WILD T2000 zurückgegriffen werden, der durch eine aufgesetzte Kameraoptik mit positionsempfindlicher Lateraleffektdiode den pulsierenden Lichtsignalen von LEDs auf der Maschine nachgeführt werden soll. Später wird dann, dem technischen Fortschritt angepasst, auf eine CCD-Kamera übergegangen. Dabei muß jedoch festgehalten werden, dass Dioden wesentlich höhere Taktraten erlauben als sie beim Auslesen von CCD-Arrays erzielt werden können.

Auch die Instrumentenproduzenten arbeiten fieberhaft an der Integration von CCDs und digitaler Bildverarbeitung, um die steigenden Ansprüche von Automobil- und Flugzeugherstellern bei der Qualitätskontrolle mit Theodolitmeßsystemen befriedigen zu können. Die Genauigkeit dieser, auf räumlichen Vorwärtsschnitten von kooperativen Theodoliten aus fessenden, Systeme ist höchst zufriedenstellend, doch die Zeit- und Personalansprüche wirken störend. Der KERN E2-SE (Bild 6) betritt im Herbst 1987 als erster Videotheodolit das Parkett, unmittelbar gefolgt vom TM3000V aus dem Hause WILD. Damit ist die Automatisierung von Mehrtheodolitsystemen in Form von SPACE und ATMS gelungen, wenig später vereint unter einem gemeinsamen Dach LEICA.

Kahmen, inzwischen Ordinarius an der TU Wien, denkt sofort an die Erweiterung des Einsatzspektrums solcher Systeme. Nach Abschluß der Eigenentwicklung GEOROBOT II und der Erfahrung aus der qualitätsorientierten Steuerung des Fertigungsprozesses monumentaler Industriebauwerke versucht er Deformationsmessungen an Kühltürmen mit einem ATMS, bestehend aus zielmarkierendem Lasertheodolit und zielerfassendem Videotheodolit (Bild 7). Dabei treten bei Messung und Auswertung gewisse Grenzen zutage. Zum einen müssen die Beobachtungen nachts durchgeführt werden, damit der Fremdlichteinfluß gegenüber dem Laserpunkt minimiert wird, zum anderen lassen die gescannten Punkte der Bauwerksoberfläche keine strenge Deformationsanalyse zu, weil sie als nur optisch markierte Punkte in den beiden Aufnahmeepochen nicht streng identisch sind. In der Folge wird an der TU Wien ein spezielles Verfahren entwickelt, um identische Punkte schon bei der Messung herzustellen. Der Lasertheodolit nähert sich entlang einer definierten Gitterlinie der Oberfläche und wird dabei, softwaregesteuert, vom Videotheodolit bis zum Durchstoßpunkt verfolgt.

6 Die Automatisierung schreitet fort

Mit dem Auftauchen der Instrumente mit Videokameras und den immensen Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung bricht die Götterdämmerung für die mithilfe des EDM-Signals zielenden Systeme an; gesucht sind jetzt richtungsmäßig hochgenaue Zielstrategien. Noch aber ist die automatische Zielung mit Bildern nicht effizient. Polare Systeme versuchen sich in Zielerkennung, eher noch in Zielausmachung. Schnell zeigt sich, dass – wie in den Anfangszeiten – eine gute Lichtausbeute von zentraler Bedeutung ist. An der Abteilung Ingenieurgeodäsie der TU Wien wird 1990 ein dort entwickeltes Zielverfahren fertiggestellt und am Beispiel einer Brückenbelastungsprobe unter harten Bedingungen erfolgreich erprobt. Wieder wird eine pulsierende Lichtquelle am Ziel benutzt, diesmal aber so mit dem Videotakt synchronisiert, dass der Spot nur auf jedem zweiten Bild auftaucht. Durch die schnelle Funktion der Grauwertdifferenzbildung zweier aufeinanderfolgender Pixelbilder kann das Ziel lokalisiert und angemessen werden. Dies geschieht in Videotheodoliten zweistufig; in der ersten Stufe wird die Fernrohrstellung über die elektronischen Teilkreise abgegriffen, in der zweiten die Ablagen des Bildpunktes vom gerechneten Bildzentrum erfasst und in additive Winkelinkremente umgerechnet.

Aktive Ziele waren in der Anfangszeit recht unhandlich und beanspruchten spürbar Energie. Dies behinderte auch etwas die Akzeptanz des ersten tachymetrischen „EIN-MANN“ Meßsystems, des GEODIMETER 4000 (Bild 8). Geht man aber voll auf die Philosophie ein, dass der Operateur nun auf der Zielpunktseite steht und von dort die Robotic Totalstation bedient, ergeben sich viele Vorteile für die Massenpunktaufnahme im Feld. Immer wichtiger wird dabei auch die robuste telemetrische Verbindung von Meß- und Zieleinheit. Geht es jedoch mehr um Überwachungsaufgaben, so sind passive Ziele unbedingt vorzuziehen; dies gilt auch in der aufflammenden Konkurrenz mit GPS-Empfängern. LEICA hat hier für die zweite Generation des TM3000V die effiziente Lösung eines Zielbeleuchters in Form eines Infrarot-Kollimators erfunden. Diese in das Fernrohr integrierte Diode sendet ihr unsichtbares Licht auf den grob angefahrenen Reflektor; das reflektierte Signal wird auf dem für Infrarot empfindlichen CCD-Array aufgefangen und zur präzisen Feinzielung genutzt. Mit einem so ausgestatteten Instrument und einer älteren Gegenstation, die auf eine punktförmige Lichtquelle zielte, gelang uns in Wien Mitte der neunziger Jahre die erste vollautomatische Messung gegenseitig gleichzeitiger Zenitdistanzen (Bild 9). Ich erinnere mich aber, dass der im Rahmen einer Feldübung aufgebaute Versuch beträchtlichen Aufwand an Bildverarbeitungs- und Steuerrechnern erforderte und solchermaßen nicht netzunabhängig möglich war. Die Fortsetzung und Perfektionierung des Ansatzes führte später zu einer hochinteressanten Studie über den Refraktionsgang über der Donau. Den durchschlagenden Erfolg erlebte der Zielpunktbeleuchter jedoch durch seinen standardmäßigen Einbau in selbstzielende und zielverfolgende Tachymeter der Firma LEICA. Für diese Anwendung reichte eine – optisch wesentlich weniger aufwendige – fix fokussierte Kamera. Bei der Verfolgung bzw. dem Wiederauffinden langsam bewegter Ziele, etwa dem Reflektor beim Tragen von einem Aufnahmepunkt zum nächsten, sind wieder hochstehende Filter- und Prädiktionsalgorithmen gefragt, welche etwa das typische Auf und Ab des menschlichen Ganges mitberücksichtigen. Hier schließt sich wieder der Kreis zu den seinerzeitigen Modellierungen der Schiffsbewegung auf den Wellen. Beim Tracken schnellerer Bewegungen müssen die geringfügig unterschiedlichen Messzeitpunkte der Winkel- und Streckenmessung (Latenzzeit) Beachtung finden und durch entsprechende Korrekturverfahren behoben werden.

7 Die Nutzung der Bildinformation beginnt

Von nun an trennen sich die Wege der weiteren Forschungsarbeit in zwei Richtungen.

- Servotachymeter mit fest fokussierter Standardkamera

Ab Objektentfernungen von etwa 500 Metern und entsprechender, leider nur in groben Schritten möglicher Blendeneinstellung, werden auf dem CCD-Array genügend scharfe Bilder entworfen, um Kanten zu extrahieren. Dies kann beispielsweise dazu genutzt werden, eine automatische Anzielung von Kreuzen oder Knäufen auf Kirchtürmen (Bild 10) für Anschlussrichtungen zu bewerkstelligen. Dies ist am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München mit einem TCA2003, welcher über einen speziellen Ausgang für die Bildinformation verfügt, gelungen. Einem bereits realisierten automatischen Rückwärtsschnitt werden demnächst selbsttätige Auslenkungsbeobachtungen des Olympiaturms München bei Starkwind folgen. Hier geht es wieder um ein „schnelles Problem“, das hochfrequente Abtastung verlangt.

- Videotheodolite mit hochwertiger fokussierbarer Kamera

Im Umgang mit diesem Instrumententyp hat die Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie der TU Wien unter der Leitung von Herrn Prof. *Kahmen* sehr hohe Kompetenz erworben. Der Weg scheint, so lässt sich aus der Bezeichnung des laufenden, vom FWF geförderten Forschungsprojektes „Theodolit- und wissensbasierendes Multi-Sensor-System“ schliessen, auf die Realisierung von Zielungen auf nicht signalisierte und nicht markierte Punkte zuzustreben. Dem System soviel Wissen und Erfahrung eines geübten Beobachters verfügbar zu machen, dass es autark komplexe Strukturen messtechnisch erfassen kann, verlangt zur Lösung die fachübergreifende Verschränkung mit Wissenschaftlern anderer Disziplinen. Diese Vernetzung ist dem Jubilar gelungen und so kann er dem Endziel näher rücken, welches er selbst schon am ersten Anfang seiner Arbeiten auf diesem Gebiet formuliert hat: ein intelligentes, lernfähiges Vermessungssystem zu kreieren.

Den Abschluß dieser knappen Retrospektive bildet eine sorgsam zusammengetragene Sammlung von Literatur zum Thema „Automatisches Zielen“. Sie erhebt keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit, stellt aber mit Sicherheit einen sehr reichen Fundus an Informationen für Interessierte dar. Die Zusammenstellung ist chronologisch geordnet und hebt durch Gruppenbildung die besondere Bedeutung der Beiträge zu zwei wiederkehrenden Fortbildungsveranstaltungen für Praktiker, Wissenschaftler und industrielle Entwickler hervor. Dabei handelt es sich zum ersten um den traditionellen, deutschsprachigen „Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung“, der in Zyklen von 4 Jahren abwechselnd von der TU München, der ETH Zürich und der TU Graz veranstaltet wird, und zum zweiten um die englischsprachige Konferenzserie „Optical 3D Measurement Techniques“, welche unter der Ägide der Professoren Grün und Kahmen alternierend in Wien und Zürich stattfindet. Die Reihe wurde 1989 auf Anregung der FIG eingerichtet, um die stürmischen Entwicklungen der optisch-elektronischen Messtechnik dem Fachpublikum zeitnah vorzustellen und zu diskutieren.

Im Herbst dieses Jahres findet die Konferenz O3DMT wieder in Wien statt, der Ingenieurvermessungskurs wird 2007, diesmal – wegen der immer rascheren Fortschritte in der Ingenieurgeodäsie – schon 3 Jahre nach dem letzten Kurs, an der TU Graz abgehalten.

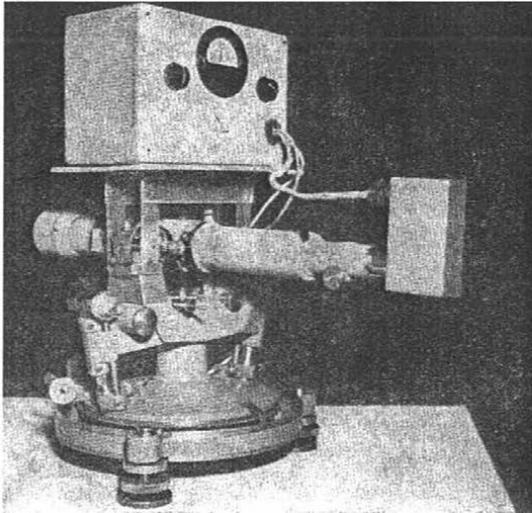


Bild 1: *Elektrisches Auge des IFAG*

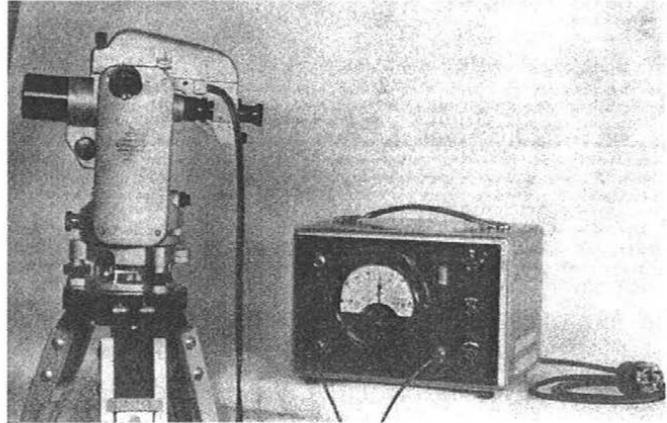


Bild 2: *ASKANIA Theodolit für elektrische Zielung*

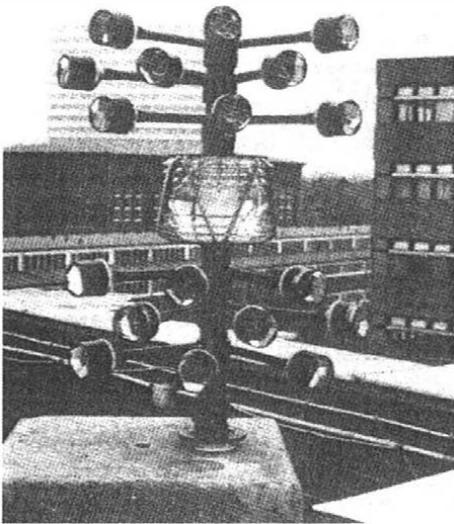


Bild 3: *Hg-Lichtquelle/Raumreflektor*

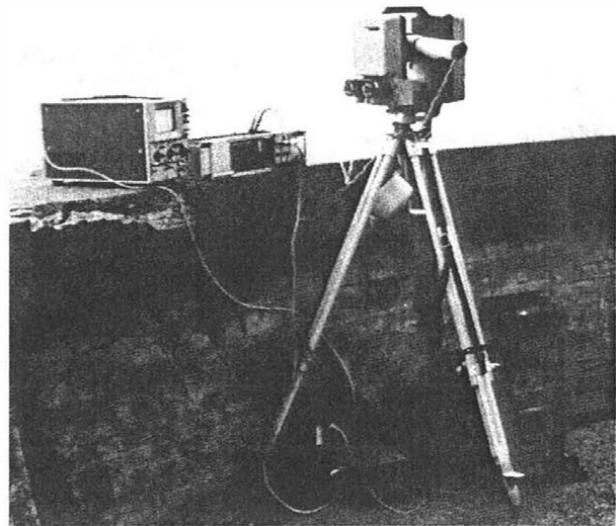


Bild 4: *Prototyp des GEOROBOT*

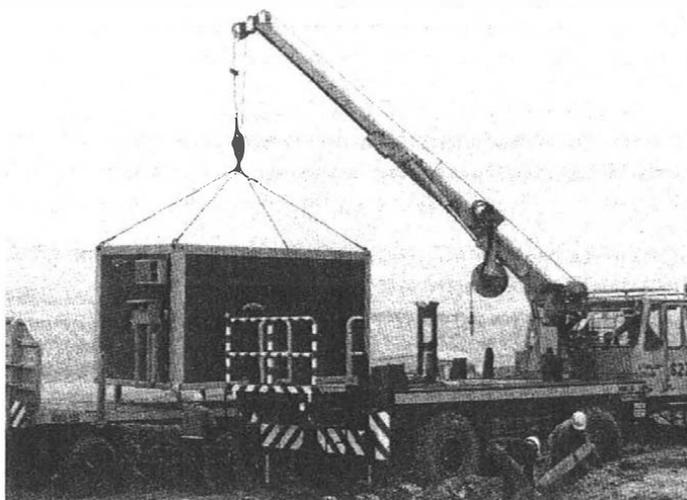


Bild 5:
*Versetzen des
Messcontainers mit
dem GEOROBOT*

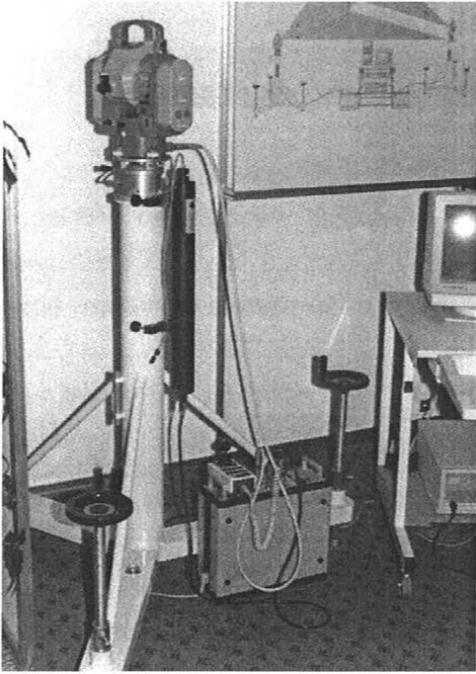


Bild 6: *KERNE2-SE*

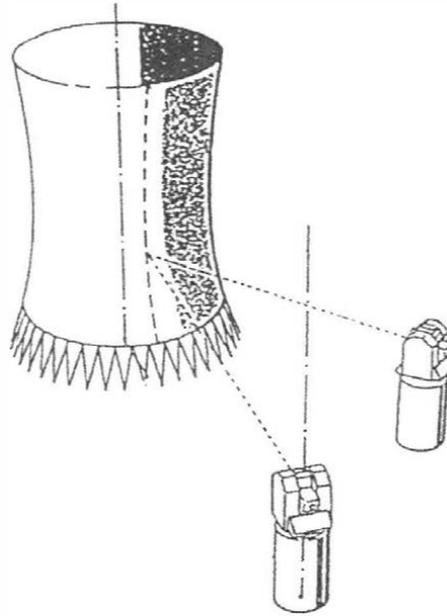


Bild 7: *WILD ATMS*



Bild 8:
*GEODIMETER 4000 mit
Remote Positioning Unit*

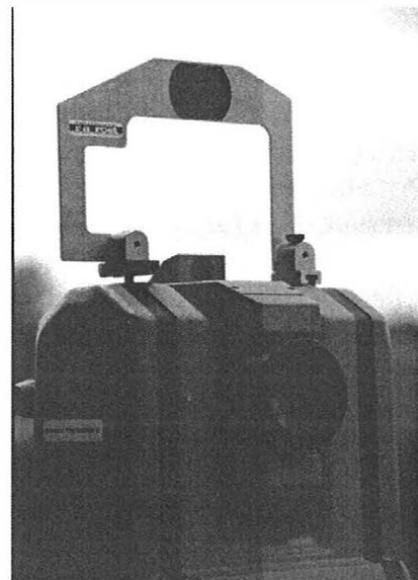


Bild 9:
LEICA TM3000V

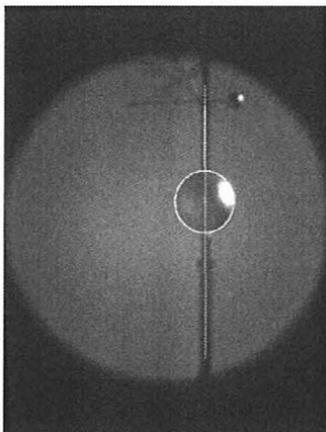


Bild 10:
*Bild der ATR-Kamera
des TCA2003 mit
extrahierten Kanten*

Literatursammlung zum Thema „Automatisches Zielen“

Monographien, Beiträge in Fachzeitschriften und Tagungsbänden, Forschungsberichte:

Gigas, E., Ebeling, K. (1957): *Elektrisches Auge*. DGK Reihe B, Heft Nr. 51.

Kahmen, H. (1977): *Elektronische Messverfahren in der Geodäsie*. Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-047-4).

Zetsche, H. (1979): *Elektronische Entfernungsmessung (EDM)*. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 3, Stuttgart (ISBN 3-87919-127-1).

Kahmen, H., Schwäble, R., Suhre, H. (1981): *Bericht über die Tätigkeiten des Teilprojektes Q5 (Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern) des Sonderforschungsbereiches 149 im Jahre 1980*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 103, S. 81-83.

Ingensand, H. (1981): *Ein Beitrag zur Entwicklung eines elektronischen Tachymeters mit automatischer Richtungsmessung*. BDVI-Forum, 7. Jg., Heft 4, S. 186-192, Köln.

Kahmen, H., Schwäble, R., Suhre, H. (1982): *Bericht über die Tätigkeiten des Teilprojektes Q5 (Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern) des Sonderforschungsbereiches 149 im Jahre 1981*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 109, S. 73-80.

Matthias, H. (1982): *Der Topomat*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 80. Jg., Heft 4, S.123-125.

Kahmen, H., Schwäble, R., Suhre, H. (1983): *Bericht über die Tätigkeiten des Teilprojektes Q5 (Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern) des Sonderforschungsbereiches 149 im Jahre 1982*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 125, S. 71-77.

Ingensand, H. (1983): *Die Weiterentwicklung der automatischen Zieleinstellung nach dem Intensitätsmaximumprinzip und Entwicklung eines elektromechanischen Stativs für ein „beobachterloses“ elektronisches Tachymeter*. BDVI-Forum, 9. Jg., Heft 4, S. 212-223.

Kahmen, H., Suhre, H. (1983): *Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 108. Jg., Heft 8, S. 345-351.

Kahmen, H., Schwäble, R., Suhre, H. (1984): *Bericht über die Tätigkeiten des Teilprojektes Q5 (Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern) des Sonderforschungsbereiches 149 im Jahre 1983*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 136, S. 73-77.

Kahmen, H. (1984): *Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie*. In: Rinner/Schelling/Brandstätter (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 84-1“ A2, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78931-4).

Meiswinkel, H.G. (1984): *Landgestützte, dynamisch arbeitende Positionierungssysteme hoher Genauigkeit für großräumige Gewässervermessung*. In: Rinner/Schelling/Brandstätter (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 84-2“ C6, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78931-4).

Kahmen, H., Schwäble, R., Suhre, H. (1984): *Ein „intelligentes“ polares Vermessungssystem für die Beobachtung statischer Punktfelder und kinematischer Vorgänge*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 109. Jg., Heft 11, S. 553-563.

- Bayer, G., Krzystek, P. (1986): *Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojekts D1 (Zielverfolgungssysteme) des Sonderforschungsbereiches 228 für die Jahre 1984-86*. In: Arbeits- und Ergebnisbericht SFB 228 1984-86, S. 241-260, Universität Stuttgart.
- Gottwald, R. (1987): *Kern E2-SE – Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 94. Jg., Heft 4, S. 147-154.
- Bayer, G. (1988): *Motorized Electronic Theodolites – High Precision Measurement Robots for Surveying*. In: Linkwitz/Hangleiter (Eds.) "High Precision Navigation", S.395-408, Springer-Verlag (ISBN 3-540-50921-6).
- Krzystek, P. (1988): *High Precision Surveying of Moving Objects by Electronic Cameras*. In: Linkwitz/Hangleiter (Eds.) "High Precision Navigation", S.419-431, Springer-Verlag (ISBN 3-540-50921-6).
- Huep, W., Katowski, O. (1988): *Theodolitsysteme für industrielle und geodätische Messungen*. Technische Rundschau, Nr. 39.
- Große, H. (1988): *Meßsysteme u. automatische Datenerfassung bei Gewässervermessungen*. In: Schnädelbach/Ebner (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 88-1“ A3, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78081-3).
- Kahmen, H., Steudel, J. (1988): *Das automatisch zielende Meßsystem GEOROBOT II*. In: Schnädelbach/Ebner (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 88-1“ A7, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78081-3).
- Schneuwly, B., Celio T. (1988): *TOPOMAT, ein Vermessungsroboter*. In: Schnädelbach/Ebner (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 88-1“ A8, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78081-3).
- Huep, W. (1988): *Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatisierten Theodolitsystems*. In: Schnädelbach/Ebner (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 88-1“ A13, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78081-3).
- Losser, R. (1988): *Zur automatischen Messung mit Theodoliten*. In: Schnädelbach/Ebner (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 88-1“ B3, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78081-3).
- Kyle, S., Moffit, N., Bethel, J. (1989): *Kern SPACE: Extended Features and Industrial Solutions*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 206-215, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).
- Damjakob, H., Kahmen, H., Lösekraut, H. (1989): *Qualitätsorientierte Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken mit vektorialen Vermessungssystemen*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 243-260, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).
- Katowski, O. (1989): *Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 393-403, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).
- Kliem, J. (1989): *Systemvorstellung der vollautomatisierten Totalstationen der Firma Geodimeter*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 404-412, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).
- Jacobs, E. (1989): *Der Einsatz des Instruments Geodimeter 140 SMS beim Tunnelvortrieb Dover-Calais*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 413-422, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).
- Kahmen, H., Steudel, J. (1989): *Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Echtzeit-Überwachung von Böschungssystemen beim Abbau von Braunkohle mit dem Meßsystem GEOROBOT*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques I“, pp. 423-432, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-200-0).

- Möhlenbrink, W. (1989): *Hochgenaue Richtungsmessung mit automatischer Zielerfassung*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 96. Jg., Heft 5, S. 177-184.
- Schlemmer, H. (1989): *Anforderungen, Stand und Entwicklung von Industrie-Meßsystemen*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 114. Jg., S. 365-372.
- Schlemmer, H., Welsch, W. (1989): *Berührungslose geodätische Meßsysteme für die Industrievermessung – ein Überblick*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 96. Jg., Heft 11-12., S. 397-411.
- Bayer, G., Heck, U., Mönicke, H.-J. (1989): *Einsatz einer CCD-Kamera bei der Objektführung mittels Motortheodolit*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 96. Jg., Heft 11-12., S. 423-430.
- N.N. (1991): *Geodimeter System 4000 – Das "EIN-MANN" Meß-System*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 98. Jg., Heft 1, S. 19-21.
- Kahmen, H. (1991): *Robot Techniques and their Impact on Surveying Systems*. In: Linkwitz/Eisele/Mönicke (Eds.) "Applications of Geodesy to Engineering", pp. 100-113, Springer-Verlag (ISBN 3-540-56233-8).
- Maurer, W. (1991): *Geodimeter System 4000 – Das „EIN-MANN“ Meßsystem für die Tachymetrie*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 116. Jg., Heft 4, S. 186-189.
- Matthias, H. (1991): *Der Robotertheodolit TOPOMAT – Technik, Anwendung und Auswirkung auf den Beruf*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 89. Jg., Heft 8, S. 427-431.
- Mönicke, H.J. (1991): *Optoelectronic Sensors for Measuring Moving Objects in Surveying*. In: Linkwitz/Hangleiter (Eds.) "High Precision Navigation 91", S. 339-348, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78411-8).
- Katowski, O. (1992): *Ein Präzisionspolar-Messsystem (PPMS) im Einsatz bei Überwachungsmessungen und dynamischer Absteckung*. In: Matthias/Grün (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 92-1“ II5, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78151-8).
- Kahmen, H. (1992): *Hochpräzise Zielerfassung durch Robotertheodolite*. In: Matthias/Grün (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 92-1“ II6, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78151-8).
- Kopacik, A., Stanek, V., Fabiankowitsch, J., Plach, H. (1993): *Geodätische Messverfahren bei der Belastungsprobe der „Donaubrücke der Jugend“ in Bratislava*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, 81. Jg., Heft 1, S. 8-16.
- Mentes, G., Roic, M. (1993): *Pointing by means of a CCD camera integrated in the telescope of a motorized theodolite*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques II“, pp. 106-113, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-254-X).
- Siems, E. (1993): *Ein neues Verfahren für die Absteckung und Kontrolle der Gleislage*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques II“, pp. 114-121, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-254-X).
- Heck, U. (1993): *3D-motion of an object determined by an image sequence of a video theodolite*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques II“, pp. 538-545, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-254-X).
- Münch, K.H., Baertlein, H. (1993): *Dimensional measuring techniques in the automotive and aircraft industry*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques II“, pp. 614-622, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-254-X).
- Kahmen, H. (1993): *Optische 3D-Meßverfahren mit Messrobotern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 100. Jg., Heft 11-12, S. 395-402.

- Kahmen, H., Wunderlich, Th. (1994): *On Characteristic Deformations of Conical Shells*. Proc. of the 1st Turkish Symposium on Deformation Measurements, Vol. II, pp.103-138, TU Istanbul.
- Dietz, E.-N., Mönicke, H.J., Schäuble, F., Zimmermann, R. (1995): *To Realize a Construction Machine Guidance with a Road Paver*. In: Linkwitz/Hangleiter (Eds.) "High Precision Navigation 95", S. 435-442, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78431-2).
- Fritschi, J. (1995): *Components of a Target Tracking System for Construction Machine Guidance*. In: Linkwitz/Hangleiter (Eds.) "High Precision Navigation 95", S. 539-546, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78431-2).
- Katowski, O. (1995): *Automatic Theodolite Systems for Static and Dynamic Measurement Processes*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques III“, pp. 119-128, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-275-2).
- Kliem, J., Höglund, R. (1995): *Servo Controlled Theodolite Measurement Systems in Industry – A Survey*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques III“, pp. 233-243, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-275-2).
- Kahmen, H., Roic, M. (1995): *A New Generation of Measurement Robots for Object Reconstruction without Targeting*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques III“, pp. 251-262, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-275-2).
- Mischke, A., Wieser, A. (1995): *Automatic Target-Area-Collimation with Video-Theodolites*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques III“, pp. 263-271, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-275-2).
- Thüs, R. (1995): *Vermessungsarbeiten bei der Rohrvorpressung des Europäische Landfall Tunnels*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques III“, pp. 317-326, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-275-2) .
- Schlemmer, H. (1996): *Grundlagen der Sensorik – Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure*. Wichmann Verlag, Heidelberg (ISBN 3-87907-278-7).
- Katowski, O. (1996): *Setzungsmessungen mit automatischen Theodolitsystemen*. In: Brandstätter/Brunner/Schelling (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 96-1“ II6, Dümmler Verlag, Bonn (ISBN 3-427-78101-9).
- Mischke, A., Kahmen, H. (1997): *A New Kind of Measurement Robot System for Surveying of Non Signalized Targets*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques IV“, pp. 311-318, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-311-2).
- Bayer, G. (1997): *Dynamic Aspects of the TCA1800 Automatic Total Station*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques IV“, pp. 319-326, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-311-2).
- Ingensand, H., Böckem, B. (1997): *Automatic Location and Pointing Techniques in Local Positioning Systems*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques IV“, pp. 329-338, Wichmann Verlag, Karlsruhe (ISBN 3-87907-311-2).
- Joeckel, R., Stober, M. (1999): *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. Vermessungswesen b. Konrad Wittwer, Bd. 18 (4.Aufl.), Stuttgart (ISBN 3-87919-266-9).
- Niemeier, W., Kraus, B., Miima, J.-B., Flebbe, H. (2000): *Bestimmung von 3D-Verformungen einer Brücke mit motorisierten Tachymetern – Anforderungen, Systemaufbau und Ergebnisse*. In: Schnädelbach/Schilcher (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2000“, S. 122-132, Wittwer Verlag, Stuttgart (ISBN 3-87919-270-7).

- Kahmen, H., De Seixas, A. (2000): *Neue Theodolitmessverfahren für die Bestimmung von Deformationen an nicht signalisierten Objekten*. In: Schnädelbach/Schilcher (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2000“, S. 133-142, Wittwer Verlag, Stuttgart (ISBN 3-87919-270-7).
- Stempfhuber, W., Schnädelbach, K., Maurer, W. (2000): *Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern*. In: Schnädelbach/Schilcher (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2000“, S. 144-154, Wittwer Verlag, Stuttgart (ISBN 3-87919-270-7).
- Hennes, M. (2000): *Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen*. In: Schnädelbach/Schilcher (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2000“, S. 334-339, Wittwer Verlag, Stuttgart (ISBN 3-87919-270-7).
- Wunderlich, Th. (2001): *Machine Guidance – Current Achievements and Future Developments*. Proc. of the 3rd Int. Symp. on Mobile Mapping Technology, Kairo (CD).
- Czaja, J., Neuhierl, Th., Stempfhuber, W. (2001): *Hybrides Meßsystem zur kinematischen Positionierung von Schiffen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 108. Jg., Heft 11-12, S. 374-380.
- Dünisch, M., Kuhlmann, H. (2001): *Investigation of accuracy of tracking motorized tacheometers*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques V“, pp. 218-225, Copy & Druck, Wien (ISBN 3-9501492-0-1).
- Stempfhuber, W. (2001): *System Calibration in Precision Farming*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques V“, pp. 366-376, Copy & Druck, Wien (ISBN 3-9501492-0-1).
- Kahmen, H., Niessner, A., De Seixas, A. (2001): *On-Line Deformation Measurements with Rotating Computer Controlled CCD Cameras*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques V“, pp. 388-396, Copy & Druck, Wien (ISBN 3-9501492-0-1).
- Niessner, A. (2001): *Object Sensing Based on Colour CCD-Images*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques V“, pp. 538-543, Copy & Druck, Wien (ISBN 3-9501492-0-1).
- Von Webern, H., Niessner, A. (2001): *Evolution of a Theodolite-Based Measurement System with Integrated CCD-Cameras*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques V“, pp. 544-545, Copy & Druck, Wien (ISBN 3-9501492-0-1).
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik (9. Aufl.)*. Wichmann Verlag, Heidelberg (ISBN 3-87907-305-8).
- Reiterer, A., Kahmen, H., Egly, U., Eiter, T. (2003): *Knowledge-based image preprocessing for a theodolite measurement system*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques VI-1“, pp. 183-190, Repro Zentrum ETH Zürich (ISBN 3-906467-43-0).
- Walser, B., Braunecker, B. (2003): *Automation of surveying systems through integration of image analysis methods*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques VI-1“, pp. 191-198, Repro Zentrum ETH Zürich (ISBN 3-906467-43-0).
- Wasmeier, P. (2003): *The potential of object recognition using a servo-tachymeter TCA2003*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques VI-2“, pp. 48-54, Repro Zentrum ETH Zürich (ISBN 3-906467-43-0).
- Von Webern, H. (2003): *Optimization and extension of gridline-methods to detect object displacements and deformations*. In: Gruen/Kahmen (Eds.) „Optical 3-D Measurement Techniques VI-2“, pp. 104-111, Repro Zentrum ETH Zürich (ISBN 3-906467-43-0).
- Studer, M., Bräker, F., Rutishauser, M., Schätti, I., Stengele, R. (2004): *Geodätisches Monitoring im Hochgebirge*. In: Ingensand (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2004“, S. 67-80, Reprzentrale ETH-Hönggerberg (ISBN 3-906467-46-5).

- Schmidt, J., Möser, M. (2004): *Nachweis von Turmbewegungen mit einem Multisensorsystem*. In: Ingensand (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2004“, S. 95-106, Repräsentative ETH-Hönggerberg (ISBN 3-906467-46-5).
- Zimmermann, D. (2004): *Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen*. In: Ingensand (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2004“, S. 193-204, Repräsentative ETH-Hönggerberg (ISBN 3-906467-46-5).
- Stempfhuber, W., Zinsberger, St., Bergmann, N. (2004): *Online Monitoring historischer Kirchen mit einem Präzisionstachymeter mittels reflektorloser, direkter oder indirekter Winkel- und Streckenmessung*. In: Ingensand (Hrsg.) „Ingenieurvermessung 2004“, S. 431-436, Repräsentative ETH-Hönggerberg (ISBN 3-906467-46-5).
- Wasmeier, P. (2004): *Potenzial der Objekterkennung mit dem Servotachymeter TCA2003*. Geomatik Schweiz, Heft 2, S. 62-65.
- Wunderlich, Th. (2004): *Geodetic Monitoring with Prismless Polar Methods*. In: Kopacik/Wunderlich/Gründig (Hrsg.) „INGEO 2004“ TS4, TU Bratislava (CD).

Forschungsinitiativen:

- DFG (1979-84) Sonderforschungsbereich 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küste und Meeren, Universität Hannover.
- IGP ETH Zürich (1982) „Projekt TOPOMAT“, gefördert durch die Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekt Nr. 1235 und WILD Heerbrugg AG.
- DFG (1984-95) Sonderforschungsbereich 228 „Hochgenaue Navigation – Integration navigatorischer und geodätischer Methoden“, Universität Stuttgart.
- FWF (1992-2001) Projekt „3D-Vermessung von statischen und bewegten Szenen mit computergesteuerten rotierenden Kameras und 3D-Informationsgewinnung“, TU Wien
- FWF (2001-05) Projekt „Theodolit- und wissensbasierendes Multi-Sensor-System“, TU Wien

Dissertationen und Diplomarbeiten:

- Schwäble, R. (1983): *Systemansätze für die automatische Zielverfolgung mit elektrooptischen Tachymetern im küstennahen und Binnengewässerbereich*. Dissertation, Universität Hannover (Wiss. Arb. d. Fachrichtung Vermessungswesen d. Univ. Hannover, Nr. 126).
- Krzystek, P. (1989): *Theoretische und experimentelle Genauigkeitsuntersuchungen für ein optisches Positionsmesssystem zur hochgenauen Vermessung von bewegten Objekten*. Dissertation, Universität Stuttgart (DGK Reihe C, Heft 363)
- Fabiankowitsch, J. (1990): *Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern*. Dissertation, TU Wien.
- Bayer, G. (1992): *Zur hochgenauen automatischen Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen im Nahbereich*. Dissertation, Universität Stuttgart (DGK Reihe C, Heft 398).
- Meyer, R. (1994): *Der Einsatz automatisierter Theodolite zur Parameteridentifikation bei Industrierobotern*. Dissertation, Universität Hannover (Wiss.. Arb. d. Fr. Vw. Nr. 203).

- Schirmer, W. (1994): *Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen*. Dissertation, TU München (DGK Reihe C, Heft Nr. 427).
- Wieser, A. (1995): *Ingenieurgeodätische Überwachungsmessung mit Videotheodoliten*. Diplomarbeit, TU Wien.
- Roic, M. (1995): *Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten*. Dissertation. TU Wien (Geowissenschaftliche Mitteilungen, TU Wien, Heft 43).
- Mischke, A. (1997): *Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten*. Dissertation, TU Wien.
- Loschnigg, M. (1998): *Konzepte zur Verfolgung bewegter Objekte mit einem Videotheodolit*. Diplomarbeit, TU Wien.
- De Seixas, A. (2001): *3D-Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-Verfahren*. Dissertation, TU Wien.
- Wasmeier, P. (2002): *Potential der Objekterkennung mit dem Videotheodolit TCA2003*. Diplomarbeit, TU München.
- Niessner, A. (2002): *Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnützung der Farbinformation*. Dissertation, TU Wien.
- Kabashi, I. (2003): *Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen*. Dissertation, TU Wien.
- Reiterer, A. (2004): *A Knowledge-Based Decision System for an On-Line Videotheodolite-based Multisensor System*. Dissertation, TU Wien.
- Stempfhuber, W. (2004): *Ein integritätswahrendes Meßsystem für kinematische Anwendungen*. Dissertation, TU München (DGK Reihe C, Heft 576).
- Walser, B. (2004): *Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*. Dissertation, ETH-Zürich.

Anschrift:

Univ.Prof. Dr.-Ing.habil. Thomas A. Wunderlich
 Lehrstuhl für Geodäsie
 Technische Universität München
 Arcisstraße 21
 D-80290 München

Anwendung Wissensbasierter Techniken zur Analyse von Verschiebungen im Tunnelbau

Klaus Chmelina
Geodata ZT GmbH Wien

Zusammenfassung: Im Beitrag wird ein Beispiel einer automatischen, wissensbasierten Auswertung von während des Tunnelbaus geodätisch beobachteter Verschiebungen vorgestellt. Das Auswertebispiel unterstützt die geotechnische Interpretation, konkret, das Erkennen spezieller *Auffälligkeiten* in den Verschiebungsdaten. Diese werden unter Nutzung von Fachwissen entdeckt, welches in Form von Fakten und empirischen Regeln repräsentiert wird. Ein vorwärtsverkettender Inferenzmechanismus steuert die Anwendung dieses teils unsicheren Fachwissens. Der Beitrag gibt inhaltlich einen kleinen Teil der vom Jubilar Prof. H. Kahmen betreuten, im Jahre 2002 fertiggestellten Dissertation des Autors wieder.

1 Einleitung

Seit nunmehr vier Jahrzehnten werden Konvergenz- und andere Messungen im Tunnelbau nach der NÖT (Neue Österreichische Tunnelbaumethode) systematisch durchgeführt. Unter diesen haben heute aufgrund der hohen Aussagekraft der Ergebnisse speziell die Optischen 3D Verschiebungsmessungen mit Tachymetern eine herausragende Stellung erlangt. Die periodischen, den Vortrieb begleitenden Messungen zu regelmäßig angeordneten, in der Tunnelwand festvermarkten Prismen sind mittlerweile nicht mehr weg zu denkende Bestandteile der NÖT selbst geworden. Ihre Interpretationen liefern wesentliche Entscheidungsgrundlagen zur erfolgreichen Steuerung eines laufenden Bauprojekts.

In den letzten Jahren konnten Entwicklungen im Vermessungswesen und in der Datenverarbeitung den Mess- und Auswerteprozess weitgehend automatisieren und beschleunigen. In der Folge stiegen im Tunnelbau die periodisch (täglich) zu interpretierenden Datenmengen erheblich an. Es wird häufiger (bis hin zur Online-Datenerfassung) und wohl schon bald auch räumlich dichter gemessen (Laserscanner). Gleichzeitig stieg das Wissen in Zusammenhang mit der Interpretation der Messergebnisse, d.h., es kann immer mehr aus den Verschiebungen *herausgelesen* werden (SCHUBERT, W., et al., [2002]). Da die Interpretation von Messergebnissen jedoch nach wie vor ausschließlich menschlichen Experten vorbehalten ist, werden heute je nach Größe und Fortschritt eines Bauprojekts bestimmte Schwierigkeiten bereits virulent:

- Aufwand und Zeitbedarf für eine kompetente Interpretation steigen kontinuierlich,
- Interpretationsergebnisse liegen nicht mehr *zeitnah* vor, wichtige Entscheidungen oder Reaktionen erfolgen mitunter verzögert,
- eine *zeitnahe* Interpretation kontinuierlich einlangender Messergebnisse (Stichwort: Online-Messsysteme) ist organisatorisch nicht möglich,
- die Anforderungen an die fachliche Kompetenz des Interpretierenden steigen, d.h., er sollte stets über den aktuellen Wissensstand verfügen (nicht nur in seinem Fachbereich).

Von diesen Schwierigkeiten motiviert, wurde im Rahmen der erwähnten Dissertation ein Prototyp eines wissensbasierten Systems entwickelt, der eine Teilaufgabe (Vorstufe) der geotechnischen Interpretation, konkret, das rasche Erkennen sogenannter *Auffälligkeiten*

unterstützen soll. Eingangsdaten des Systems bilden geodätisch erfasste Verschiebungen, Baufortschrittsdaten sowie vorab zu deklarierendes Interpretationswissen. Letzteres muss vom fachkompetenten Nutzer eingegeben werden, d.h., das System enthält dieses nicht a priori sondern bietet Dialoge zu dessen Eingabe und Begründung. Hernach übernehmen heuristische Regeln dessen automatische Anwendung. Aufgrund dieser Eigenschaft ist das System auch für vom Tunnelbau verschiedene Anwendungsbereiche prinzipiell geeignet. Anhand eines Interpretationsbeispiels soll seine Arbeitsweise erläutert werden.

2 Beispiel: Erkennen (fehler)auffälliger Verschiebungen

Wie jedermann einsichtig, können aus fehlerhaften Messergebnissen, falls sie nicht als solche erkannt werden, ebenso fehlerhafte Interpretationen abgeleitet werden. Für die Aufdeckung von Fehlern in den Verschiebungsdaten sind speziell im Anwendungsgebiet Tunnelbau verfahrensbedingt (keine Redundanz der Messungen, keine explizite Erfassung physikalischer Einflüsse wie Refraktion, etc.) rein rechnerische (z.B. statistische) Analysen wenig erfolgreich. Die Beurteilung von nach erfolgter Auswertung berechneter Qualitätsparameter wie z.B. Standardabweichungen, Restklaffungen, etc. vermag zumeist nur in eindeutigen Fällen ausreichend Gewissheit über die Existenz von Fehlern zu geben. Daher können Messfehler oftmals nur nachträglich im Zuge der Zusammenschau mit anderen und/oder bisherigen Messergebnissen empirisch erkannt und mehr oder weniger unsicher (tlw. auch nur intuitiv) vermutet werden.

Dieser Fähigkeit liegt zum einen jenes Erfahrungswissen zugrunde, wie sich bestimmte Fehler in den Messergebnissen manifestieren, in diesen also bestimmte auffällige Erscheinungen und Muster hervorrufen, zum anderen kann Wissen darüber vorliegen, ob unter den gegebenen Randbedingungen des Projekts die zu betrachtenden Messergebnisse überhaupt plausibel sind.

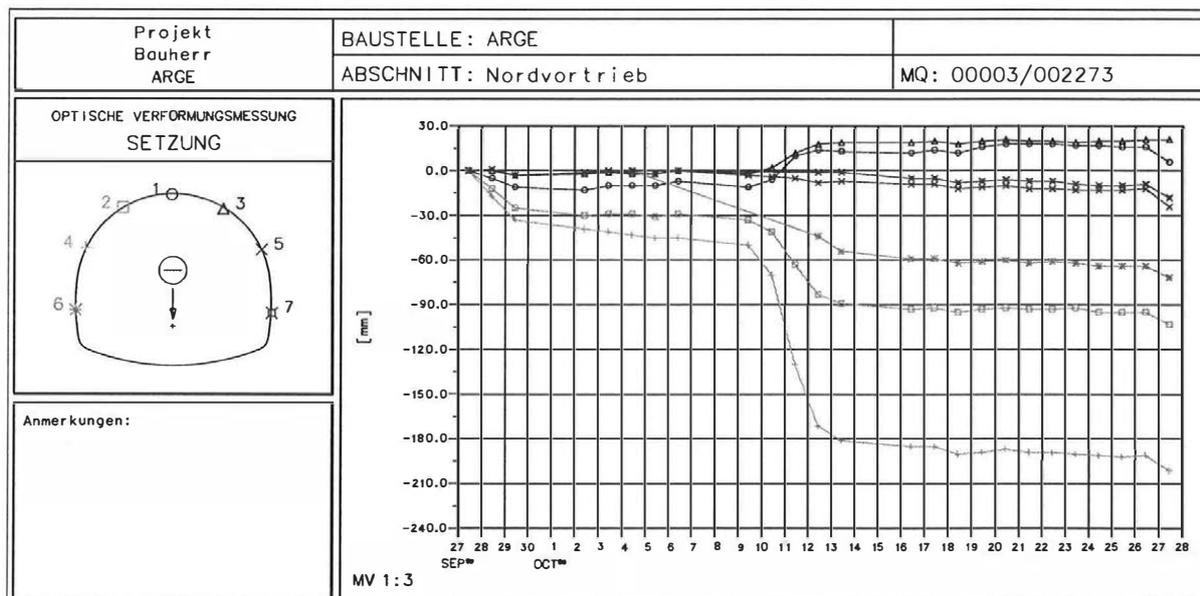


Abb.: Setzungsentwicklung von sieben Messpunkten in Messquerschnitt 3

Repräsentation und Lösung des beschriebenen Problems können - neben anderen Möglichkeiten - z.B. auf eine Art Mustererkennung zurückgeführt werden, wobei dem

speziellen Aspekt der Unsicherheit Rechnung zu tragen ist. In o.a. Abbildung soll ein im Anwendungsgebiet angetroffenes Fallbeispiel skizziert werden.

Die letzte Messepoche (27.10.) zeigt eine signifikante neuerliche Setzung bei zumindest sechs von sieben Messpunkten eines Messquerschnitts. Der Setzungszuwachs ist in allen sechs betroffenen Punkten annähernd gleich groß. Das Setzungsbild insgesamt stellt sich zunächst als überraschend und somit intuitiv als auffällig dar; es bedarf einer näheren Untersuchung. Gehen wir davon aus, dass das Erkennen eines zunächst simplen Musters „Setzungszunahme“ im zeitlichen Verlauf der Setzungen eines einzelnen Messpunktes durch ein Programm (eine Regel) automatisch erfolgen kann (eine nicht besonders schwierige Aufgabe). Demnach kann ein solches Programm in den obigen Daten für die Messepoche $i=27.10.$ genau sechs derartige Muster M_{ij} (Messpunkt $j = 1,2,4,5,6,7$) entdecken. Sagen wir zusätzlich, es füge nun das Wissen, dass sechs derartige Muster existieren, in Form von sechs Fakten M_{ij} unserer Wissensbasis explizit hinzu.

Gehen wir nun davon aus, dass das Herannahen einer nachfolgenden Bauphase (Strosse, Sohle, ...) als Ursache des Phänomens nicht in Frage kommt. Für diesen Sachverhalt lägen keine auf ähnliche Art und Weise von einer Regel generierbaren Fakten in unserer Wissensbasis vor. Da auch sonst keine möglichen Ursachen (= keine entspr. Fakten) vorliegen, bleibt der Setzungsverlauf weiterhin auffällig. Im nächsten Schritt werde bereits, geotechnischen Experten eine gewisse Vorgehenstendenz unterstellend, das Vorliegen eines Messfehlers vermutet. In der Praxis würde ein solcher Experte beim Vermesser nun rückfragen, ob es besondere Probleme bei der Messung oder Auswertung der Messepoche i gegeben hätte. Zur Vermeidung umfangreicher Frage-Antwortdialoge umgeht das in (CHMELINA, K. [1992]) konzipierte System diese Rückfrage und ermittelt stattdessen, welche Fehlerarten F als Ursachen für das auffällige Muster M grundsätzlich in Frage kommen und wie wahrscheinlich diese (in empirischem Sinne) sind.

Die Ermittlung der Fehlerarten basiert auf einer einfachen, wiederum empirischen Auffälligkeitsmuster-Fehlerart-Zuordnung. Jedem Muster M ist eine nach Apriori-Wahrscheinlichkeiten gereichte Liste von k Fehlerarten F zugeordnet. Diese Fehlerarten werden im Falle des Auftretens des Musters über eine Regel als Fakten in der Wissensbasis abgelegt. Diese Fakten triggern spezifische Inferenzprozesse zur Ermittlung o.a. empirischer (nicht statistischer) Wahrscheinlichkeitswerte.

Als in praktischer Hinsicht besonders geeignetes Verfahren quantitativen unsicheren Schließens hat sich für regelbasierte System die Methode der *Certainty Factors* (SHAPIRO, St.C. [1992]) herausgestellt. Hierbei werden den Ausgangsfakten und Regeln initiale numerische Wahrheitswerte, sogen. Certainty Factors, zugeordnet, die in weitestem Sinne das Zutreffen des Fakts bzw. des mit der Regel ausgedrückten Zusammenhangs intuitiv beschreiben. Über wiederum intuitiv gewählte mathematische Verknüpfungsoperationen werden diese Wahrheitswerte auf abgeleitete Fakten propagiert. Die initialen Apriori-Wahrheitswerte der Fehlerarten werden daraufhin schrittweise unter Heranziehung zusätzlichen Wissens bis zu einem Endwert verändert.

Im vorliegenden Beispiel werde als eine mögliche Fehlerart eine fehlerhafte Standpunkthöhe angenommen. Jeder der sechs Messpunkte, der das Fehlermuster zeigt, trägt zu einer Erhöhung des Apriori-Wahrheitswertes dieser Fehlerart bei. Jener Messpunkt, der das Muster nicht zeigt, verringert diesen. Überhaupt werden nun sämtliche Messungen dieses Standpunkts zu allen weiteren Messquerschnitten und -punkten zur Untersuchung herangezogen, Hinweise und Gegenhinweise verrechnet. Der Aspekt der Größengleichheit des Setzungszuwachses

wird zusätzlich berücksichtigt, zumal dieser logisch mit der angenommenen Fehlerart in Zusammenhang steht, entfernte Punkte müssen ebenso wie nahe dieselbe Größenordnung an Setzungszuwachs aufweisen. Ist dies nicht der Fall, verringert sich der Wahrheitswert dramatisch. Ebenso wird untersucht, ob es benachbarte Messpunkte gibt, die von einem anderen Standpunkt aus gemessen wurden. Zeigen diese das Fehlermuster nicht, erhöht sich mit jedem dieser Punkte erneut der Wahrheitswert.

Unter der Annahme, dass keine weiteren als die in o.a. Abb. ersichtlichen Messungen vorhanden sind, ergibt sich bei dem Verfahren ein endgültiger Certainty Factor für die angenommene Fehlerart von 0.87 innerhalb einer Skala von -1 (= nicht zutreffend) über 0 (= keine Aussage) bis 1 (= zutreffend).

Die qualitative Beurteilung des Inferenzergebnisses kann am besten über einen Vergleich mit der eigenen Einschätzung des Falls erfolgen. Hierzu müssten, um tatsächlich vergleichen zu können, natürlich auch die End-Wahrheitswerte aller weiteren Fehlerarten betrachtet werden. Kommt man (besser: ein Experte) annähernd zur selben Meinung, arbeitet das System zufriedenstellend, andernfalls ist durch geeignetes Tuning wie z.B. der initialen Certainty Factors das Ergebnis an die menschliche Expertise anzupassen. Die Unsicherheit bei der initialen Parametrisierung des Verfahrens ist ein gewisser Schwachpunkt. Darüber hinaus treten Schwierigkeiten im Falle des gleichzeitigen Vorliegens mehrerer Fehler in den Daten auf. Aber ohnehin gilt immer die Devise: „Der Experte hat das letzte Wort“.

3 Schlussfolgerung

In der von Prof. Kahmen betreuten Dissertation wurde versucht, spezielle Aufgabenstellungen bei der geotechnischen Beurteilung geodätischer Verschiebungsdaten im Tunnelbau mit Hilfe wissensbasierter Techniken zu bearbeiten. Ziel ist die Unterstützung des Experten durch ein rasches und automatisches Erkennen sogenannter *Auffälligkeiten*, wofür heute insbesondere bei der Bewältigung großer Datenmengen und der Überwachung kontinuierlich einlangender Daten Bedarf besteht. Die Techniken beruhen auf der Verwendung von Fakten, empirischer Regeln und Methoden unsicheren Schließens.

Aus derzeitiger Sicht kann für das Erkennen einfacher (klar abgrenzbarer) Auffälligkeiten in den Verschiebungen das Erreichen eines gewissen Kompetenzniveaus in Aussicht gestellt werden. Bis dato unmöglich ist es, den umfassenden Fähigkeiten menschlicher Experten auch nur annähernd mit Hilfe wissensbasierter Verfahren beizukommen. Zudem liegen im Anwendungsgebiet viele der in eine umfassende Interpretation einzubeziehenden Daten und Informationen in einer für den Computer nicht (direkt) verwertbaren Form vor (Skizzen, Bilder, etc.). In punkto Geschwindigkeit ist eine Überlegenheit gegenüber dem Experten jedenfalls auch derzeit schon zu erreichen.

4 Dem Jubilar Prof. H. Kahmen

Die o.a. Dissertation bereitete zunächst sowohl mir als auch meinem Betreuer, dem Jubilar Prof. H. Kahmen, einen etwas schwierigen Beginn. In Wahrheit kam ich trotz unserer zahlreichen brainstormings und einer Vielzahl von Ideen lange Zeit nicht wirklich voran. Man kann nicht sagen, dass wir uns damals im Kreise drehten; wir bewegten uns eher geradlinig, leider aber nur an einer Stelle auf und ab hüpfend - vor uns eine Mauer. Letztlich standen wir dann still. Seile mussten zu deren Überwindung her. Diese wurden vom Jubilar in den nunmehr hinzugezogenen weiteren Betreuern meiner Arbeit Prof. T. Eiter und Prof. U. Egly

vom Inst. f. Wissensbasierte Systeme der TU-Wien gefunden. Durch deren Unterstützung konnten die zur Umsetzung der Ideen nötigen Grundlagen und Programmier Techniken wissensbasierter Systeme erlernt und angewandt werden. Von da an ging es wieder voran bzw. maueraufwärts bis zum glücklichen Ende.

Mit Ihnen, Herr Prof. Kahmen verbindet mich eine lange, lehrreiche Zeit an der Uni. Ich war noch Student, als Sie mich wegen ungebührlichen Verhaltens aus einer Ihrer Vorlesungen verbannten; später Studienassistent, als Sie mich zur Vornahme von Deformationsmessungen auf einen Ihrer berüchtigten, diesmal womöglich sogar einsturzgefährdeten Kühltürme klettern ließen und am Ende Univ.-Ass., als Sie mich sogar bis nach China schickten, um auf aktiven Hangrutschungen lebensgefährliche Begehungen und Erkundungen durchzuführen. Doch all die vielen Prüfungen sowie kleinen und großen Vermesserabenteuer, die Sie für mich bereithielten konnten mir nichts anhaben. Im Gegenteil, ich bedanke mich bei Ihnen ehr- und herzlichst für all die wertvollen Erfahrungen aus dieser meiner Uni-Zeit und wünsche Ihnen von Herzen *Alles Gute zum Geburtstag*.

Literatur

- BONISONE, P., DECKER, K. [1985]: Selecting uncertainty calculi and granularity: an experiment in trading-off precision and complexity. In: Proc. of Workshop on Uncertainty and Probability in Artificial Intelligence, S. 57-66, Los Angeles, CA, 1985.
- SHAPIRO, St.C. [1992]: Encyclopedia of Artificial Intelligence. John Wiley & Sons, Inc. Publishers - New York, 2nd edition, 1992.
- CHMELINA, K. [2002]: A Concept for Intelligent 3D-Displacement Monitoring in: Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Berlin, May 21-24, 2002.
- CHMELINA, K. [2002]: Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Dissertation, Inst. für Geodäsie und Geophysik, TU-Wien, 2002.
- SCHUBERT, W., STEINDORFER, A., BUTTON, E.A. [2002]: Displacement monitoring in tunnels – an overview. Felsbau 20, No. 2, 7-15.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Klaus Chmelina
Geodata ZT GmbH, Zweigstelle Wien (www.geodata.at)
Hütteldorferstrasse 85
A-1150 Wien
chmelina@geodata.at

Identifikation von dynamischen Deformationsprozessen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung

Andreas Eichhorn
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

1 Einleitung

Innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte erfolgte bei der Untersuchung von Deformationsprozessen eine zunehmende Nutzung von Strukturmodellen, welche aufgrund der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen der Geodäsie und benachbarten Fachdisziplinen wie dem Bauingenieurwesen quantifiziert werden konnten. Im Gegensatz zu den Verhaltensmodellen basieren Strukturmodelle auf konkreten physikalischen Modellvorstellungen hinsichtlich der für das Übertragungsverhalten verantwortlichen inneren Struktur des untersuchten Objekts, welche i.a. in Form von Differenzialgleichungen zu quantifizieren sind.

Die zur Untersuchung von Bauwerksdeformationen verwendeten Strukturmodelle lassen i.d.R. die Zeit unberücksichtigt, d.h. sie gehen von statischen Lastfällen aus. Diese statischen Modelle werden mittels der im Bauwesen üblichen (statischen) Finite-Elemente-Methode (FEM) quantifiziert. Die Bestimmung der in den Modellen enthaltenen Übertragungsparameter (Materialparameter, z.B. Elastizitätsmodul und Temperaturexpansionskoeffizient) ist hierbei als eine wesentliche Aufgabenstellung der parametrischen Identifikation anzusehen, d.h. der Anpassung des theoretisch quantifizierten Strukturmodells an die Realität unter Ausnutzung von geodätischen Beobachtungen.

Die aktuelle Entwicklung in der Deformationsanalyse tendiert in Richtung der Quantifizierung und Identifikation von dynamischen Strukturmodellen. Gemäß den (ebenfalls dynamischen) Verhaltensmodellen beinhalten diese die Zeit in expliziter Weise und sind somit in der Lage, Anpassungs- und Ausgleichsvorgänge zwischen statischen Zuständen zu beschreiben. Sie beinhalten damit besonders realitätsnahe mathematische Modelle der untersuchten Deformationsvorgänge und bieten die umfangreichsten Interpretationsmöglichkeiten.

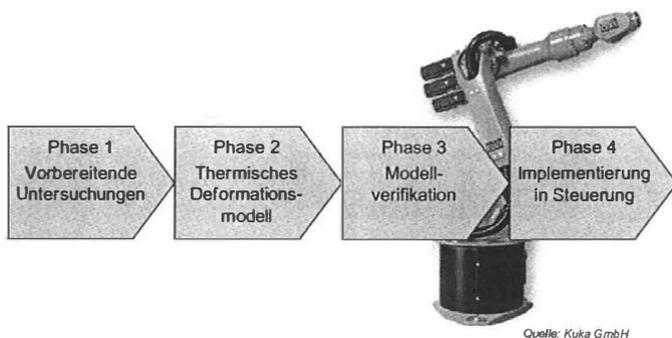


Abbildung 1: Prozesskette bei der Kompensation von thermischen Effekten

Die Motivation für die nachfolgende Identifikation eines dynamischen Strukturmodells entstand aus einer typischen Problemstellung im Maschinenbau. Die Entwicklung von konstruktiven und kompensatorischen Maßnahmen zur Reduktion von thermischen Einflüssen

auf hochpräzise Werkzeugmaschinen ist Gegenstand zahlreicher Arbeiten der letzten Jahre (u.a. OVERBECK 1992, RICHTER 1998, BONSE 1999, s.a. Abbildung 1).

Für den Fall der rechnerischen Kompensation ist die realitätsnahe Berechnung der erwarteten Deformationen von einzelnen Maschinenkomponenten oder kinematischen Ketten von zentraler Bedeutung. Sie erfordert die Quantifizierung der Beziehung zwischen Temperaturmessungen am Objekt (Systemeingang) und den resultierenden Deformationen (Systemausgang). Eine hierfür wesentliche Grundlage ist die Modellierung der räumlichen Temperaturverteilung im Inneren des Objekts.

2 Identifikation des instationären Wärmeflussmodells eines balkenförmigen Körpers

Im Rahmen des Forschungsgebiets „Identifikation dynamischer Systeme“ wurden am „Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen“ (IAGB) der Universität Stuttgart Untersuchungen hinsichtlich der Erstellung von realitätsnahen Wärmefluss- und thermischen Deformationsmodellen durchgeführt (s. EICHHORN 2005). Ein Schwerpunkt lag im Bereich der industriellen Fertigung: die Entwicklung und parametrische Identifikation von Modellen zur Berechnung und Kompensation der thermischen Biegung bei balkenförmigen Körpern (z.B. Roboterarme, etc.). Die Schnittstelle zum Maschinenbau wurde durch das „Institut für Werkzeugmaschinen“ (IFW) der Universität Stuttgart hergestellt.

Die experimentellen Untersuchungen werden im Labor mit einer dünnwandigen Aluminiumsäule als Testkörper durchgeführt. Die Säule hat eine Höhe $h = 1,5$ m und einem Durchmesser $d = 0,15$ m (s. Abbildung 2). Sie wird durch eine äußere Wärmequelle einseitig entlang eines Vertikalprofils belastet (Bereich von ca. 293 bis 400 K). Die Hauptdeformationsgröße ist durch die thermische Biegung in der (x, z) -Vertikalebene gegeben.

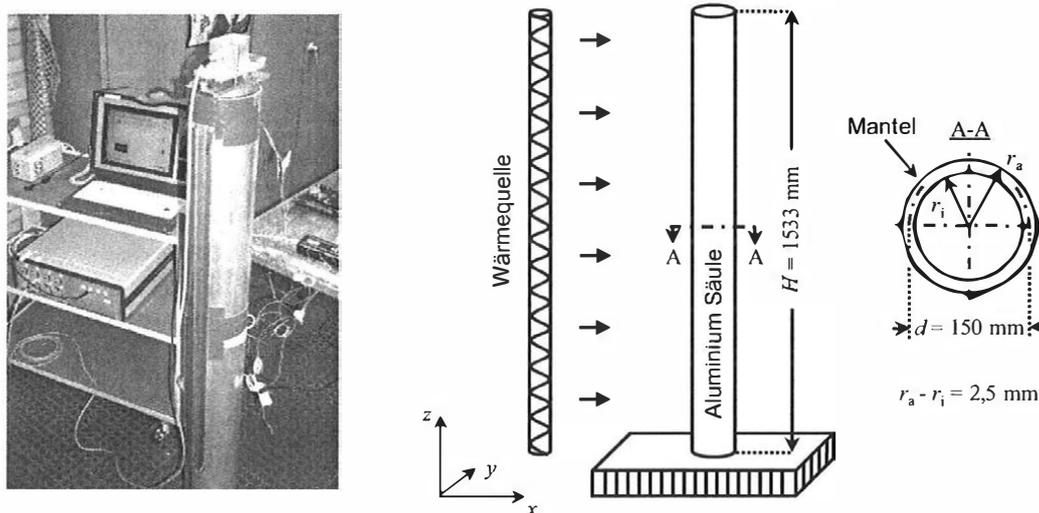


Abbildung 2: Einseitige thermische Belastung einer Aluminiumsäule

Der Nutzung einer dünnwandigen Aluminiumsäule als Testkörper liegen die nachfolgenden Überlegungen zugrunde:

- Repräsentativität der Temperaturverteilung für balkenförmige Maschinenelemente
- Einfache Erzeugung von hochdynamischen Temperaturprozessen

- Gut bekannte Materialparameter => Kontrolle des Identifikationsergebnisses
- Repräsentative Messpunkte zur Verifizierung des kalibrierten Modells

3 Theoretische Systemanalyse

Zur Bereitstellung des dynamischen Modells für den instationären Wärmefluss (=“Temperaturmodell“) wird die Säule in vertikal geschichtete ringförmige (finite) Mantelsegmente unterteilt (s. Abbildung 3a). Innerhalb des Einzelsegments wird der Fluss als homogen im Querschnitt A und mit eindimensionaler Ausbreitung angenommen (s. Abbildung 3b). Abweichungen von diesen Annahmen werden als Störgrößen betrachtet.

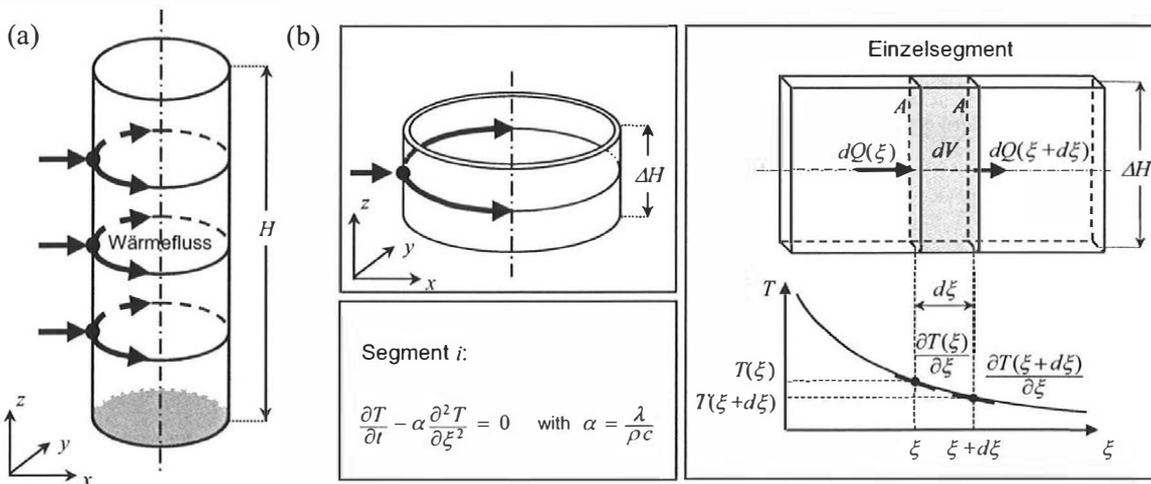


Abbildung 3: Modellierung des Wärmeflusses in finiten Mantelsegmenten

Unter Ausnutzung von FOURIER's Gesetz des Wärmeflusses (u.a. JANNA 2000) kann die instationäre Temperaturverteilung in einem Mantelsegment durch die nachfolgende lineare partielle Differenzialgleichung (PDGL) 2.Ordnung beschrieben werden.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T_i}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T_i}{\partial \xi^2} &= 0 & \text{mit } \alpha &= \frac{\lambda}{\rho c} & i &= 1 \dots s \text{ Segmente} \\
 T_i(\xi, t=t_0) &= T_{0,i}(\xi) & \text{für } 0 < \xi < L & \text{Anfangsbedingung} & & (1) \\
 T_i(\xi=0, t) &= T_i(\xi=L, t) = T_{u,i}(t) & \text{für } t \geq t_0 & \text{Randbedingung, Stellgrößen} & &
 \end{aligned}$$

In Gleichung (1) beschreibt $T_i(\xi, t)$ den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung. Der Parameter α ist die Temperaturleitfähigkeit des Materials und setzt sich aus Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c zusammen. Die Spezifizierung von Anfangswerten $T_{0,i}(\xi)$ und Randwerten $T_{u,i}(t)$ ermöglicht die Lösung der PDGL.

Die Randtemperaturen $T_{u,i}(t)$ werden der Säule von der äußeren Wärmequelle „eingepägt“ und können daher als Systemeingangsgrößen betrachtet werden. Die Temperaturverteilung $T_i(\xi, t)$ repräsentiert den Temperaturzustand des Systems.

4 Experimentelle Systemanalyse

Im Rahmen der experimentellen Systemanalyse muss das Temperaturmodell (1) an die Realität angepasst werden. Diese Anpassung wird u.a. durch Integration von (1) in ein adaptives KALMAN-Filter und Identifikation der Temperaturleitfähigkeit α realisiert.

Die linearisierten Filtergleichungen sind in (2) dargestellt. Auf der linken Seite beinhaltet der Zustandsvektor \mathbf{x}_{Temp} die in n äquidistanten Abtastpunkten ξ_i diskretisierte Temperaturverteilung eines Mantelsegments. Der Parameter α ist in der adaptiven Erweiterung x_p enthalten. Auf der rechten Seite repräsentiert die erste Hypermatrix die erweiterte Transitionsmatrix und ermöglicht die Fortschreibung der Zustandsgrößen x . Der Einfluss des Systemeingangs (Randtemperatur) u wird durch die zweite Hypermatrix quantifiziert. Der Aufbau einer erweiterten Störmatrix (dritte Hypermatrix) ermöglicht die Berücksichtigung von stochastischen Störeinflüssen (z.B. konvektiver Wärmeaustausch, verursacht durch Luftströmungen).

$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_{\text{Temp},k+1} - \bar{\mathbf{x}}_{\text{Temp},k+1} \\ \tilde{x}_{p,k+1} - \bar{x}_{p,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{k+1,k}(\hat{x}_{p,k}) & \mathbf{T}_{p,k+1,k}(\hat{x}_{\text{Temp},k}, \hat{x}_{p,k}, u_k) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_{\text{Temp},k} - \hat{\mathbf{x}}_{\text{Temp},k} \\ \tilde{x}_{p,k} - \hat{x}_{p,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{k+1,k}(\hat{x}_{p,k}) \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} (\tilde{u}_k - u_k) + \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{k+1,k} & \mathbf{T}_{p,k+1,k}(\hat{x}_{\text{Temp},k}, \hat{x}_{p,k}, u_k) \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_k \\ \mathbf{w}_{p,k} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Identifikation der Temperaturleitfähigkeit des Materials erfolgt durch Erzeugung eines thermischen Lastsprungs und Nutzung von zusätzlichen Temperaturmessungen (Messgleichungen des KALMAN-Filters) die mittels NiCr-Ni-Thermoelementen an der Oberfläche der Mantelsegmente durchgeführt werden. Die Filterergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

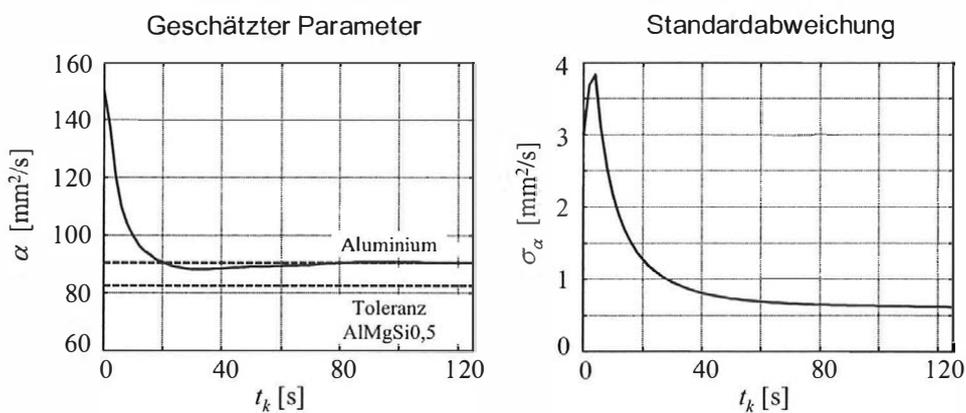


Abbildung 4: Ergebnisse der Identifikation von α

Die Temperaturleitfähigkeit α kann mit einer Abweichung von nur 0,2% vom theoretischen Wert für reines Aluminium (u.a. KAMMER 1995) geschätzt werden. Die Standardabweichung

weist eine mit diesem Ergebnis verträgliche Größenordnung auf. Eine spektroskopische Materialuntersuchung (Verifikation) klassifiziert das Material der Säule als Aluminiumlegierung AlMgSi0,5 mit einem nicht exakt spezifizierbaren Anteil von Magnesium und Silizium. Diese Unsicherheiten erzeugen für den theoretisch möglichen Wert von α ein schmales Toleranzband (s. Abbildung 4). Das KALMAN-Filter ermöglicht die Lokalisierung des Parameters im oberen Bereich des Bandes.

Eine durchgreifende Überprüfung des kalibrierten Temperaturmodells erfolgt durch die Erzeugung von signifikant abweichenden thermischen Belastungen der Säule. Der Vergleich von prädizierten und unabhängig gemessenen Temperaturverteilungen wird in verschiedenen Abschnitten der Säule durchgeführt (s. EICHHORN 2005). Die Abweichungen liegen im Bereich von 0,8 bis 1,4 K (*r.m.s*-Werte) und innerhalb der dreifachen Standardabweichung der verwendeten Thermoelemente. Das Temperaturmodell kann damit als verifiziert angesehen werden.

5 Erweiterung zum Temperaturdeformationsmodell

Die Erweiterung zum Temperaturdeformationsmodell erfolgt durch Verknüpfung des verifizierten Temperaturmodells mit einer „Nutzerfunktion“ (s. HEUNECKE 1995). Hierbei wird die thermische Biegung der Säule als Systemausgang betrachtet. Bei Vernachlässigung von Temperaturspannungen (u.a. BOLEY / WEINER 1960) und Annahme einer kreisförmigen Biegelinie kann diese durch die Säulenneigung φ geometrisch repräsentiert werden (s. Abbildung 5b). Das sehr einfache funktionale Modell ergibt sich nach PELZER (1974) zu:

$$\varphi = \frac{H \alpha_T (T_u - T_s)}{d} = \frac{H \alpha_T \Delta T}{d} \quad (3)$$

In obiger Gleichung ist α_T der als bekannt vorausgesetzte Temperaturexpansionskoeffizient des Materials. Bei Erfassung der thermischen Belastung T_u kann mit dem identifizierten Temperaturmodell (1) und der Nutzerfunktion (3) die Prädiktion des Systemausgangs φ erfolgen.

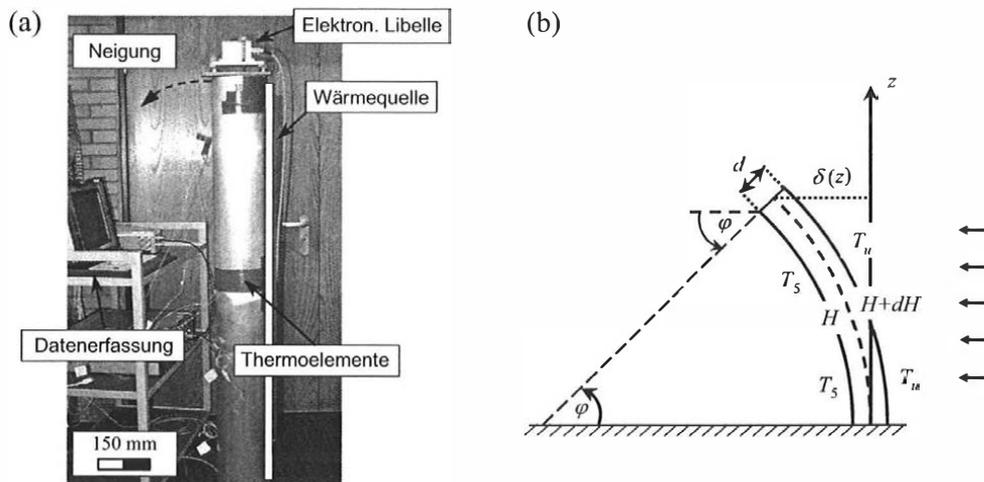


Abbildung 5: Thermische Biegung der Säule

In Abbildung 5a wird der experimentelle Aufbau zur Verifikation des Temperaturdeformationsmodells gezeigt. Die messtechnische Erfassung der Säulenneigung erfolgt mit der elek-

tronischen Libelle Q-flex 1400 (von HONEYWELL). In Abbildung 6 ist die bei gemessener Temperaturbelastung T_u prädizierte (—) der unabhängig gemessenen Neigung (---) für eine Heizphase von 200 s gegenübergestellt. Die mittlere Abweichung zwischen Prädiktionen und Messungen beträgt $r.m.s. = 10$ mgon. Bezogen auf die maximale Neigung der Säule entspricht dies einem relativen Fehler von 2,5%. In Hinblick auf Anwendungen im Bereich der rechnerischen Kompensationsverfahren (die spezifizierten Fehlergrenzen liegen hier bei ca. 1 bis 2%) kann dieses Ergebnis bereits als sehr positiv bewertet werden.

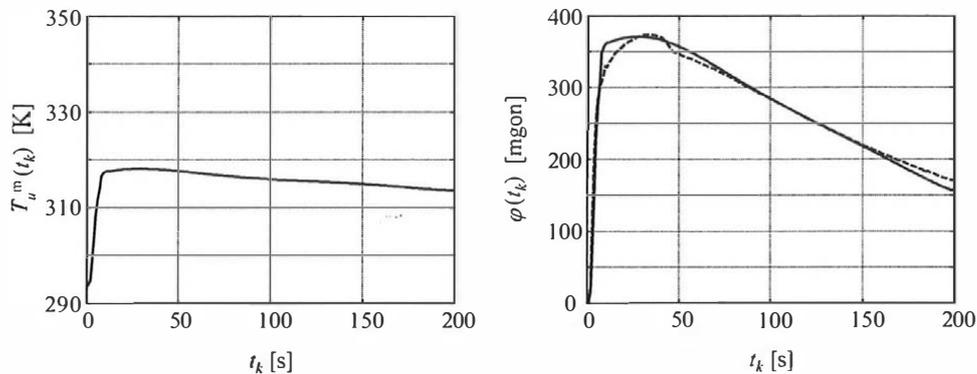


Abbildung 6: Vergleich von gemessener und gerechneter Säulenneigung φ

6 Zusammenfassung

Durch den Vergleich von prädizierten und gemessenen thermisch induzierten Deformationen wird die Effizienz eines identifizierten dynamischen Strukturmodells aufgezeigt. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Unabhängigkeit der verifizierten Modellhypothese von zeitvariablen thermischen Lasten. Diese Aussage gilt natürlich nur für den Gültigkeitsbereich der getroffenen physikalischen Annahmen.

Das kalibrierte Temperaturdeformationsmodell ist zur realitätsnahen Simulation von thermischen Deformationsprozessen geeignet, wobei nur der Verlauf der eingepprägten Randtemperaturen $T_{u,i}$ vorgegeben werden muss. Der Systemausgang (Neigung φ oder Auslenkung δ der Aluminiumsäule) kann dann mit dem Modell berechnet werden. Dies erlaubt die Untersuchung eines weiten Spektrums von thermischen Einflüssen ohne Durchführung zusätzlicher Experimente.

Die erreichten Genauigkeiten in Parameteridentifikation und Prädiktion liefern vielversprechende Voraussetzungen für zukünftige industrielle Anwendungen, z.B. die rechnerische Kompensation von thermischen Einflüssen im Bereich von Fertigungsprozessen. Die geplante Einbindung von konvektiven Wärmeströmungen und der Verteilung von Temperaturspannungen in die Systemgleichungen des adaptiven KALMAN-Filters lässt eine weitere Steigerung des Genauigkeitspotenzials erwarten.

Literatur

- BOLEY, B.A. / WEINER, J.H. (1960): *Theory of Thermal Stresses*. John Wiley & Sons, New York London
- BONSE, R. (1999): *Thermisches Last-Verformungsverhalten von Werkzeugmaschinen*. RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 14/99, Aachen

- EICHHORN, A. (2005): *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung*. Dissertation, Universität Stuttgart, IAGB, im Druck
- HEUNECKE, O. (1995): *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter)*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, Hannover
- JANNA, W.S. (2000): *Engineering Heat Transfer*. CRC, London New York
- KAMMER, C. (1995): *Grundlagen und Werkstoffe*. in: Aluminium-Zentrale-Düsseldorf (Ed.), Aluminium-Taschenbuch, Band 1, Aluminium-Verlag, Düsseldorf
- OVERBECK, T. (1992): *Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Horizontalknickarm Robotern*. Technische Universität Hamburg-Harburg, AWA Fortschrittsberichte, Band 4, Hamburg
- PELZER, H. (1974): *Bewegungen hoher Türme*. in: Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 36, 1974, 345–354.
- RICHTER, F. (1998): *Erfassung und Ausgleich thermisch bedingter Verformungen an Industrierobotern*. Universität Stuttgart, Berichte aus dem IfW, Band 12, Stuttgart

Anschrift:

Dipl.-Ing. Andreas Eichhorn
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 27-29
A-1040 Wien

Untersuchungen an einem Inclinometer vom Typ Lucas Schaevitz T335

Johannes Fabiankowitsch
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

Allgemeines

Eine bei geotechnischen Messungen weit verbreitete Methode zur Bestimmung von Neigungen ist jene mittels Inclinometer. Diese Messungen dienen beispielsweise der messtechnischen Erfassung von Bewegungen an Kriechhängen, Baugrubenwänden und Böschungen oder zur Erfassung von Setzungen an Bauwerken. Die Messungen können entweder ein-, zwei- oder dreiaxsig durchgeführt werden, je nachdem, wie viele Inclinometer zu einem Gesamtmesssystem zusammengebaut werden. In der vorliegenden Arbeit wurde ein zweiachsiges Inclinometer untersucht.

Übliche in der geotechnischen Messtechnik verwendete Vertikal-inclinometer haben eine Auflösung von 14 bis 16 Bit bei einem Messbereich von 60° . Dies entspricht einer Auflösung von etwa $64\mu\text{m}$ bis ca. $16\mu\text{m}$ auf einem Meter Länge. Richtungsmäßig bedeutet das eine Winkelauflösung von 3,7 bis 0,9 Milligrad ($13,3$ bis $3,3$ Bogensekunden).

Funktionsprinzip

Die Lucas Schaevitz T335 Sensoren sind nach dem „Servo-Prinzip“ arbeitende Beschleunigungssensoren – so genannte „Servo-Accelerometer“. Die Sensoren beinhalten in einem hermetisch dichten Gehäuse ein Pendel-Drehspulsystem mit Spannbandlagerung. Das „Servo-Prinzip“ beruht darauf, dass bei auftretender Beschleunigung die Pendelmasse über eine Regelschleife in Nullstellung gehalten wird.

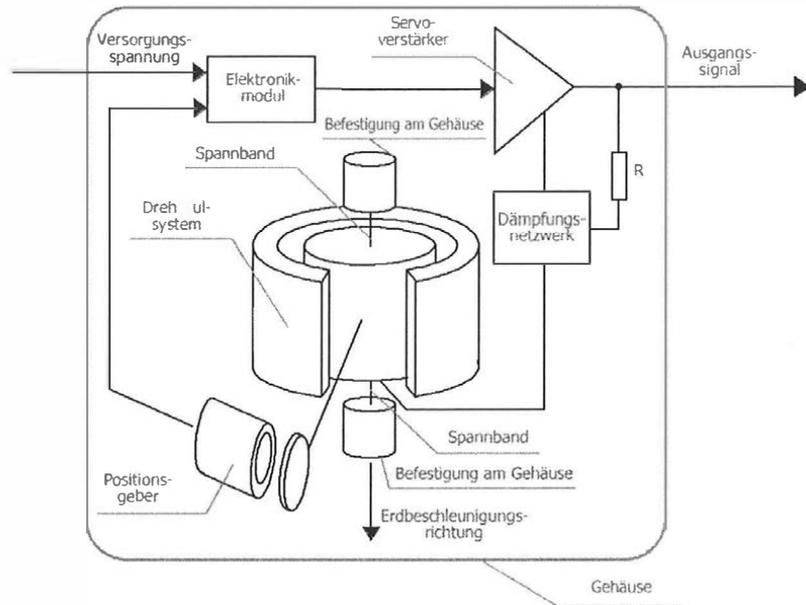
Dieses Pendel-Drehspulsystem stellt zusammen mit den zusätzlichen elektronischen Komponenten einen geschlossenen Regelkreis dar. Es misst die Abweichung des Pendels von der Erdbeschleunigungsrichtung.

Die Arbeitsweise eines solchen Sensors ist folgendermaßen erklärt: Wird der Sensor um einen Winkel in Messrichtung geneigt, so bewirkt das Pendel auf Grund der Schwerkraft ein Drehmoment um die Aufhängungsachse und dadurch ein Wegbewegen des Pendels aus der Ruhelage. Diese Lageveränderung des Pendels wird von einem Positionssensor erfasst. Dieser liefert ein Fehlersignal, welches über das Elektronikmodul dem Servo-Verstärker zugeführt wird.

Das Ausgangssignal des Servoverstärkers wird dem Drehspulsystem zugeführt und erzeugt dort ein Drehmoment, mit dem das Pendel wieder in seine ursprüngliche Position gebracht wird. Der notwendige Strom zur Erzeugung dieses Drehmomentes ist direkt proportional dem Sinus des mit dem Schwerevektor und dem Pendel eingeschlossenen Neigungswinkels und kann über den Widerstand R als Spannung gemessen werden.

Die Dämpfung des Pendels erfolgt mechanisch durch Einbettung in Silikonöl und elektrisch durch ein Dämpfungsnetzwerk.

Eine Prinzipskizze des Pendel-Drehspulsystems mit den zugehörigen elektronischen Komponenten ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

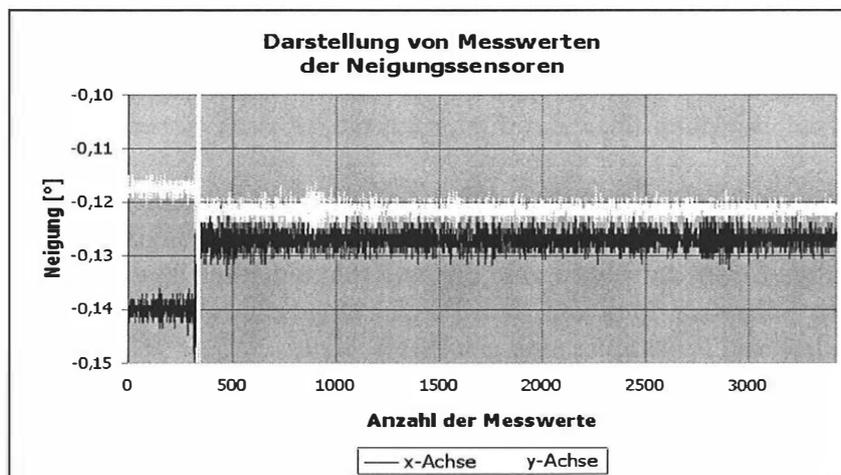


Prinzipische Skizze eines Inclinometers [Reißner, 1999]

Laboruntersuchungen

Die verschiedenen Tests im Labor sollen zeigen, dass das Inclinometer dafür verwendet werden kann, die 2D- Lage einer mobilen Messplattform auf einem Fahrzeug, auf welcher ein Tachymeter oder ein Scanner montiert ist, im ruhigen oder bewegten Zustand so zu erfassen, dass eine Lagegenauigkeit des Zielpunktes in etwa 100 Meter Entfernung ± 1 cm beträgt. Dies entspricht einer Richtungsauflösung von $\pm 20,6''$.

In einem *ersten Test* wurde untersucht, ob die Sensoren eine Anlauf- bzw. Aufwärmphase benötigen. Dazu wurde der Sensor im Messkeller auf einen unbeweglichen Pfeiler montiert und die Neigungsdaten aufgezeichnet. Ein typisches Beispiel von Messwerten der Neigungssensoren ist in der folgenden Abbildung zu sehen.



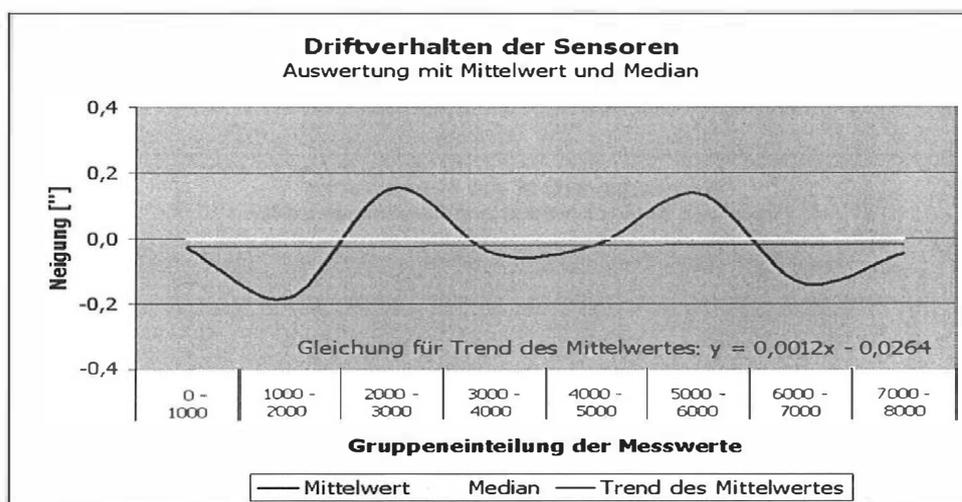
Darstellung von Messdaten der Neigungssensoren

In diesem Diagramm sieht man deutlich, dass die Neigungssensoren zu Beginn der Messung einige Fehldaten liefern. Diese Fehlinformationen treten – mehreren Tests zufolge – nicht immer auf. Treten sie aber auf, dann maximal bis zum Messwert 450. Das entspricht einer Zeitdauer von ca. 4 Sekunden. Der Grund für diese unkorrekten Werte konnte nicht ermittelt werden.

In einem *zweiten Test* wurde das Driftverhalten der Sensoren untersucht, da ein zu großer zeitlicher Trend in den Messwerten die Genauigkeit der Neigungsbestimmung stark beeinträchtigen würde.

Die ca. 8000 Messwerte wurden in äquidistante Gruppen zu je 1000 Werten unterteilt. In diesen Gruppen wurde jeweils der Mittelwert, der Median und die Differenz zwischen Mittelwert und Median gebildet.

Eine graphische Darstellung der Auswertung durch den Mittelwert und den Meridian ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.



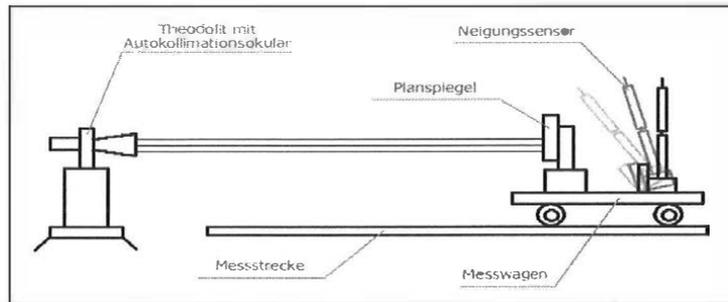
Driftverhalten der Sensoren (Auswertung mit Mittelwert und Median)

Die Auswertung zeigt, dass der Mittelwert über die gesamte Beobachtungsdauer im Durchschnitt um ca. $\pm 0,2''$ schwankt. Der geringe Trend des Mittelwertes ist zu vernachlässigen. Der Wert des Medians dagegen ist konstant und, hat eine durchschnittliche Abweichung zum Mittelwert von $-0,02''$ und weist keinen Trend auf. Das bedeutet, dass die Messwerte der Neigungssensoren nicht driften und sowohl mit dem Mittelwert als auch mit dem Median ausgewertet werden können.

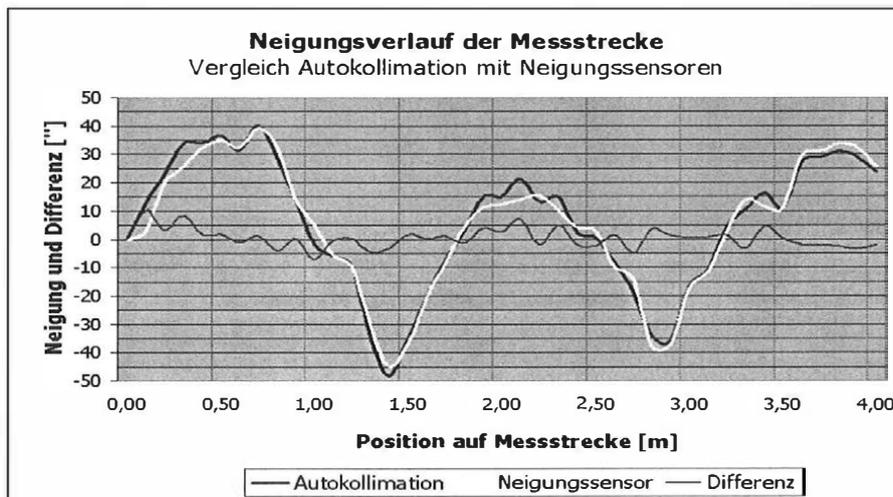
In einem *dritten Test* wurden die Neigungsauflösung und die Linearität des Sensors untersucht. Bei einer Winkelauflösung von $3,3''$ (abhängig vom D/A-Wandler) würde man für eine Referenzmessung einen Kipptisch hoher Genauigkeit benötigen. Da dieser nicht zur Verfügung stand, wurde das Verfahren der Autokollimation unter zu Hilfenahme eines Wild T2 angewendet.

In einer zuvor ermittelten Testserie konnte die „persönliche Ablesegenauigkeit“ eines mehrfach beobachteten Zielpunktes mit einer Standardabweichung von $\pm 1,64''$ erreicht werden. Dieser Wert liegt unter der Auflösung des Neigungssensorsystems von $3,3''$. Damit ist die Methode der Autokollimation nicht die beste, aber geeignet, um die Genauigkeit des Inclinometers zu überprüfen.

Um ebenso die Linearität der Sensoren zu überprüfen, wurde dieses Verfahren mit unterschiedlichen Neigungen wiederholt. Die Linearität dient als Beschreibung der Abweichung von der geforderten Kennlinie [Profos&Pfeifer, 1997]. In diesem Fall ist die Kennlinie eine Gerade, da ein linearer Zusammenhang von Ein- und Ausgangssignal besteht. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen eine Prinzipskizze des Messaufbaues und den Vergleich der beiden Messserien.



Prinzipische Skizze der Messanordnung für die Autokollimation



Vergleich der gemessenen Neigungen

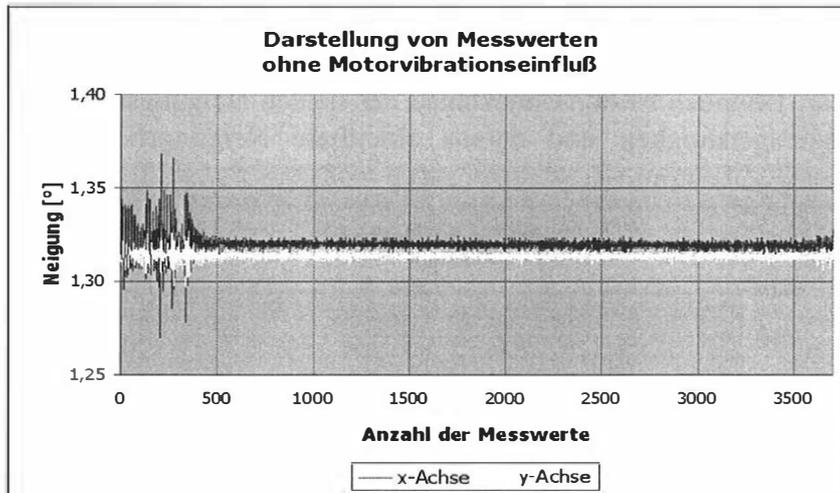
Das Ergebnis dieser Auswertung sind Neigungen für bestimmte Positionen auf der Messstrecke. Die Differenzen der Neigungen differieren im Durchschnitt um $1,4''$. Das bedeutet, dass die angegebene Winkelauflösung der Neigungssensoren von $3,3''$ zutreffend ist. Für die Linearität der Sensoren konnte herausgefunden werden, dass die für verschiedene Neigungen entstandenen Kurven sich nicht mehr als um $3,3''$ unterscheiden und somit eine lineare Kennlinie bestätigen.

Weitere Untersuchungen

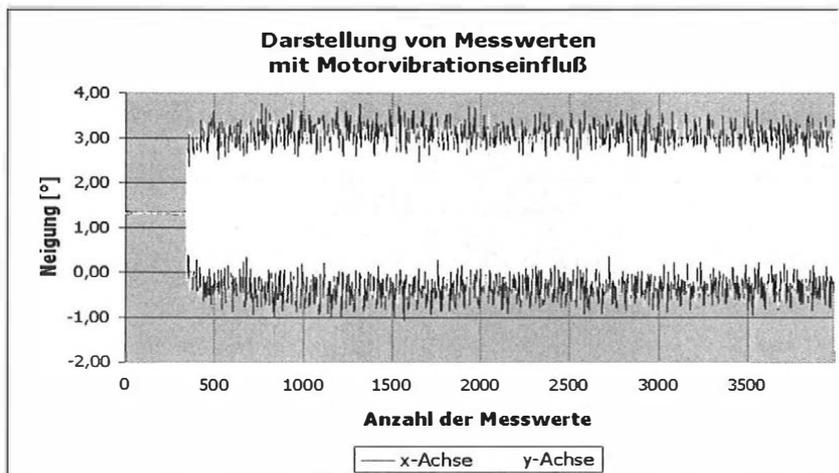
Der *Einfluss von Motorvibrationen* auf das zweiachsige Inclinometer ist ein unbekannter Faktor, dessen Größe mit einem weiteren Test untersucht wurde. Die Neigungssensoren wurden auf das Dach eines PKW's montiert und bei Stillstand und laufendem Motor Messungen durchgeführt.

Für die ohne Motor gemessene Neigung des Fahrzeuges liegt die Standardabweichung der Messreihe bei $\pm 5''$. Ein sehr guter und vor allem ausreichender Wert im Vergleich zu den geforderten $\pm 20,7''$.

Die Standardabweichung der Messreihe, die bei laufendem Motor aufgenommen wurde, liegt bei $\pm 1,23^\circ$. Dieser Wert liegt weit über der geforderten Genauigkeit von $\pm 1\text{cm}$ auf 100m . Die beiden folgenden Abbildungen dokumentieren den jeweiligen Einfluss.



Messwertreihe ohne Einfluss von Motorvibrationen



Messwertreihe mit Einfluss von Motorvibrationen

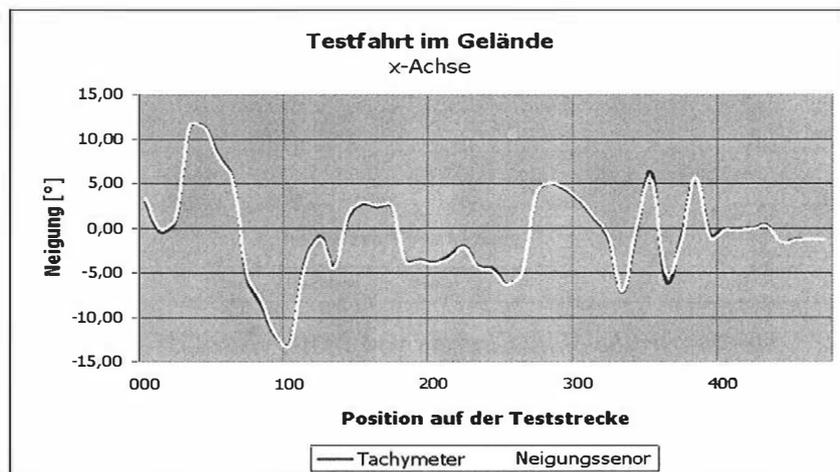
Die Vibrationen, die durch den laufenden Motor hervorgerufen werden, sind in Längs- und Querrichtung nahezu ident und betragen ca. $\pm 5\text{cm}$ auf 100m . Dieser Wert entspricht etwa $\pm 100''$. Damit ist gezeigt, dass die Inklinometer Vibrationen aufgrund ihrer dynamischen Eigenschaften verstärken. Ebenso ist aus diesem Test zu erkennen, dass Punktlagegenauigkeiten von $\pm 1\text{cm}$ auf 100m nur ohne laufenden Motor zu erreichen sind.

In einem *weiteren Test* wurden auf mehreren Teststrecken (Neigungsspektrum von ca. $-12,0^\circ$ bis ca. $+13,5^\circ$ in x- und y-Richtung) Neigungsmessungen mit den Inklinometern bei laufendem Motor durchgeführt. Die räumliche Lage der Sensoren wurde mit Hilfe eines Theodolits eingemessen und mit den Daten der Neigungssensoren verglichen. Im

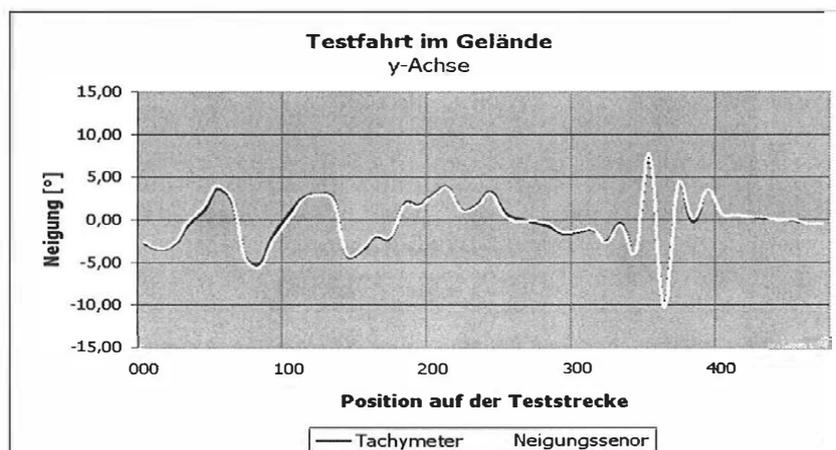
Vordergrund dieses Tests stand nicht die Genauigkeit, sondern die praktische Komponente. Es sollte überprüft werden, ob der Trend der Neigungssensoren mit den Fahrzeugbewegungen übereinstimmt.

Vor der Gegenüberstellung der Messergebnisse wurde die Verdrehung zwischen dem Neigungssensorkoordinatensystem und Dachkoordinatensystem des PKW's ermittelt und eliminiert. Die Verdrehung betrug in x- Richtung $0,258^\circ$ und in y-Richtung $-0,075^\circ$.

Ein Vergleich der beiden folgenden Neigungskurven zeigt, dass die Sensormessungen immer dem Trend der Fahrzeugneigung folgen. Der begrenzende Faktor in der Genauigkeit stellte die polare Aufnahme mit dem Theodoliten und die kurzen Basen in x- und y-Richtung der Sensorhalterung dar. Dennoch ist der Unterschied der beiden Neigungskurven nie größer als die erreichbare Messgenauigkeit und daraus ableitbare Neigungsbestimmung mit dem Theodoliten.



Neigungskurve als Ergebnis der Testfahrt im Gelände für die x-Achse



Neigungskurve als Ergebnis der Testfahrt im Gelände für die y-Achse

Zusammenfassung

Die verschiedenen Testmessungen mit dem Inclinometer vom Typ Lucas Schaevitz T335 zeigen, dass mit Ausnahme der Anlaufphase dieser Sensor dafür geeignet ist, die xy-

Neigungen einer mobilen Messplattform mit der geforderten Genauigkeit zu erfassen, sofern der Motor des PKW's, auf dem diese Plattform montiert ist, abgestellt ist.

Der direkte Einsatz der Sensoren an einem Testfahrzeug lieferte zunächst überraschende Daten, da die Sensoren auf Grund ihrer dynamischen Eigenschaften auf Fahrzeugbewegungen, verursacht durch Motorvibrationen, extrem beeinflusst werden. Gelingt es, aus diesem Gesamtvibrationsspektrum den Anteil der Motorvibrationen herauszufiltern, so sieht man, dass die durch die Fortbewegung des Fahrzeuges verursachten Neigungsänderungen nur einen Bruchteil ausmachen.

Dem Jubilar Prof. Heribert Kahmen

Es verbindet mich mit Ihnen, s.g. Herr Professor Kahmen, eine lange und vor allem sehr lehrreiche Zeit auf der TU Wien. Als Sie 1986 nach Wien berufen wurden, sahen Sie es als Ihre vordringliche Aufgabe an, modernste computerunterstützte Messsysteme (Messroboter) und GPS-Sensoren (übrigens die ersten in Österreich) anzukaufen und vor allem in den Aufgabenbereichen Deformationsmessungen und deren Analyse den Wissensstand Ihrer neuen Mitarbeiter auf den aktuellsten Stand zu bringen. Das veranlasste die damaligen Kollegen und auch mich, sich mit völlig neuen Technologien zu befassen.

Im Zuge dieser „Erneuerungen“ entstand auch die erste Dissertation in Wien mit dem Titel „Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern“, welche ich 1990 einreichte. Diese Arbeit verlangte auch eine intensive Zusammenarbeit mit der Industrie, eine Vorgangsweise, welche Sie in Ihrer Eigenschaft als Hochschulprofessor (nicht nur in Wien) sehr erfolgreich praktizierten und von Ihren Mitarbeitern forderten. Selbständiges Arbeiten, Kooperation mit anderen Fachbereichen, internationale Projektarbeit, Zusammenarbeit mit kommerziellen Unternehmen, Kongressteilnahmen, Organisation von Kongressen und eine rege Publikationstätigkeit waren weitere Anforderungen an Ihre Mitarbeiter.

Heute, fast zwanzig Jahre später, möchte ich mich bei Ihnen dafür bedanken, dass Sie mich während meiner Uni-Zeit „gefordert“ aber auch „gefördert“ haben, letztendlich gelang es Ihnen sogar – in äußerst schwierigen Zeiten – meine Definitivstellung am Institut zu ermöglichen.

Ich wünsche Ihnen von Herzen Gesundheit und Alles Gute zum Geburtstag.

Literaturverzeichnis

[Profos&Pfeifer, 1997] Paul Profos und Tilo Pfeifer ; Grundlagen der Messtechnik, 5. Auflage ;R. Oldenbourg Verlag, München, 1997

[Reißner, 1999] Friedrich Reißner ; Zweiachsiges Inklinometer zur Messung von radialen Bohrlochverschiebungen ; Diplomarbeit an der TU-Graz, 1999

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Johannes Fabiankowitsch
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 27-29
A-1040 Wien

Einsatz von Fuzzy Methoden in der Ingenieurgeodäsie am Beispiel eines tektonischen Überwachungsnetzes

Michaela Haberler
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

1 Einleitung

Eine wichtige Aufgabe der Ingenieurgeodäsie ist es, Deformationen aufzudecken, also geometrische Veränderungen verschiedenster Art an künstlichen und natürlichen Messobjekten wie Bauwerken, technischen Anlagen, Hangrutschungen, Verwerfungszonen etc.

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Überwachung von Staumauern notwendig; die Auswertung damals verwendete keine strengen Algorithmen und auch keinerlei statistische Aussagen (deskriptive Phase). Durch die rasche Entwicklung von Messinstrumenten und Computeranlagen in den 1960er und 1970er Jahren erfolgte der Übergang zur *statistischen Deformationsanalyse*. Es wurde versucht, statistische Beurteilungskriterien für Überwachungsmessungen, vor allem für die Punktverschiebungen, zu finden. 1986 wurden die Forschungen des „Ad Hoc Committee on Deformation Analysis“ der FIG Working Group 6.1 (WG on Deformation Measurements) eingestellt, da die Deformationsanalyse quasistatischer Netze als abgeschlossen galt. Die allgemeine Vorgehensweise ist grob durch folgenden Ablauf beschrieben:

In der Regel werden geodätische Überwachungsnetze rund um das zu beobachtende Objekt geplant und daran anschließend mit verschiedensten Methoden in mehreren Epochen gemessen. Der Auswertung dieser Daten dient die Deformationsanalyse, die statistisch gesicherte Aussagen über die Veränderung des Objekts machen kann. Grundsätzliche Fragestellungen sind etwa, welche Punkte sich signifikant bewegt haben (Einzelpunktbewegung) oder ob sich einige der beobachteten Punkte gleichförmig bewegen (Blockbewegung). Bei tektonischen Überwachungsnetzen z.B. kann so die Verwerfung lokalisiert werden.

Dieses einfache Verfahren soll nun „intelligent“ erweitert werden. Aufgabenstellung ist also, aus gegebenen Verschiebungsvektoren Strukturen bzw. Blöcke mit ähnlichem Bewegungsmuster zu extrahieren.

2 Fuzzy Methoden

In den exakten Wissenschaften geht man üblicherweise davon aus, mit „scharfen“, exakten Daten und Modellen zu arbeiten. Bei genauerer Überlegung erkennt man allerdings, dass Modelle für die jeweilige Aufgabenstellung meist nur mit idealisierten Annahmen erstellt werden können, da manche Informationen nicht zugänglich oder von Zufallsmechanismen abhängig sind (*unsichere Information*). Auch die vermeintlich exakten Messwerte sind eigentlich keine scharfen Daten, sondern *unpräzise Information*. Bisher hat man versucht, diese Unschärfe durch Annahme von Wahrscheinlichkeitsaussagen und Toleranzangaben zu beschreiben.

Aus dem täglichen Leben sind wir allerdings gewohnt, mit unscharfen Informationen umzugehen. Intuitiv verwenden wir z.B. fließende Übergänge zwischen Begriffen wie

jung/alt, groß/klein, langsam/schnell usw. Unser Wissen wird dabei meist in Form von Wenn-Dann-Regeln ausgedrückt. Ein Beispiel wäre:

Wenn es regnet, ist die Straße naß.

Dabei scheint intuitiv klar, dass die Nässe der Straße prinzipiell auch von der Stärke des Regens abhängt. Unsere Sprache ist also bestens geeignet, mit solch unscharfen Informationen umzugehen; um auch im Computer damit arbeiten zu können, wird die Theorie der Fuzzy Mengen sowie Fuzzy Logic verwendet. Die Möglichkeiten der menschlichen Sprache werden dabei durch *linguistische Variablen* nachgebildet. Diese unterscheiden sich von numerischen Variablen, indem ihre Werte nicht durch Zahlen, sondern durch Wörter der täglichen Sprache angegeben werden. Eine linguistische Variable (z.B. Körpergröße) wird durch mehrere *linguistische Terme* (z.B. klein, mittel, groß) beschrieben; deren Eigenschaften werden mathematisch durch *Zugehörigkeitsfunktionen* definiert. Die Zugehörigkeit μ eines Elementes zu einer Menge kann nun - im Gegensatz zur klassischen Mengenlehre - auch Werte zwischen 0 und 1 annehmen (siehe Abbildung 1).

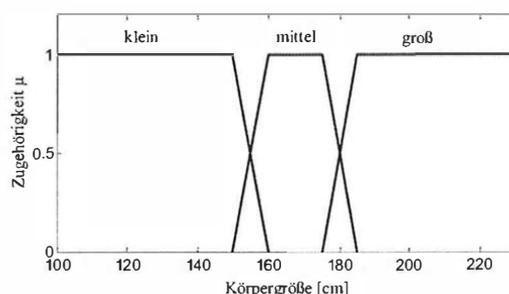


Abbildung 1: Darstellung der Variable „Körpergröße“ durch drei linguistische Terme.

Analog ergibt sich als Erweiterung der klassischen zweiwertigen Logik, dass der Wahrheitswert eines Fakts bzw. eines logischen Schlusses nicht nur mit *wahr* oder *falsch*, sondern als unscharfe Menge angegeben werden kann (mehrwertige Logik).

Rechenoperationen wie Durchschnitt, Vereinigung von Mengen usw. bis hin zur Implikation wurden für diese mehrwertige Logik neu definiert. Zur Modellierung der logischen Implikation $x \rightarrow y$, also der Wenn-Dann-Regeln der Wissensbasis, wird z.B. das Kreuzprodukt (und somit der Minimum-Operator) verwendet:

$$\mu_{x \rightarrow y}(x, y) = (\mu_1 \times \mu_2)(x, y) := \min(\mu_1(x), \mu_2(y)) \quad (x, y) \in G_1 \times G_2$$

Eine Anwendung der Fuzzy Logic sind *unscharfe Regler*. Diese werden meist zur Prozesssteuerung bzw. zur Entscheidungsfindung eingesetzt, wenn es kein analytisches oder nur ein sehr kompliziertes Modell gibt, das den Prozeß beschreibt. Der Vorteil dabei ist, dass das menschliche (Experten-) Wissen, das eher qualitativ als quantitativ, nämlich meist in Form linguistischer Wenn-Dann-Regeln, vorliegt, durch *regelbasierte Inferenz* ähnlich dem menschlichen Denken verarbeitet werden kann. Regelbasierte Inferenz bezeichnet hier das fuzzy-logische Schließen auf unscharfen Informationen: jede (linguistisch formulierte) Wenn-Dann-Regel besteht aus einer Prämisse (Wenn-Teil), in der die Messgrößen entsprechend ihrer Zugehörigkeitsfunktionen verarbeitet werden, sowie aus einer Konklusion (Dann-Teil), die den Stellwert bzw. Ausgabewert für diese Situation ausgibt. Aus einem aktuellen Eingangswert (Fakt) wird also mit Hilfe einer Regel (Implikation) ein logischer Schluß gezogen.

Ein unscharfer Regler besitzt das gesammelte Expertenwissen in Form einer Regelbasis, die je nach Anwendung mehrere tausend Regeln enthalten kann. Die Kombination der Ergebnisse all dieser einzelnen Regeln zu einem Ergebniswert erfolgt durch die sogenannte *Aggregation* sowie die anschließende *Defuzzifizierung*.

3 Anwendung der neuen Methoden in der Geodäsie

In den 90er Jahren begannen neue Methoden wie wissensbasierende Systeme, Fuzzy Technologien sowie neuronale Netze ihren Einzug in die Geodäsie. Plötzlich wurde auch das als abgeschlossen angesehene Kapitel der statistischen Deformationsanalyse wieder interessant. (LEHMKÜHLER, 1993) z.B. sieht die Deformationsanalyse als Mustererkennungsaufgabe, wo seit langem Segmentierungsverfahren eingesetzt werden, um – allgemein – Teilbereiche eines Bildes, die in bestimmter Hinsicht einheitlich sind, hervorzuheben. (BREZING, 2000) entwickelt darauf aufbauend ein Expertensystem, das zusätzlich zu Erfassung und Auswertung geodätischer Beobachtungsdaten auch eine automatische Untersuchung auf Deformationen sowie eine Interpretation der Verschiebungsvektoren wie Verschiebung, Rotation, Dehnung etc. beherrscht. (HEINE, 1999) beschreibt die Deformationsanalyse als einen Spezialfall der allgemeinen Systemtheorie und setzt daher in der Systemtechnik etablierte Verfahren ein. Anhand eines bewegungsaktiven Hangareals im Staubereich einer Talsperre werden Volterra-Modelle, Differenzgleichungsmodell, Fuzzy Modelle sowie Neuronale Netze verwendet, um den dynamischen Prozess der Rutschung nachzubilden.

Hier soll gezeigt werden, wie die in der Ingenieurgeodäsie noch eher jungen Fuzzy Methoden verwendet werden können, um konsistente Punktbewegungen aufzudecken. Die Idee war, dort anzuschließen, wo das Ad Hoc Committee 1986 seine Forschungen einstellte: aus den Verschiebungsvektoren, die die geodätische Deformationsanalyse liefert, weitere Informationen über Blockbewegungen abzuleiten.

Dafür werden einerseits geodätische Parameter wie z.B. Strainparameter als Indikatoren verwendet (3.1), andererseits werden die Möglichkeiten der Fuzzy Systeme mit weiteren linguistisch definierten Kennwerten voll ausgeschöpft (3.2). Die Beschreibung des vollständigen Algorithmus folgt in 3.3.

3.1 Geodätische Parameter

Die Strainanalyse wird seit den 1970er Jahren immer wieder zur Untersuchung von Deformationszuständen von Objekten verwendet. Die Idee ist, die Strainparameter, die sich aus den Verschiebungsvektoren von Punktgruppen zwischen zwei Messepochen ergeben, zu untersuchen. Bei Punkten, die ein einheitliches Bewegungsmuster aufweisen, sind die zugehörigen Strainparameter klein. Nimmt man hingegen einen Punkt mit einem abweichenden Bewegungsverhalten zu einem konsistenten Block hinzu, steigen die Strainparameter stark an. Diese Eigenschaft wird in den Fuzzy Systemen (siehe 3.3) verwendet, um konsistente Blöcke von nicht konsistenten zu unterscheiden. Dabei zeigt es sich, dass die von den Strainparametern abgeleitete Verzerrungselipse, konkret die beiden Halbachsen e_1 und e_2 , die optimalen Parameter zur Analyse von Verschiebungsfeldern darstellen, denn im Gegensatz zu den koordinatensystem-abhängigen Strainparametern e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} sind e_1 und e_2 z.B. invariant gegenüber Transformationen.

3.2 Visuelle Parameter

Ein Experte, der eine gegebene Graphik mit Verschiebungsvektoren manuell (bzw. eigentlich visuell) beurteilt, orientiert sich am Bewegungsmuster, um (geologisch bzw. tektonisch) sinnvolle Blockteilungen zu finden. Ein Block ist also im menschlichen Denken dadurch definiert, dass die auf ihm gelegenen Punkte ein ähnliches Bewegungsmuster besitzen. Die Eigenschaft „ähnlich“ kann nicht einfach berechnet werden; diese Definition ist ein typisches Beispiel für eine linguistische Regel, wie wir Menschen sie im täglichen Leben ständig verwenden. Mit Hilfe von Fuzzy Systemen können Eigenschaften wie z.B. „ähnlich“ im Computer entsprechend unserem Denken modelliert werden. Die Ähnlichkeit des Bewegungsmusters kann z.B. durch die Übereinstimmung von Richtung und Länge der Verschiebungsvektoren beschrieben werden. Eine der im Algorithmus verwendeten Regeln lautet etwa:

Wenn die Azimute der Vektoren ähnlich sind, liegen die Punkte auf einem gemeinsamen Block.

3.3 Algorithmus zur Blockdetektion

Der nachfolgend beschriebene Algorithmus wurde in Matlab[®] programmiert, für die Lösung der Aufgabe waren insgesamt 4 Fuzzy Systeme notwendig (siehe Abbildung 2).

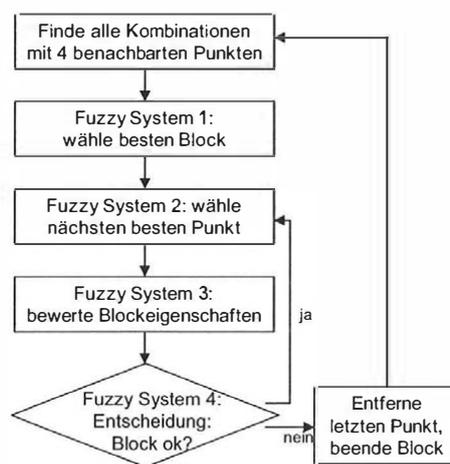


Abbildung 2: Gesamtschema des Algorithmus.

Die Verschiebungsvektoren werden als Eingangsdaten eingelesen; daraus werden verschiedene geodätische und visuelle Parameter abgeleitet. Aus den Beobachtungen (den Verschiebungsvektoren) werden mittels einer vermittelnden Ausgleichung die Strainparameter e_{xx} , e_{xy} , e_{yy} , die den inneren Verformungszustand beschreiben, sowie die Starrkörperbewegungskomponenten ω (Rotation), t_x , t_y (Translationen) berechnet; zur Bewertung des Bewegungsverhaltens werden die aus den Strainparametern abgeleitete Verzerrungsellipse sowie Rotations- und Translationsparameter herangezogen.

Der Algorithmus startet also mit der Suche nach 4 benachbarten Punkten (siehe Strukturdiagramm in Abbildung 2). Da von vornherein keine Kombination von 4 Punkten ausgeschlossen werden kann, müssen alle möglichen Kombinationen berechnet werden. Aus dieser Vielzahl von Lösungen (z.B. 200 Kombinationen bei 14 Netzknoten) muss der „optimale“ Block gefunden werden. Dazu dient das erste Fuzzy System. Aus den berechneten Parametern der Ausgleichungen werden hier alle Möglichkeiten bewertet; ist die „beste“ Lösung gefunden, wird iterativ ein Punkt nach dem anderen dem Block hinzugefügt. Dabei wird wiederum aus allen Nachbarknoten der „optimale“ Punkt gewählt, d.h. der Punkt, dessen Verschiebungsvektor am besten mit dem Bewegungsmuster des Blockes übereinstimmt. Diese Auswahl geschieht mit dem Fuzzy System 2. Sobald ein neuer Punkt vorläufig hinzugefügt wurde, muss im dritten Fuzzy System ein Indikator berechnet werden, wie gut dieser Punkt tatsächlich zum Block passt; denn es kann ja auch der Fall eintreten, dass nur mehr schlecht passende Punkte vorhanden sind. Fuzzy System 2 wählt dennoch den optimalsten Punkt daraus aus; System 3 muss daher diese Wahl bewerten. Ein viertes Fuzzy System trifft eine endgültige ja/nein-Entscheidung auf der Basis der Entwicklung des Blocks. Wird der Punkt akzeptiert, wird der nächste Punkt ausgewählt; muss der Punkt verworfen werden, wird der letzte Punkt natürlich entfernt, und der Block wird beendet.

Danach wird versucht, aus den verbliebenen Punkten neue Startblöcke mit 4 Punkten zu finden, und der Algorithmus startet von neuem.

4 Testnetz Delft

4.1 Datenmaterial

Für das „Seminar Deformationsanalysen '83“ (WELSCH, 1983) wurden simulierte Messdaten (Richtungen und Strecken) in mehreren Epochen vorab veröffentlicht; die Beiträge beschreiben verschiedene Methoden der Deformationsanalyse, um die Verschiebung der Punkte aufzudecken. In einigen Fällen wird auch die Blockbewegung untersucht.

Als erläuterndes Beispiel werden hier die Epochen '1' und '3b' der veröffentlichten Daten untersucht. Die Messdaten (Richtungen und Distanzen) wurden einer zweistufigen Deformationsanalyse mit dem Programm PANDA (PANDA, 2000) unterzogen, um die Verschiebungsvektoren zu erhalten. Dabei wurden die 9 Punkte des westlichen Blocks als Stützpunkte erkannt und somit als datumsgebende Punkte verwendet. Die 5 Punkte des östlichen Bereiches (3, 5, 11, 39, 41) wurden als verschobene Einzelpunkte markiert. Die erhaltenen Verschiebungsvektoren sind in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

4.2 Auswertung

Die berechneten Verschiebungsvektoren dienen als Eingangsparameter für den entwickelten Algorithmus zur Blockdetektion. Für das menschliche Auge ist sofort erkennbar, dass es sich hier offenbar um zwei Blöcke handelt, die durch eine Verwerfungszone getrennt sind. Auch in der ursprünglichen Literatur sind diese zwei Blöcke als Ziel der Auswertungen angegeben. Allerdings stimmt das Bewegungsmuster der Punkte 15, 17 und 37 nicht gut mit dem des westlichen Blocks überein; eventuell könnte hier ein dritter Block gebildet werden.

Der Ablauf der Auswertung mit der in Matlab[®] erstellten eigenen Software ist in Tabelle 1 angegeben.

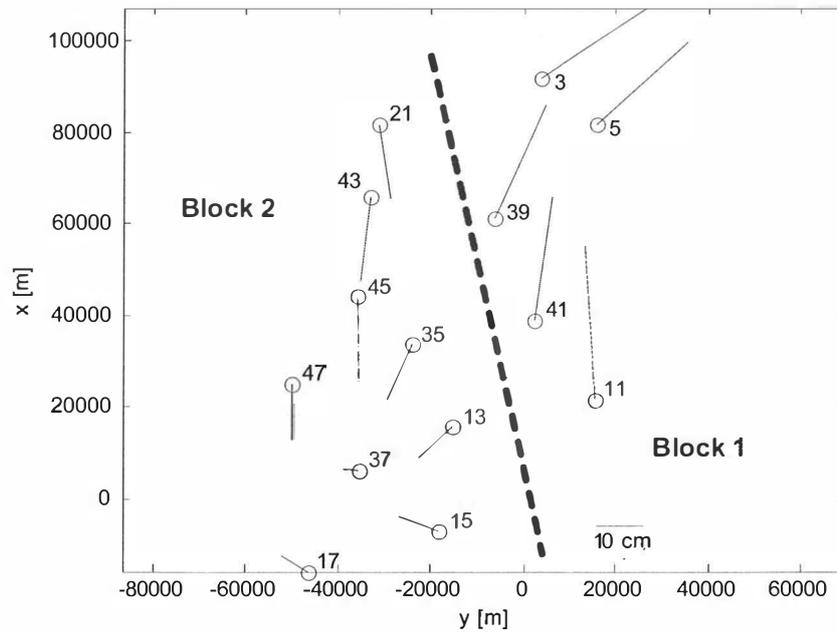


Abbildung 3: Übersicht über die Verschiebungsvektoren zwischen den beiden Messepochen. Die beiden detektierten Blöcke werden durch eine strichlierte Linie getrennt, die der Verwerfungszone entspricht.

Block 1				Block 2			
Startblock	Neue Punkte	Wert FS2	Abbruch	Startblock	Neue Punkte	Wert FS2	Abbruch
3,5,11,39		0.79		13,35,43,45		0.72	
	41	0.68	0.25		47	0.62	0.25
	15	0.35	0.74		21	0.65	0.25
					15	0.43	0.39
					17	0.41	0.25
					37	0.40	0.25

Tabelle 1: Ablauf der Auswertung für das Testnetz Delft. Dabei bezeichnet die Spalte „Wert FS2“ die Güte des Blockes, sobald der neue Punkt hinzugenommen wird (berechnet im zweiten Fuzzy System). Die Spalte „Abbruch“ enthält den Ergebniswert des letzten Fuzzy Systems; der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1. Je größer der Wert ist, desto eher sollte ein Abbruch erfolgen.

Die Bewegung des ersten Startblocks, bestehend aus den Punkten 3, 5, 11, 39, kann durch einen Rotationsparameter beschrieben werden. Das Bewegungsmuster von Punkt 41 passt ebenfalls gut zu diesem Block (Wert des Fuzzy Systems 2: 0.68 in Tabelle 1). Für den menschlichen Betrachter scheint es klar, dass daraufhin der Block als abgeschlossen gelten muss. Punkt 15 ist zwar der optimale Punkt im nächsten Iterationsschritt, die Bewertung der Konsistenz des Bewegungsmusters inklusive Punkt 15 ergibt aber nur mehr einen Wert von 0.35. Der Abbruch bei Hinzunahme von Punkt 15 ist durch den hohen Output-Indikatorwert von Fuzzy System 4 (0.74 in Tabelle 1) mehr als gerechtfertigt.

Block 2 wird zunächst ebenfalls in Übereinstimmung mit dem menschlichen Denken aus den Punkten 13, 35, 43, 45 gebildet. Nach Hinzunahme von 47 und 21 sollte eventuell auch hier der Abbruch durch Überprüfen von Punkt 15 erfolgen. Allerdings ist der Wert von Fuzzy System 4 (0.39) nicht so hoch wie bei Block 1, der Abbruch ist also laut dem System nicht gerechtfertigt, und die letzten Punkte 15, 17 und 37 werden in Übereinstimmung mit der Simulation in Block 2 aufgenommen (siehe Tabelle 1).

Es muss allerdings angemerkt werden, dass kleine Modifikationen (Änderungen der Zugehörigkeitsfunktionen sowie der Gewichtung der Regeln) die Systeme sensibler reagieren lassen, sodass z.B. auch die letzten drei Punkte (15, 17, 37) als eigener Block erkannt werden.

Literatur

- BANDEMER H., GOTTWALD S. (1993): *Einführung in Fuzzy-Methoden*. 4. Auflage, Akademie Verlag, Berlin.
- BREZING A. (2000): *Entwicklung eines Expertensystems zur wissensbasierten Deformationsanalyse*. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 59.
- HEINE K. (1999): *Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra- und Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 516, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- HABERLER M. (2005): *Einsatz von Fuzzy Methoden zur Detektion konsistenter Punktbewegungen*. Dissertation, Geowissenschaftliche Mitteilungen Nr. 73, Technische Universität Wien, in Druck.
- LEHMKÜHLER H. (1993): *Die geodätische Deformationsanalyse als Mustererkennungsaufgabe*. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 49.
- PANDA (2000): Programm zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur Deformationsanalyse. Geotec GmbH, Laatzen.
- WELSCH W. (Hrsg.) (1983): *Deformationsanalysen '83*. Schriftenreihe Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr München, Heft Nr. 9.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Michaela Haberler
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 27-29
A-1040 Wien

Ermittlung des Beitrags des wirksamen Refraktionskoeffizienten durch simultane Videotheodolit-Messungen

Ismail Kabashi
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

1 Einleitung

Die atmosphärische Strahlenbrechung beeinflusst die trigonometrische Höhenmessung im allgemeinen weitaus stärker als andere geodätische Messverfahren. Die Größe der Refraktion wird in der geodätischen Praxis durch den Refraktionskoeffizienten ausgedrückt. Der für die Berechnung trigonometrischer Höhenunterschiede sehr wichtige wirksame Refraktionskoeffizient k ist eine veränderliche Größe, welche von vielen Einflussfaktoren abhängt. Wesentliche Einflüsse ergeben sich durch die Temperaturänderung während des Beobachtungsintervalls, den Höhenunterschied, die Höhe des Stand- und Zielpunktes, Beleuchtungsgrad, die Topographie des Untergrundes, den Wind etc. Lokale Refraktionskoeffizienten werden u.a. benötigt, um geodätische Messergebnisse, die durch atmosphärische Einflüsse verfälscht sind, zu korrigieren.

In diesem Beitrag werden die Besonderheiten der Bestimmung des Refraktionskoeffizienten anhand der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessung bei der trigonometrischen Höhenmessung über Wasserflächen gezeigt, die bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen untersucht werden. Es muss dazu gesagt werden, dass es aus zeitlichen Gründen nicht möglich war, alle gewünschten und notwendigen Beobachtungsserien durchzuführen. Es wäre sinnvoll gewesen, weitergehende und intensivere Beobachtungsserien über das gesamte Jahr bei unterschiedlichen Wetterbedingungen durchzuführen. Es können jedoch bereits aus den vorliegenden Beobachtungsserien wertvolle und interessante Erkenntnisse hinsichtlich des Verhaltens des Refraktionskoeffizienten gewonnen werden.

2 Lokaler und wirksamer Refraktionskoeffizient

Die Refraktionsbestimmung setzt ein Maß für die Refraktion voraus. Als ein auch heute noch gut geeignetes Kriterium für die Größe der Refraktion kann der Refraktionskoeffizient k gelten. Geodäten wie Helmert und Jordan haben analog zu den Begriffen „lokale“ und „wirksame“ Refraktion zwischen den lokalen und wirksamen Refraktionskoeffizienten unterschieden. Jordan bezeichnete den lokalen Refraktionskoeffizienten mit χ im Unterschied zum wirksamen Refraktionskoeffizienten k (vgl. *Bahnert, 1970*).

Der **lokale Refraktionskoeffizient** (werden aus meteorologischen Daten berechnet) gilt lediglich für die Brechung zwischen zwei unterschiedlichen Medien und ist experimentell bestimmbar. Geometrisch gesehen gibt er an, welchem Radius der Wellenbahn die herrschenden atmosphärischen Bedingungen entsprechen und vermittelt somit die klassische Definition für den Refraktionskoeffizienten als Quotienten aus Erdradius R und Lichtstrahl ρ .

$$\chi = \frac{R}{\rho} \quad (2.1)$$

Der lokale Refraktionskoeffizient gibt die relative Strahlenkrümmung an einem Punkt der Wellenbahn an und hat z. B. in der Grundlagenforschung eine Bedeutung. Seine Bestimmung in einem bestimmten Punkt oder auch in mehreren benachbarten Punkten kann Auskunft über die zeitliche und örtliche Veränderlichkeit des bodennahen meteorologischen Feldes geben.

Den **wirksamen Refraktionskoeffizienten** k braucht man u.a., um Korrekturen an refraktionsverfälschten Messwerten zu berechnen und die Messwerte zu korrigieren. Er lässt sich aus geodätischen Messungen ableiten (s. Abschnitt 2.1). Der wirksame Refraktionskoeffizient, der für den gesamten Lichtweg gilt und einem Integral der lokalen Koeffizienten entlang der Visur entspricht, darf nicht mit dem lokalen verwechselt werden.

2.1 Wirksamer Refraktionskoeffizient k aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessungen

Zur Bestimmung des wirksamen Refraktionskoeffizienten k wurden viele Formeln und Theorien entwickelt (siehe z. B. *Helmert, 1884; Jordan, 1889; Past, 1965; Bahnert, 1986; Kahmen, 1997*). Wirksame Refraktionskoeffizienten lassen sich auf verschiedene Weise mit geodätischen Methoden gut bestimmen. Typisch geodätische Verfahren sind (*Bahnert, 1986*):

- Gleichzeitig-gegenseitige Messung von Zenitwinkeln,
- Vergleich trigonometrischer Höhenunterschiede mit geometrisch nivellierten Soll-Werten¹.

Der Refraktionskoeffizient aus Gegenvisuren lässt sich nach *Kahmen (1997)* berechnen²:

$$k = 1 - \frac{\xi_1 + \xi_2 - 200 \text{ gon}}{200/\pi} \cdot \frac{R}{S^H} \quad (2.2)$$

mit ξ_1, ξ_2 =Zenitwinkel, R = Erdradius und S^R = Schrägestrecke.

Die Gleichung (2.2) basiert auf Modellen, die homogene atmosphärische Verhältnisse auf der Messstrecke voraussetzen. Dazu muss die Bedingung erfüllt sein, dass ein gleichmäßig ausgebildetes Geländeprofil und identische atmosphärische Bedingungen im Bereich der Messstrecke vorliegen. Um dieser Bedingung zu genügen, ist bei den Messungen darauf zu achten, dass der Untergrund zwischen Stand- und Zielpunkt homogen ist (*Kahmen, 1997*).

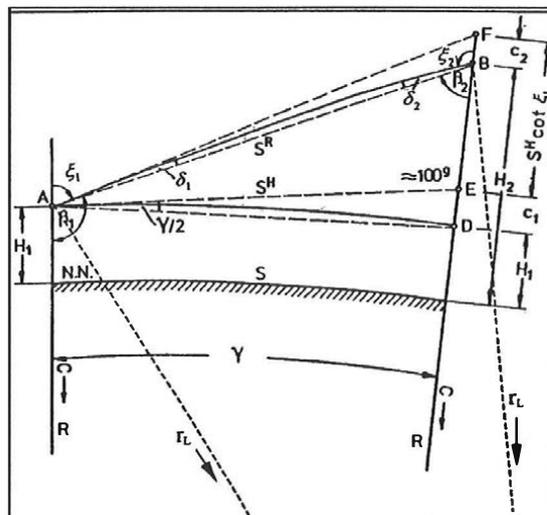


Abb. 1: Refraktionsbestimmung durch gegenseitige Zenitwinkelmessung (*Kahmen, 1997*)

Streng genommen gilt Gl. (2.2) nur dann, wenn beide Zenitwinkel simultan gemessen werden und unter Voraussetzung einer kreisförmigen Lichtbahn und der räumlichen Konstanz des

¹ Die zweite Methode wird an dieser Stelle nicht behandelt.

² Auf eine ausführliche Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur verwiesen (*Kahmen, 1997*).

Refraktionskoeffizienten. Beides ist in Wirklichkeit nur in Ausnahmefällen kurzzeitig zutreffend, wobei in der bodennahen Luftschicht (der labilen Unterschicht der Atmosphäre) diese Bedingungen praktisch kaum existieren. Dann erhält man einen Refraktionskoeffizienten, der den mittleren atmosphärischen Verhältnissen längs der Messstrecke während der Dauer der Winkelmessung entspricht. Die Ableitung von Refraktionskoeffizienten aus geodätischen Messungen hat gegenüber der Berechnung aus meteorologischen Daten den Vorteil, dass sie einen für die ganze Visur charakteristischen Wert ergibt (*Bahnert, 1970*).

3 Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen

Hierzu werden Messreihen der Untersuchung der gleichzeitig-gegenseitigen Winkelmessung mittels Videotheodoliten (TM3000V und TM3000VD) bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und Jahreszeiten verwendet. Die Messungen wurden bei der Donaubrücke bei Tulln am 18./19.06.02, 11./12.09.02 und 10.10.02 durchgeführt. Während der Messungen gelten die folgenden Randbedingungen bzw. Annahmen:

- Der Lichtstrahl verläuft über der Wasserfläche in bodennahen Luftschichten,
- der Höhenunterschied beträgt ca. 0.02 m bei einer Distanz von ca. 400 m,
- der Instrumentenhorizont befindet sich etwa 5 m über der Wasserfläche,
- die Standpunkte sollten gleiche atmosphärische Verhältnisse haben (vor allem bezüglich der Temperatur)

Es gilt die Voraussetzung:

- dass die Standpunkte auf beiden Seiten der Beobachtungsstrecke mit gleicher Refraktion behaftet sind,
- dass die Luftschichten parallel zueinander sind und
- dass die Luftschichten isothermisch und parallel zur Wasserfläche sind.

Die Instrumentenstandpunkte haben immer dieselben Höhen über der Wasserfläche, damit keine zusätzlichen Refraktionsstörungen durch unterschiedliche Höhen entstehen. Als Standpunkte wurden die Messpfeiler genutzt, die für den Bau sowie die Überwachungsmessungen der Donaubrücke eingerichtet worden sind. Das Untersuchungsgebiet zeigte einen homogenen Untergrund und es handelte sich um ein weitestgehend symmetrisches Profil auf beiden Seiten des Donaufers (*Kabashi, 2004*). Während der Messungen (Zenitwinkel) wurden synchron in gleicher Höhe über dem Boden die Lufttemperatur, die Feuchte und der Luftdruck digital gemessen. Der Grad der Himmelbedeckung³ wurde geschätzt. Damit sollte die zeitliche Änderung der meteorologischen Verhältnisse erfasst und ihr Einfluss auf das Messergebnis (Refraktionskoeffizienten) untersucht werden.

3.1 Wirksamer Refraktionskoeffizient vom 18./19.06.2002 (Nachmittag/Nacht)

Der Refraktionskoeffizient wurde direkt aus den geodätischen Messungen der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkel (s. Abschnitt 2.1) zwischen den beiden Pfeilern ermittelt. Sowohl die Messung der Zenitwinkel als auch die Berechnung der Refraktionskoeffizienten erfolgte mit einer Frequenz von 1 Hz. Im Anschluss werden die Werte der Refraktionskoeffizienten sowie die Lufttemperatur während der Messungen für jede Messserie graphisch gezeigt.

³ Bewölkungsgrad in Prozent der Himmelbedeckung.

Wetterbedingungen

Während des Beobachtungszeitraums war der Himmel am Tag und in der Nacht wolkenlos und es war windstill. Zu Beginn der Beobachtung um 15:00 h lag die Lufttemperatur bei 32°C und stieg bei starker Sonneneinstrahlung bis zu 33,2°C um 17:00 h an (vgl. Abb. 3). In der Zeit von 18:00 Uhr bis 05:00 h morgens (vgl. Abb. 5) sank die Lufttemperatur langsam auf bis zu 20,6°C ab. Die Wassertemperatur betrug 21°C. Der Beobachtungstag war heiß und trocken, so dass ein starker Refraktionseinfluss vorhanden war (Kabashi, 2004).

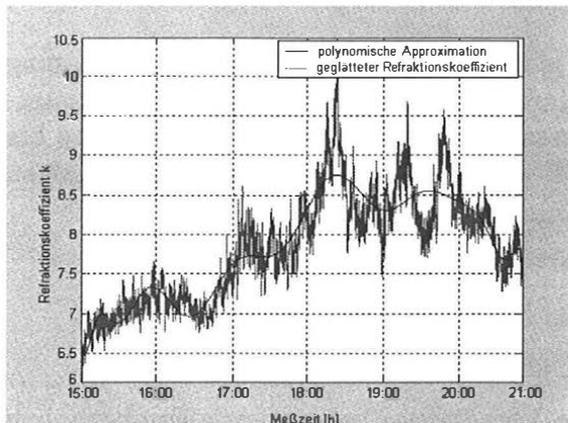


Abb. 2: Gang der Refraktionskoeffizienten

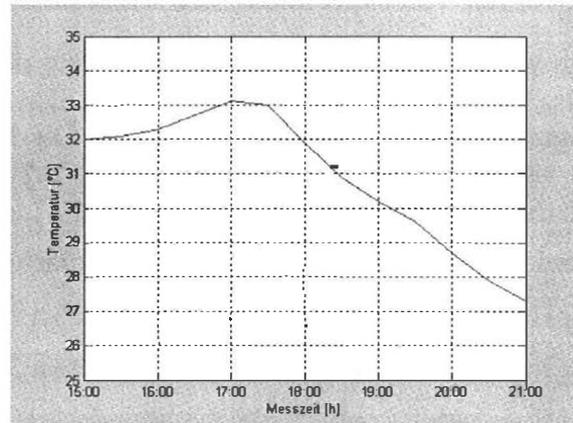


Abb. 3: Gemessene Lufttemperaturen

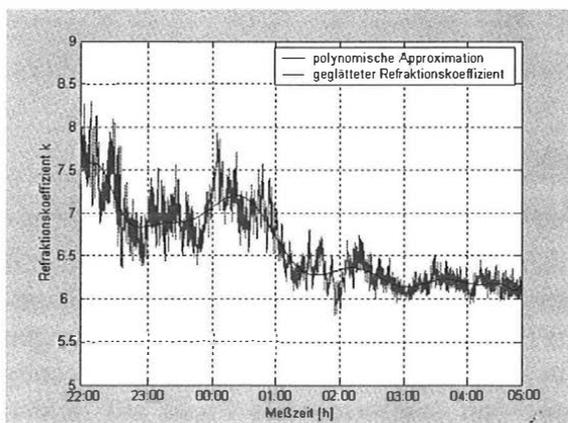


Abb. 4: Gang der Refraktionskoeffizienten

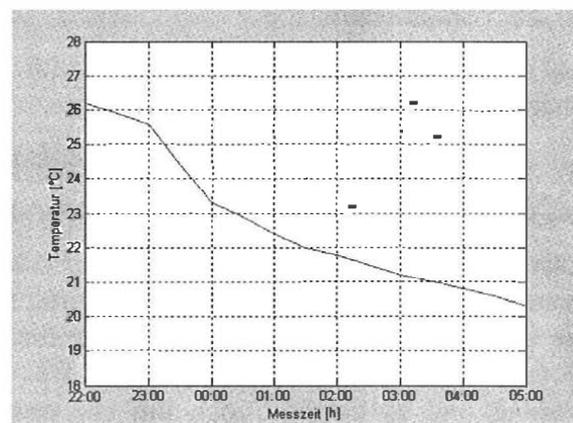


Abb. 5: Gemessene Lufttemperaturen

Abb. 2 zeigt den Verlauf der Refraktionskoeffizienten für die Nachmittagsstunden des 18.06.2002. Aus der Abb. 2 ist zu entnehmen, dass die Refraktionskoeffizienten einen turbulenten Verlauf mit größerer Amplitudenveränderung haben. In Abb. 4 sind die Werte der Refraktionskoeffizienten in der Nacht dargestellt. In den ersten Nachtstunden weisen die Refraktionskoeffizienten einen turbulenten Verlauf mit kleiner Amplitudenveränderung auf. Es ist eine gute Übereinstimmung des Verlaufs von Refraktionskoeffizienten mit der Lufttemperatur zu verzeichnen.

3.2 Wirksamer Refraktionskoeffizient vom 11./12.09.2002

Wetterbedingungen

Die Wetterlage war durch rasche Variationen der Tagestemperatur charakterisiert. Es ist anzumerken, dass am Anfang der Messserie dichte und dunkle Wolken den Himmel bedeckten

(Bewölkungsgrad 100%), die sich dann jedoch um etwa 03:00 h in der Früh langsam auflösten. Der Tag war wolkenlos mit starker Sonneneinstrahlung. Am Anfang der Messserie bis 22:30 h Uhr wehte ein leichter Wind. In der Nacht war es windstill. Am nächsten Tag ab ca. 8:40 h beginnt der Wind wieder ununterbrochen zu wehen (mit einer Geschwindigkeit bis zu 2.5 m/s). Der Verlauf der Lufttemperatur ist in Abb. 7 dargestellt. Zu Beginn der Messserie sank sie von 15°C bis 9°C ab. Von 07:20 h bis 11:40 h steigt sie von 9°C auf 24.5°C. Dann fällt sie sehr rasch ab, so dass sie um 13:00 h nur mehr 17°C beträgt. Im weiteren Verlauf fällt sie wieder ab (bis 20:30 h) und beträgt dann ca. 10°C. Die während der Beobachtungen gemessenen Lufttemperaturen schwankten zwischen + 9° und + 24.5°C.

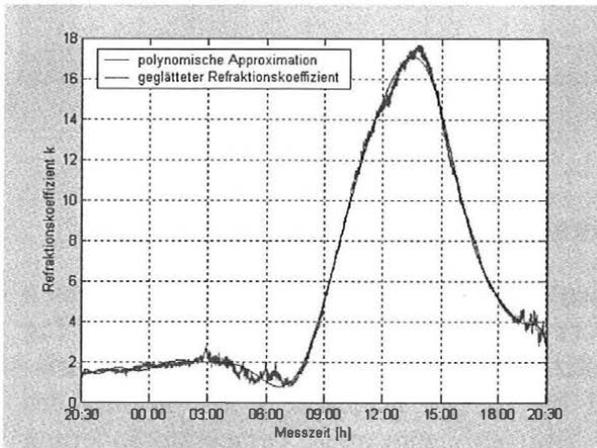


Abb. 6: Gang der Refraktionskoeffizienten

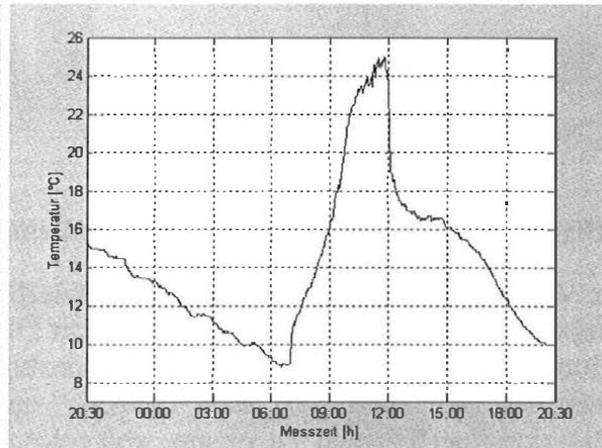


Abb. 7: Gemessene Lufttemperatur

Wie in Abb. 6 ersichtlich ist, zeigt der Verlauf den so erwarteten charakteristischen Tagesgang der Refraktionskoeffizienten, nämlich dass sie in der Nacht kleiner sind als (bei wärmeren Bedingungen) am Tag. Die Amplitude der Refraktionskoeffizienten beträgt am Tag ca. 15 und ist hochkorreliert mit der raschen Variation der Tagestemperatur

3.3 Wirksamer Refraktionskoeffizient vom 10.10.2002

Wetterbedingungen

Im wesentlichen waren am 10.10.2002 gleichmäßige und günstige Bedingungen gegeben. Im Messgebiet wurden geringe Änderungen der Lufttemperatur zwischen 8.3°C und 9.5°C festgestellt (Abb. 9). Ein ununterbrochen wehender leichter Wind bis zu 2.5 m/s ließ ein einheitliches und geprägtes Refraktionsfeld erwarten. An diesem Tag war der Himmel über die gesamte Beobachtungszeit vollständig bedeckt, d.h. die Beobachtungsstrecke war daher diffus beleuchtet. Da der Beobachtungstag aufgrund des Nebels keine intensive Sonneneinstrahlung zuließ, waren nur kleine Temperaturschwankungen zu erwarten.

Im Vergleich zu den vorherigen Messserien zeigt der ermittelte Refraktionskoeffizient (Abb. 8) den besten und den glattesten Verlauf. Der Einfluss der Bewölkung auf die Refraktion bzw. die Refraktionskoeffizienten über der Wasserfläche geht aus Abb. 8 hervor. Im Gegensatz zu den Werten an völlig klaren Juni- und Septembertagen weist diese ein geringes Refraktionsniveau bei kleinen Variationen auf.

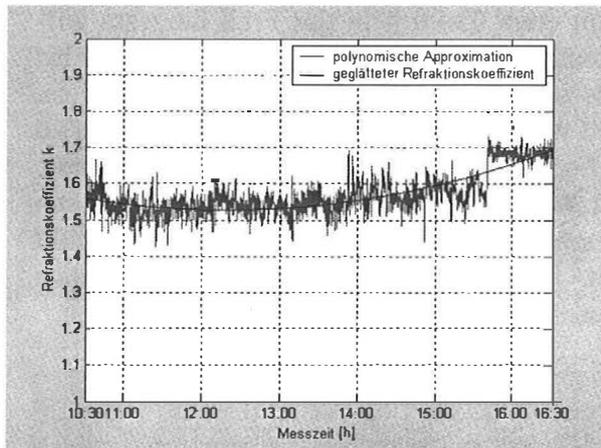


Abb. 8: Gang der Refraktionskoeffizienten

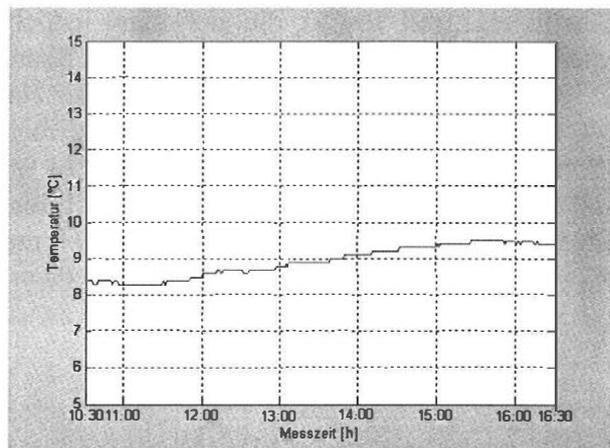


Abb. 9: Gemessene Lufttemperaturen

4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussbemerkungen

Der Verlauf aller bestimmten Refraktionskoeffizienten gleicht dem Verlauf der gemessenen Temperatur, d.h. sie sind während der Nacht kleiner als bei Tag. Für einen wolkenlosen Tag (Mitte September) schwankt der Refraktionskoeffizient am Tag wegen der raschen Variationen der Temperatur sehr stark (Abb. 6: von 1 bis zu 18). Dagegen ist der Verlauf des Refraktionskoeffizienten an einem wolkenlosen Tag und langsamen Temperaturänderung ruhiger (Abb. 8). Bei Messungen in der Nacht schwankt der Refraktionskoeffizient aufgrund der geringen Temperaturänderungen wenig (Abb. 6). Die großen Schwankungen der Refraktionskoeffizienten um Werte bis 18 (Messreihe am 11./12.09.2002) sind ein Zeichen dafür, dass die Wasseroberfläche und rasche Temperaturänderungen einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf des Zielstrahles ausübt. Die durch den Unterschied der Luft- und Wassertemperatur hervorgerufene Veränderung der Refraktion beruht auf der Änderung des Temperaturgradienten der Luft. Gleichzeitig bekommt man dadurch einen Einblick, wie stark der Zielstrahl im untersten Teil der bodennahen Störungsschicht gebrochen wird.

Die mittleren Refraktionskoeffizienten bei Sonnenschein und starken Temperaturänderungen sind größer als bei Sonnenschein und langsamen Temperaturänderungen. Bei dichter Bewölkung oder vollkommen bedecktem Himmel wird der kleinste Wert k erreicht und weist auch gleichzeitig das stabilste Verhalten auf (nur geringe Amplitudenänderung s.a. Abb. 8, vgl. auch *Past, 1965*).

Diese großen Variationen der Refraktionskoeffizienten werden auch bei *Heinert, et al. (2002)* erhalten. Bei Messungen über der Wasserfläche eines ca. 30 m breiten Flussarmes mit Zielweiten von 30-100 m kommt er auf Refraktionskoeffizienten zwischen -4 und $+5$. Als Begründung gibt er die mögliche Inversion der Luftschichten (insbesondere in den frühen Morgenstunden) an.

An bedeckten Tagen ist der Verlauf von k so geglättet, wie man dies auf Grund eines Bewölkungsgrades von 100% erwartet. Eine Aufhellung des Himmels gegen 15:30 h drückt sich sofort in einer Änderung des k -Wertes aus. Im Oktober zeigt der ermittelte Refraktionskoeffizient einen homogenen Wert (Abb. 8). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass diese Messungen bei voll bedecktem Himmel und bei einem gleichmäßigen Temperaturverlauf durchgeführt worden sind.

Aus den Abb. 4, 6 und 8 ist ersichtlich, dass die Temperaturänderung bzw. der Temperaturgradient den Haupteinfluss auf der Änderung des Refraktionskoeffizienten ausübt. Auffallend ist, dass kleinere Temperaturänderungen und Beobachtungen in der Nacht (homogene Refraktionsbedingungen) einen wesentlich kleineren Refraktionskoeffizienten ergeben. Größere Temperaturänderungen (beim Auftreten starker Luftturbulenzen entlang des Zielstrahls) ergeben größere Refraktionskoeffizienten. D.h. die Werte des Refraktionskoeffizienten sind abhängig von Temperaturänderung und Tageszeit.

Der Wert des Refraktionskoeffizienten ist extrem groß im Vergleich mit dem „standardisierten“ Wert und wies bei jeder Beobachtungsserie einen positiven Wert auf. In diesem Fall bedeutet das, dass die Zielstrahlen im gleichen Sinn wie die Erdoberfläche gekrümmt sind. Negative Refraktionskoeffizienten bedeuten dann, dass die Zielstrahlen nach unten durchgebogen sind, d.h. sie sind in umgekehrtem Sinn wie die Erdoberfläche gekrümmt.

Aus den Beobachtungsserien und ermittelten Werten des Refraktionskoeffizienten können keine für bestimmte Tageszeiten repräsentative Werte abgeleitet werden, da die Werte sehr unterschiedlich sind und sowohl am Tag als auch in der Nacht stark variieren (vgl. Abb. 4, 6 und 8). Es kann aber die Aussage getroffen werden, dass bei Beobachtungen in der Nacht und bei bewölktem Tag die kleinsten und stabilsten Werte des Refraktionskoeffizienten erhalten werden.

Es ist weiterhin zu bedenken, dass die drei erwähnten Messreihen niemals Erkenntnisse liefern können, welche das ganze Jahr über Gültigkeit haben. Daher ist es erforderlich, weitere Messungen über das gesamte Jahr bei möglichst vielen unterschiedlichen Wetterbedingungen durchzuführen.

Literatur

- Bahnert, G. (1970): *Möglichkeiten und Grenzen der trigonometrischen Höhenmessung*. Teil 1 und 2. Habilitation. TU Dresden, Arb. Ver.- u. Kt.-Wesen, Leipzig, Bd. 24 und 25.
- Bahnert, G. (1986): *Refraktion und Refraktionskoeffizient*. Vermessungstechnik, 34. Jg. Heft 8 S. 276-279
- Helmert, F.R. (1884): *Die mathematische und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie*. Teil 2, Teubner-Verlag, Leipzig.
- Heinert, M., Reiser, S. (2002): *Continuous building monitoring using adaptive Kalman-Filtering for real-time data screening and pre-processing*. In: Kahmen/Niemeier/Retscher (Hrsg.): *Second Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, May 21-24, 2002, Berlin, Germany, pg. 82-91.
- Jordan/Eggert/Kneissl, (1956): *Handbuch der Vermessungskunde*. Band III Höhenmessung-Tachymetrie, 10 Aufl. Stuttgart 1956.
- Jordan (1889): *Die Grundformeln der terrestrischen Refraktion*. ZfV Heft 14, S. 177-183.
- Kabashi, I. (2004): *Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen*. Dissertation, Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik der TU Wien, Heft Nr. 67.
- Kahmen, H. (1997): *Vermessungskunde*. 19. A. Walter de Gruyter, Berlin- New York 1997.
- Past, F. (1965): *Kritischer Vergleich der Refraktionsformeln für trigonometrische Höhenmessung und Versuch einer systematischen Ordnung*. DGK, Reihe C, Heft Nr. 75. München.

Modellanpassung mit modifizierten Kalman-Filtern bei Deformationsanalysen

Sinisa Mastelic Ivic
Faculty of Geodesy
University of Zagreb

Kurzfassung:

Die Deformationen haben in der Regel ein vielfältiges Erscheinungsbild, welches schnellen Veränderungen unterliegt. Häufig werden langfristige Vorgänge wie z.B. kontinuierliche Setzungen oder Rutschungen, die näherungsweise einer logarithmischen Funktion folgen, von periodischen Einflüssen überlagert. Diese Signale können sehr hochfrequent sein - z.B. bei Windeinfluss - aber auch eine Periodendauer von einem Jahr haben. Bei besonderen Anlässen treten außerdem gelegentlich Sprünge in den Deformationssignalen auf. Eine Trennung all dieser unterschiedlichen Komponenten ist oft wünschenswert, verlangt jedoch besondere Modellansätze. Ziel dieser Arbeit ist, Modellverfeinerungen für eine Analyse der zuvor beschriebenen Ereignisse auf der Basis des Kalman-Filters zu erarbeiten.

1 Die Fragestellungen bei der Deformationsanalyse

Sollen Deformationen untersucht werden, so benötigt man Informationen über die zu erwartende Bewegungsart, über die auf das Objekt einwirkenden Kräfte, die meteorologischen Bedingungen und vieles mehr. Nur mit Hilfe solcher Informationen kann man ein Messverfahren entwickeln, das die erwarteten Bewegungen erfasst. Die Wahl der Zeitpunkte, an denen die Messungen durchgeführt werden, ist von besonderer Bedeutung für die richtige Erfassung des Deformationsprozesses. Man muss die zeitliche Entwicklung aller wichtigen Belastungen kennen, damit die Messverfahren optimal an den Deformationsprozess angepasst werden können.

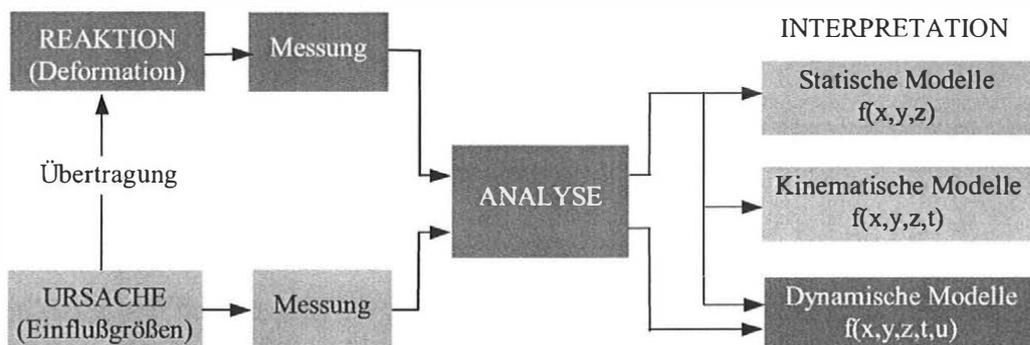


Abb.1. Interpretationsmodelle der Deformation

Beim kinematischen Deformationsmodell wird der Koordinatenvektor der Objektpunkte als Funktion der Zeit aufgefasst. Die kinematische Modellfunktion ist im Prinzip frei zu wählen. Sie muss aber in der Lage sein, die Bewegungen des zu untersuchenden Objekts zu beschreiben. Mit den kinematischen Modellen für eindimensionale Netze beschäftigen sich Pelzer 81... Für zweidimensionale oder dreidimensionale Netze sind kinematische Modelle bei Papo

& Peremuter 85, Pelzer 88... zu finden. Solche Modelle kann man in folgender Form darstellen:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t_i} + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_{t_i} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{x}}_{t_i}, \quad (1)$$

dabei sind

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t & \dots \text{Koordinatenvektor zum Zeitpunkt } t, \\ \mathbf{x}_{t_i} & \dots \text{Koordinatenvektor zu einem Bezugspunkt } t_i, \\ \dot{\mathbf{x}}_{t_i} & = \left(\frac{d\mathbf{x}}{dt} \right)_{t_i} \dots \text{Geschwindigkeitsvektor,} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{t_i} = \left(\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} \right)_{t_i} \dots \text{Beschleunigungsvektor.} \quad (3)$$

Die Vektoren \mathbf{x}_{t_i} , $\dot{\mathbf{x}}_{t_i}$, $\ddot{\mathbf{x}}_{t_i}$ beschreiben den aktuellen Zustand des kinematischen Modells. Es ist sinnvoll, sie zu einem Zustandsvektor zusammenzufassen:

$$\mathbf{y}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_t \\ \dot{\mathbf{x}}_t \\ \ddot{\mathbf{x}}_t \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Bezieht man nun noch in die zeitliche Betrachtung der geometrischen Veränderungen die verursachenden Einflussgrößen ein (Abb.1), so trägt das resultierende Interpretationsmodell dynamischen Charakter.

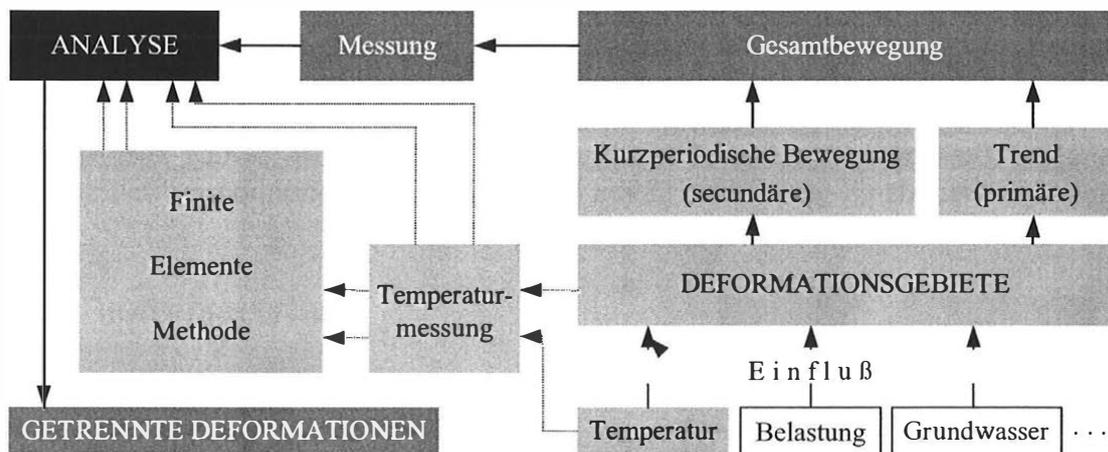


Abb.2. Zustandsschätzung im dynamischen Modell

Die entscheidende Aufgabe bei dieser Wissensrichtung ist die Suche nach den Ursachen der Deformation und deren Verknüpfung mit einem, der Kausalität entsprechenden sogenannten dynamischen Deformationsmodell. Schon mit Beginn der Siebzigerjahre, nach der Entwicklung moderner, rechnergestützter Verfahren, gibt es Versuche, ein optimales Modell aufzubauen (Pelzer 81, Heunecke 95....).

Ein weiter verfeinertes Modell lässt sich mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (Abb. 2) entwickeln. Sie führt ein größeres Problem auf einfache Teilprobleme mit fertigen Lösungen zurück. Ein Objekt wird in dem Modell aus stabförmigen, dreieckigen oder rechteckigen Bauteilen angenähert, denen vereinfachende Annahmen bezüglich ihres elastischen Verhaltens zugrundegelegt werden. Die Verbindungspunkte der Elemente heißen Knoten. Aus den

Knotenbewegungen ergeben sich unter vereinfachenden Annahmen die Verformungen der Elemente und ihre inneren Kräfte. Wegen der Gleichgewichtsbedingung in den Knoten müssen diese inneren Kräfte alle anderen äußeren Kräfte ausgleichen. Ein Bauwerk, welches Deformationen aufgrund innerer und äußerer Kräfte unterliegt, lässt sich auch als dynamisches System mit folgender Vektor-Matrix Differential Gleichung erster Ordnung beschreiben:

$$\dot{\mathbf{y}}_t = \mathbf{F}_t \mathbf{y}_t + \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{D}_t \mathbf{w}_t, \quad (5)$$

wobei \mathbf{y}_t den Zustandsvektors beschreibt. \mathbf{w}_t ist eine stochastische äußere Einflussgröße und \mathbf{u}_t ein deterministischer Stellvektor. Die Matrizen sind : \mathbf{F}_t eine System- oder Dynamikmatrix, \mathbf{D}_t eine Störeingangsmatrix und \mathbf{B}_t eine Steuereingangsmatrix.

2 Das diskrete Kalman-Filter

Eine Kombination der Gleichungen, welche sich aus den Lösungen des Modells (5) ergeben, mit den Beobachtungsgleichungen führt schließlich zu dem Kalman-Filter wegen seiner rekursiven Berechnungsweise unter dem Kriterium der Minimierung der Fehlervarianz für die optimale Schätzung des aktuellen Zustandes als Integrationsalgorithmus. In der Geodäsie ist das Kalman-Filter bereits häufig für die Beschreibung von unterschiedlichen Vorgängen verwendet worden: z.B. Kahmen 85, 87, Pelzer 88.

Da in der Regel nichts über die Störeingangsmatrix \mathbf{B}_t und deterministische Stellgrößen \mathbf{u}_t bekannt ist, werden sie häufig Null gesetzt. Solche Ansätze werden freie oder homogene Systeme genannt (Unterberg 91). Für ein gleichmäßig beschleunigtes System ergibt sich dann folgende Vektordifferentialgleichung in kontinuierlicher Zeit

$$\dot{\mathbf{y}}_t = \mathbf{F}_t \mathbf{y}_t + \mathbf{D}_t \mathbf{w}_t \quad (6)$$

Soll das System zu diskreten Zeitpunkten t_i beschrieben werden, muss die Differentialgleichung in eine Differenzgleichung übergeführt werden.

Eine Lösung von (6) lautet in Bezug auf $\mathbf{y}(t_i)$:

$$\mathbf{y}(t_i) = \mathbf{T}(t_i, t_{i-1}) \mathbf{y}(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \mathbf{T}(t_i, \tau) \mathbf{w}(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Mit Hilfe der *Transitionsmatrix* \mathbf{T} lässt sich nun aufgrund des bekannten Zustandsvektors \mathbf{y}_t der Zustandsvektor jedes Punktes zur Zeit t_{i+1} prädizieren.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t,t-1} \\ \dot{\mathbf{x}}_{t,t-1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{t,t-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \Delta t \mathbf{I} & \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \Delta t \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t-1} \\ \dot{\mathbf{x}}_{t-1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{x,t-1} \\ \mathbf{w}_{\dot{x},t-1} \\ \mathbf{w}_{\ddot{x},t-1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Die Unsicherheit des Zustandsvektors \mathbf{y}_{t-1} ist mit der Kovarianzmatrix $\Sigma_{yy,t-1}$ zu beschreiben. Mit der Transitionsmatrix \mathbf{T} ist die prädizierte Kovarianzmatrix $\Sigma_{yy,t}$ für einen beliebigen Zeitpunkt im voraus berechenbar:

$$\Sigma_{yy,t} = \mathbf{T} \Sigma_{yy,t-1} \mathbf{T}^T + \Sigma_{ww,t}. \quad (9)$$

Den Zugang zum System erhält man über die linearisierte Beobachtungsgleichung in diskreter Zeit:

$$\mathbf{l}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{y}_t + \varepsilon_t \quad ; \quad \mathbf{A} = [\mathbf{A}_x \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] \quad (10)$$

\mathbf{A}_t - Designmatrix

\mathbf{l}_t - verkürzter Beobachtungsvektor

ε_t - zufällige Messabweichungen, Messrauschen

Mit den Hilfsmatrizen

$$\Sigma_{dd,t} = \Sigma_{ll,t} + \mathbf{A} \Sigma_{yy,t} \mathbf{A}^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{K} = \Sigma_{yy,t} \mathbf{A}^T \Sigma_{dd,t}^{-1}, \quad (12)$$

ergibt sich der endgültige Zustandsvektor \mathbf{t}

$$\mathbf{y}_{it} = \mathbf{y}_{i,t-1} + \mathbf{K}(\mathbf{l}_t - \mathbf{A} \mathbf{y}_{i,t-1}) = \mathbf{y}_{i,t-1} + \mathbf{K} \mathbf{d}_t, \quad (13)$$

und seine Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{yy,t} = \Sigma_{yy,t-1} - \mathbf{K} \Sigma_{dd,t} \mathbf{K}^T. \quad (14)$$

Der Filteralgorithmus lässt sich in zwei Blöcke teilen. Der erste enthält die Schätz- oder Filtergleichungen (13) und ist damit als funktionales Modell zu bezeichnen. Der zweite Block, das stochastische Modell (14), stellt eine Rekursionsvorschrift für den Fehlerhaushalt dar, er schließt die Bestimmungsgleichung für die Verstärkungsmatrix \mathbf{K} mit ein.

3 Formfilter für die Analyse von Deformationsprozessen

Das Kalman-Filter soll bei Vorhandensein eines Trends und kurzperiodischer Störungen beide Anteile erfassen. Einerseits sollen langperiodische Deformationen in der Zustandsschätzung aufdatiert und andererseits temperaturinduzierte Anteile bereits in den Filtereingangsgrößen abgetrennt werden können (Abb.3).

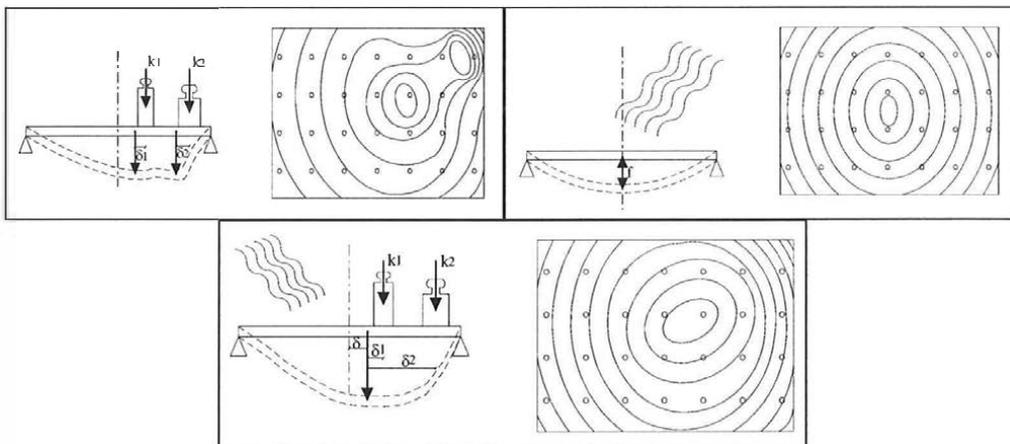


Abb.3. *Periodischer Temperatureinfluss und durch Belastung verursachte Deformation*

Das Auftreten von Deformationen in einem bestimmten Frequenzbereich lässt auf das Vorhandensein eines bandbegrenzten stochastischen Prozesses schließen, dessen Autokova-

rianzfunktion sich durch eine Exponential-Cosinus-Funktion approximieren lässt (Taubenheim 69).

Die diskrete, erweiterte Zustandsgleichung von komplexen Bewegungsvorgängen setzt sich aus m periodischen Störungen verschiedener Frequenzen und der Trendbewegung zusammen.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{t+1} \\ \mathbf{y}_{1,t+1}^k \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{m,t+1}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \overline{\mathbf{T}}_{1,\beta_1,\omega}^k & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \overline{\mathbf{T}}_{m,\beta_m,\omega}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_t \\ \mathbf{y}_{1,t}^k \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{m,t}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_t \\ \mathbf{w}_{1,t}^k \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{m,t}^k \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{t+1} \\ \tilde{\mathbf{y}}_{t+1}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_\alpha & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{\beta,\omega}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_t \\ \tilde{\mathbf{y}}_t^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_t \\ \mathbf{w}_t^k \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{y}_{t+1}^e = \mathbf{T}_{\alpha,\beta,\omega}^e \mathbf{y}_t^e + \mathbf{w}_t^e \quad (17)$$

Zur Verdeutlichung diene die Abbildung 4 mit der zusammenfassenden Darstellung der Gleichungshierarchie des erweiterten Kalman-Filters (Formfilter). Nach einer solchen Modellierung in einem Formfilter ist die untere Gleichungszeile für das periodische Störsignal unabhängig von der aktuellen Modellierung der Trendbewegung.

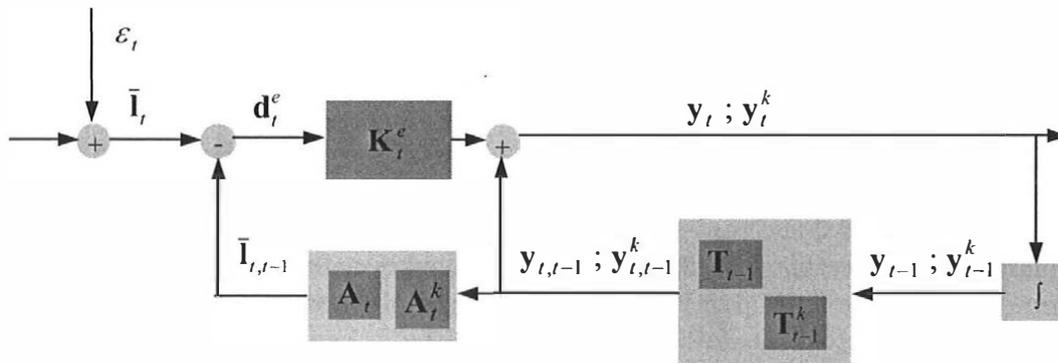


Abb.4. Erweitertes Kalman-Filter (Formfilter)

4 Adaptive Filtermodelle

Bei der Trendbestimmung besteht ein Konflikt zwischen der Verfolgung der wahren Objektbewegung und der Glättungseigenschaft des Filters (Kahmen, Palte 94). Für unbeschleunigte und beschleunigte Bewegungen kombinieren Adaptivfilter Elemente eines Systemmodells für ungestörte Bewegungen mit einem parallel laufenden Systemmodell für die Bewegungsanpassung. Dieses Systemmodell ist in der Lage, mit Hilfe eines Signifikanztestes selbstständig von einem Tiefpass-Filter geringerer Bandbreite auf einen Tiefpass größerer Bandbreite umzuschalten (Abb.5). Hier ist wichtig, dass die Ergebnisse des Beschleunigungsfilters immer die gesamte vergangene Bewegungsinformation beinhalten, so dass auch bei verspäteter Detektion sofort erwartungstreue Zustandsgrößen aufdatiert werden können.

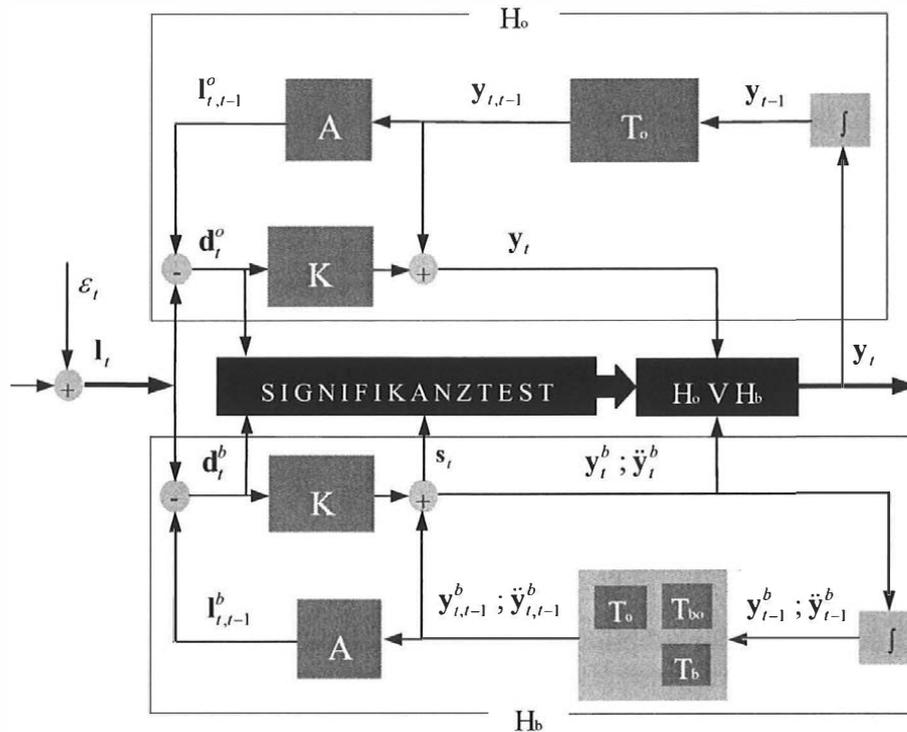


Abb.5. Adaptive Filtermodell mit zwei Parallelfiltern

5 Zusammenfassung

Die periodische Deformationen sind ausreichend gut isoliert mit Hilfe eines Formfilters. Nach einer Modellierung von Signalanteilen unterschiedlicher Frequenzen mit einem Kalman-Filter lassen sich mehrere Deformationsanteile bestimmen. Mit Hilfe des Formfilterkonzeptes wird der informative Anteil des farbigen Rauschens in den funktionalen Ansatz des Kalmanfilters einbezogen. Der Modellteil für den kurzperiodischen (temperaturinduzierten) Deformationsanteil ist von der aktuellen Modellierung der langperiodischen Bewegung (Trend) unabhängig. Bei Kalman-Filter-Modellen ist groß der Zielkonflikt zwischen der Verfolgung von sprunghaften Bewegungsänderungen und den Glättungseigenschaften, was eine optimale Modellierung erschwert. Um ein verbessertes Schätzfehlerverhalten zu erreichen, wobei die gesamte Schätzung nur auf Informationen der hereinkommenden Beobachtungsfolge basiert (self-tuning filter), wird durch mehrere parallele Filter ein zeitvarianter Schätzalgorithmus aufgestellt. Für unbeschleunigte und beschleunigte Bewegung kombiniert ein solcher Adaptivfilter Elemente eines Systemmodells für ungestörte Bewegung und eines (oder mehrerer) parallel laufender Systemmodelle für die Bewegungsanpassung.

Literaturverzeichnis

Heunecke O.(1995): *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung (Hannoversches Filter)*. Wiss. Arb. d. Fachr. Verm. wes. d. Uni. Hannover, Nr.208.

- Kahmen H.(1985): *Grundlage zur Erfassung und Verarbeitung stochastischer und deterministischer Signale.* in: Geodatische Netze in Landes - und Ingenieurvermessung II (Hrsg. H. Pelzer), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985.
- Kahmen H., Palte G. (1993): *Filteransätze für die Prädiktion der Bewegungen von Objektpunkten in Rutschungsgebieten.* in: Festschrift aus Anlaß des 70. Geburtstages von Prof. G. Schelling, Mitteilungen der geodatischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 78, Graz 1993.
- Papo H.B., Perelmuter A.(1984): *Pre-Zero-Epoch Covariance Matrix in sequentiell Analysis of Deformation.* Bull. Geod., Vol. 58, S. 75-83.
- Pelzer H.(1981): *Zur Bestimmung von rezenten Höhenänderungen im Bereich der deutschen Nordseeküste.* ZfV, Heft 3, S. 111-122
- Pelzer H.(1988): *Anwendung der Kalman - Filtertechnik auf die Deformationsanalyse.* in: X Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, 12. - 17. September 1988.
- Taubenheim J.(1969): *Statistische Auswertungen geophysikalischer und meteorologischer Daten.* Akademische Verlagsanstalt, Leipzig, 1969.
- Unterberg U.(1991): *Das Kalman - Filter als Ansatz für die Auswertung weiträumiger kinematischer Höhennetze.* Wiss. Arb. d. Fachr. Verm.wes. d. Uni. Hannover, Nr. 170.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Sinisa Mastelic Ivic
Faculty of Geodesy,
University of Zagreb
Kaciceva 26
HR-10000 Zagreb, Croatia,
e-mail: ivic@geof.hr

Ausnutzung der Farbinformation bei automatischen Theodolitmesssystemen mit integrierten CCD-Kameras

Anton NIESSNER
Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
Wien

Geodätische Aufgaben der Ingenieurgeodäsie können grundsätzlich in drei Aufgabenbereiche unterschieden werden:

1. die Aufnahme und Darstellung des örtlichen Bestandes,
2. die geometrische Übertragung (Absteckung) in die Örtlichkeit und
3. die messtechnische Kontrolle (Überwachung).

Dabei stellen Theodolite ein wichtiges hochpräzises Messwerkzeug dar und ermöglichen mit integrierten CCD-Kameras einen hohen Automatisierungsgrad. Durch die Automatisierung ist eine enge Verknüpfung mit der Informationsverarbeitung gegeben.

Die Vorbereitung der Messung, wie die Messpunktauswahl oder allgemein formuliert, was wann wo gemessen wird, zählt zu den wesentlichen Aufgaben eines Vermessungsingenieurs, da der eigentliche Messablauf oft automatisiert und die Schritte in der Bearbeitung der Messdaten computerunterstützt ablaufen. Daher ist im Bereich dieser qualitativen Entscheidungsprozesse speziell bei Überwachungsaufgaben ein enormes Entwicklungspotential in der Automatisierung der Messverfahren gegeben.

Qualitative Entscheidungsprozesse sind auch immer eng verknüpft mit der visuellen Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen. Das Ziel ist eine Methodik zu entwickeln, die diese visuelle Wahrnehmungsfähigkeit mit einem technischen System nachbildet und bei Überwachungsaufgaben eine qualitative automatische optische Interpretation des zu messenden Objekts ermöglicht.

Die menschliche Wahrnehmung ist eine komplexe Interaktion zwischen den beiden Augen und verschiedenen Regionen des Gehirns. Sie ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Wahrnehmung von Form und Farbe,
- Dreidimensionale Wahrnehmung,
- Wahrnehmung von Bewegungen.

Dabei ist besonders die Modellierung der Wahrnehmung von Form und Farbe eine sehr interessante Herausforderung. Speziell die Ausnutzung der Farbinformation, für uns Menschen eine selbstverständliche Alltäglichkeit, wurde in der Messtechnik weitgehend vernachlässigt.

In Kombination mit anderen Methoden der Bildverarbeitung kann ein Theodolitmesssystem mit integrierten CCD-Kameras die Realisierung eines „intelligenten“ Messroboters in greifbare Nähe rücken. Dabei wird das menschliche Wahrnehmungsvermögen mittels CCD-Farb-Kameras und Software nachgebildet und ein computergesteuertes Theodolitsystem liefert die Messpräzision.

Speziell bei Überwachungsaufgaben kann aufgrund einer flächenbasierenden, qualitativen Analyse der Objektoberfläche vorerst auf eine zeitraubende Einzelpunktbestimmung verzichtet werden. Erst wenn Formveränderungen nachgewiesen werden, sind weitere quantitative Verfahren notwendig.

Ein entsprechendes automatisches Messmodul beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Bewertung und Unterscheidung einer Farbbildszene nach einzelnen unterschiedlichen Farben,
- Erfassung der Form der segmentierten Region und deren Veränderung sowie deren räumliche Lage,
- Berechnung der Abstandsfunktion, die aus der Umrandungslinie des segmentierten Bereichs und dem zugehörigen Flächenschwerpunkt bestimmt ist,
- Analyse der Formen und deren Veränderungen mittels Fouriertransformation bzw. Wavelet-Analyse und
- Auswertung dieser Ergebnisse mit Regeln für Rückschlüsse auf entstandene Deformationen.

Die Physiologie des Farbsehens wird seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts durch zwei Konzepte beschrieben:

- Young-Helmholtzsche Dreikomponententheorie,
- Gegenfarbentheorie von E. Hering.

Die Dreikomponententheorie beschreibt die Farben als dreidimensionale Mannigfaltigkeit, wo drei Grundfarben (ROT, GRÜN, BLAU) alle Farben beschreiben. Diese Theorie stützt sich auf den Aufbau unseres Sehorgans, da es drei verschiedene zapfenförmige Sehzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit gibt und bildet daher ein wichtiges Fundament unseres Verständnisses für das Farbsehen. Alle Erscheinungen des Farbsehens können aber damit nicht erklärt werden, dadurch sind auch andere Ansatzpunkte entstanden. Die Gegenfarbentheorie stellt die Hypothese auf, dass drei gegenläufige Prozesse gleichzeitig stattfinden, ein Hell-Dunkel-, ein Rot-Grün- und ein Blau-Gelb-Prozess. Heute weiß man, dass beide Theorien ihre Berechtigung haben. Die Dreikomponententheorie bezieht sich auf die Physiologie des Auges, während die Gegenfarbentheorie Eigenschaften unseres Farbsehens beschreibt, die durch die Reizverarbeitung im visuellen System des Gehirns bestimmt sind.

Da ein Farb-CCD-Sensor analog zum Auge Felder mit drei unterschiedlichen Farbempfindlichkeiten besitzt, eignet sich die Dreikomponententheorie auch zur Beschreibung von Farbaufnahmen. Zur Beschreibung einzelner Farben erfolgt die Darstellung in einem Farbwürfel (siehe Abb. 1). Die drei Raumachsen stellen die drei Grundfarben oder Primärvalenzen (ROT, GRÜN, BLAU) dar. Jeder Vektor zu einem Punkt in diesem Würfel liefert eine bestimmte Farbvalenz welche in ihre Primärvalenzen zerlegt werden kann. Unter dem Begriff Farbvalenz versteht man eine Klasse gleichaussehender Farbreize.

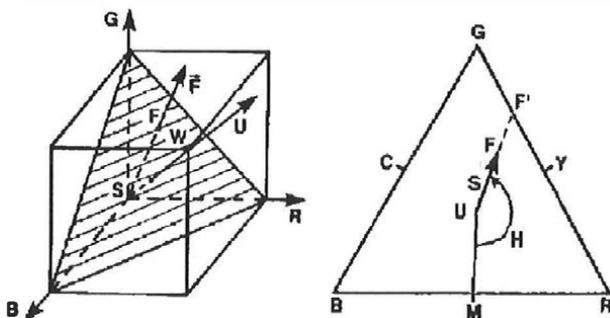


Abb. 1: Farbwürfel im RGB-Raum und Farbdreieck

Zur Unterscheidung einzelner Objekte im CCD-Bild ist eine Segmentierung des CCD-Bildes nach unterschiedlichen Farben, d.h. einer Klasse von nahe beisammen liegenden Farbvalenzen, erforderlich. Dazu ist eine Transformation des Bildes vom RGB-Raum in den HSI-Raum erforderlich. Im HSI-Raum werden alle Farben durch die Grundgrößen INTENSITÄT, SÄTTIGUNG und HUE (BUNTTON)

dargestellt. Um die Bedeutung der Transformation zu verstehen, legen wir gedanklich eine Ebene durch den Farbwürfel, sodass sich ein Maxwell'sches Farbdreieck mit den Ecken ROT, GRÜN und BLAU ergibt (siehe Abb. 1). Alle Farbvalenzen auf dieser Ebene haben die gleiche INTENSITÄT, deren Wert auf der Raumdiagonale vom Wert Null im Schwarzpunkt auf den Maximalwert im Weißpunkt ansteigt. Mit dieser Größe ist eine Farbvalenz auf den Schwarz-Weiß-Wert reduziert. In diesem Dreieck können nun die beiden anderen Größen definiert werden. Die SÄTTIGUNG ist die gewichtete Distanz vom Schwerpunkt (Durchstoßpunkt der Unbuntgerade) zur Begrenzungslinie des Dreiecks. Sie beschreibt die „Stärke“ der Farbe, d.h. ob es sich um eine kräftige Farbe oder um einen Pastellton handelt. Der BUNTTON (HUE) ist der Winkel zwischen einer wählbaren Nulllinie und der Linie zwischen Schwerpunkt und Farbvalenz. Er beschreibt die „Art“ der Farbe, d.h. welchen Namen die Farbe bekommt.

Jede transformierte Größe ergibt ein Grauwertbild der Szene (Abb. 2 - Abb. 4). Das Bild der INTENSITÄT (Abb. 2) entspricht dem Schwarz-Weiß-Bild der Farbszene. In diesem wird nur eine Helligkeitsinformation übermittelt. In manchen Fällen hat eine Änderung der Farbe auch eine Änderung des INTENSITÄT-Wertes zur Folge. Doch ist die Problematik aus dem Schwarz-Weiß-Bild die unterschiedlichen Farbbereiche zu unterscheiden, deutlich erkennbar. Speziell Rot und Grün können kaum bis nicht unterschieden werden. Im Bild mit den Werten der SÄTTIGUNG (Abb. 3) können ebenfalls die Farben der einzelnen Objekte nicht unterschieden werden. Im Vergleich dazu ist im Bild der Größe HUE (Abb. 4) eine deutliche Grauwertabgrenzung der unterschiedlichen Farben gegeben.

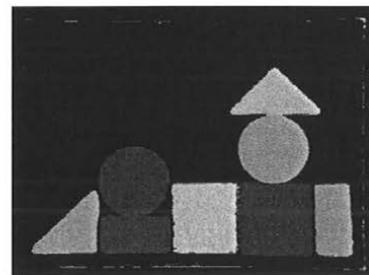
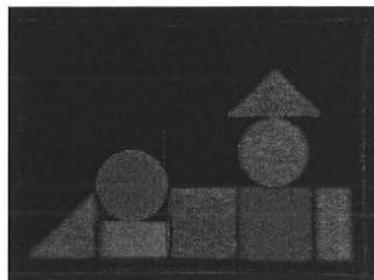
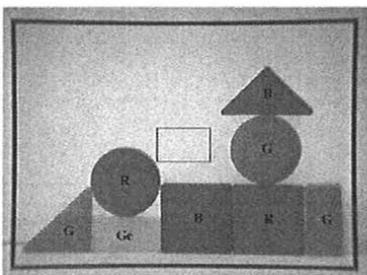


Abb. 2: Grauwertbild der Größe I Abb.3: Grauwertbild der Größe S Abb.4: Grauwertbild der Größe H
(R...Rot, G...Grün, B...Blau,
Ge...Gelb)

Eine Vielzahl an durchgeführten Experimenten zeigt, dass bei der Segmentierung einzelne Objekte nur dann korrekt und vollständig erfasst werden können, wenn neben den HUE-Werten auch die Größen INTENSITÄT, SÄTTIGUNG sowie eine untere Schranke der Pixelanzahl eines Objekts in Betracht gezogen werden.

Analog zur visuellen Wahrnehmung des Menschen, wo speziell die Begrenzungen unterscheidbarer Regionen und Schattenbildungen Rückschlüsse auf die Form zulassen, bietet sich beim automatisierten Verfahren die Umrandungslinie der segmentierten Fläche an. Da das CCD-Bild einen diskreten Aufbau (picture elements = pixel) hat, liegt die Umrandungslinie als Liste von Paaren von Pixelwerten vor. Ein Algorithmus, der die Nachbarschaft der Pixel der segmentierten Region untersucht, findet all jene Pixel, die diese segmentierte Region außen begrenzen. Dann wird der Abstand von jedem Randpixel zum Flächenschwerpunkt bestimmt und erhält eine Funktion der Pixeldistanz bezogen auf die laufende Punktnummer. Zur Fokussierung auf die Abstandsänderungen werden die Abstände nur als Schwankung um

den mittleren Abstand zum Schwerpunkt betrachtet. Die Abstandsfunktion besitzt je nach segmentierter Form einen spezifischen Charakter und ändert sich entsprechend der entstehenden Formveränderung.

Die weitere Extraktion von Information über die auftretende Formveränderung kann grundsätzlich auf verschiedenste Weise erfolgen. Analog zu Anwendungen in anderen technischen Anwendungsgebieten kann der Weg über Transformationen gewählt werden. Durch Anwendung der Diskreten Fouriertransformation und der Kontinuierlichen Wavelet-Analyse erhält man als Ergebnis Spektren, welche in übersichtlicher Form die wesentlichen Eigenschaften der Abstandsfunktion verdichten (Abb. 5 - Abb. 10). Durch Änderungen in den Spektren können einerseits unterschiedliche Formen unterschieden und andererseits Formveränderungen erkannt werden.

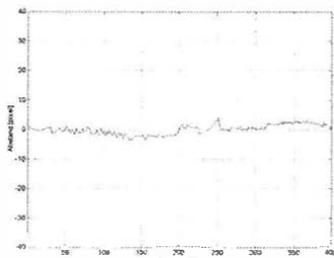


Abb. 5: Normierte Abstandsfunktion eines kreisförmigen Objekts

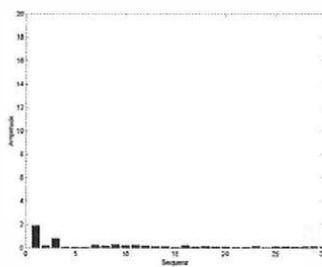


Abb. 6: Fourierspektrum eines kreisförmigen Objekts

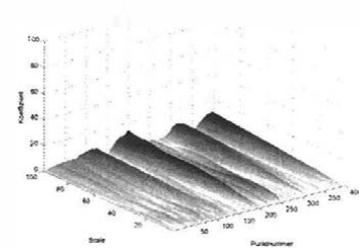


Abb. 7: Wavelet-Transformation eines kreisförmigen Objekts

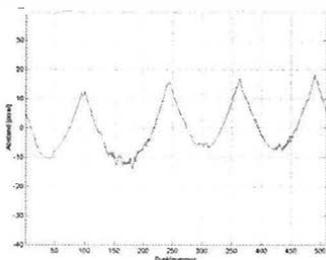


Abb. 8: Normierte Abstandsfunktion eines viereckigen Objekts

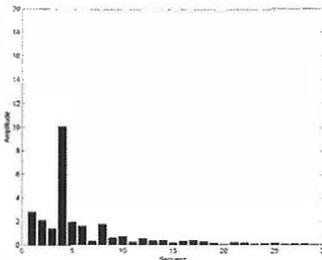


Abb. 9: Fourierspektrum eines viereckigen Objekts

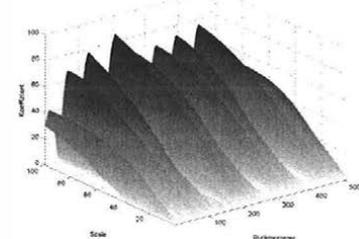


Abb. 10: Wavelet-Transformation eines viereckigen Objekts

Beispielhaft für eine Vielzahl an Testmessungen wird eine Untersuchung an einem kreisförmigen Objekt betrachtet, das unterschiedlichen Deformationen ausgesetzt war. Bildet man die Differenz zwischen den Spektren vor und nach der Deformation, dann können die Unterschiede sehr deutlich gemacht werden (Abb. 11 - Abb. 14). Eine Signifikanzschwelle von Deformationserscheinungen gegenüber Streuungen bei Wiederholungsmessungen kann bei 0,3% der Segmentgröße festgestellt werden. Aus den Charakteristiken der einzelnen Testmessungen wurden Regeln abgeleitet, die die Interpretation der Ergebnisse bei Überwachungsmessungen gestatten. Exemplarisch werden hier zwei einfache Regeln erwähnt:

- Amplitudenwerte der niedrigen Sequenzen liegen über der Rauchgrenze → Deformation,
- nur die 1. Amplitude hat einen höheren Wert → Deformation eines kreisförmigen Objekts.

Die einzelnen Begriffe wie „niedrig“, „höher“ oder „Rauschgrenze“ in den Regeln sind durch Schwellwerte festzulegen.

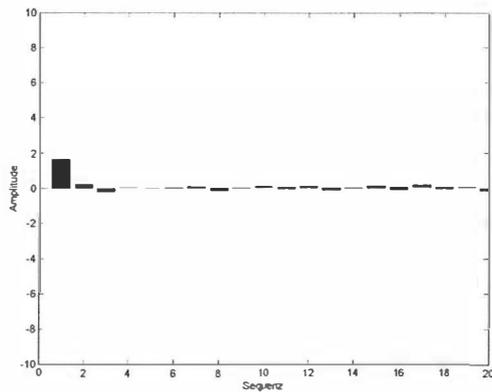


Abb. 11: Differenz-Fourierspektrum des Kreises bei kleinen Deformationen (0,3%)

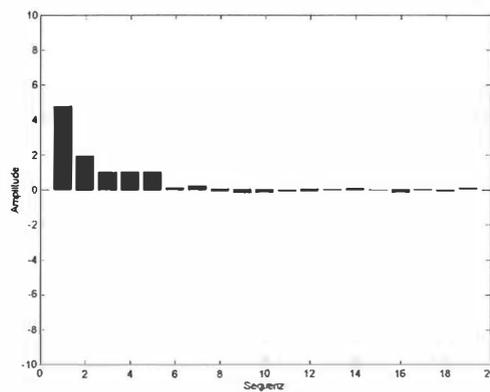


Abb. 12: Differenz-Fourierspektrum des Kreises bei größeren Deformationen (5%)

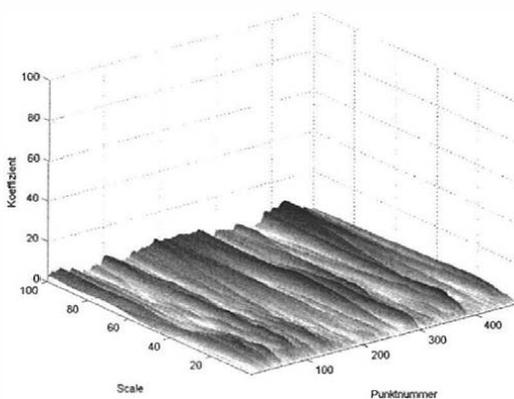


Abb. 13: Differenz-Wavelet-Transformation des Kreises bei kleinen Deformationen (0,3%)

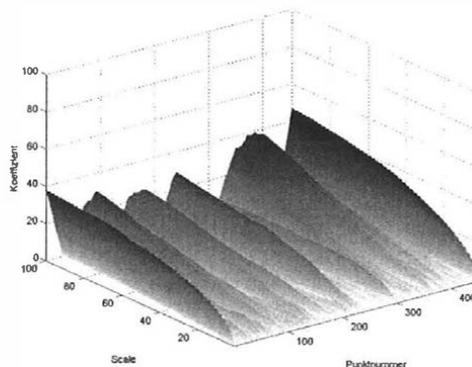


Abb. 14: Differenz-Wavelet-Transformation des Kreises bei größeren Deformationen (5%)

Das vorgestellte Verfahren zeigt exemplarisch wie die Konzeption, Umsetzung und Ausführung einer qualitativen automatischen Überwachungsmessung unter Ausnutzung der Farbinformation aussehen kann. Die Diskrete Fouriertransformation und die Kontinuierliche Wavelet-Analyse haben sich als geeignet erwiesen, das Bindeglied zwischen Segmentierungsergebnis anhand der Farbinformation und Interpretation der segmentierten Objekte zu sein. Eine Anwendung in der Komplexität realer Szenen unter den verschiedensten Störeinflüssen verlangt nach weiteren Verbesserungen des Regelwerks, verbesserter Hardware und zusätzlichen Bildverarbeitungsalgorithmen.

Literatur:

FREY, H: Digitale Bildverarbeitung in Farbräumen, Dissertation, Technische Universität München, 1988

NIEDRIG, H. (Hrsg.): Bergmann Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3
Optik, S.665-754, de Gruyter, Berlin, New York, 1993
NIESSNER, A.: Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnützung der Farbinformation,
Dissertation, Technische Universität Wien, 2002
PUPPE, F.: Einführung in Expertensysteme, Springer, Berlin, Heidelberg, 1991
ZEKI, S.M.: Das geistige Abbild der Welt, in Spektrum der Wissenschaft: Verständliche
Forschung, Gehirn und Bewusstsein, Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Hei-
delberg, 1994

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Anton NIESSNER
Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
Arltgasse 35, 1160 Wien
e-mail: a.niessner@metrologie.at

Wissensbasierte Entscheidungsfindung für bildgebende Messsysteme*

Reiterer Alexander
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

1 Einleitung

In der Ingenieurgeodäsie stellt die hochgenaue Erfassung und Repräsentation verschiedenster Objekte eine der wichtigsten Aufgaben dar. Dabei spielt in jüngster Zeit vor allem die berührungslose Vermessung (Senkung des Gefahrenpotentials für den Vermessenden, Senkung der Kosten durch das Wegfallen aufwendiger Markierungsarbeiten, usw.) eine immer wichtigere Rolle. Optische 3D-Messtechniken wie z.B. 3D- Laserscanner, photogrammetrische Verfahren, Messroboter oder theodolitbasierte Messsysteme gewinnen daher auch in der Ingenieurgeodäsie zunehmend an Bedeutung.

3D-Laserscanning Verfahren bestechen durch eine schnelle Datenerfassung, sind jedoch für viele Einsatzbereiche (noch) zu ungenau. Des Weiteren ist die Einzelpunktinterpretation schwierig; ein aufwendiges Postprocessing ist die Folge. *Photogrammetrische Verfahren* verfügen über die Möglichkeit, konkrete Objektpunkte zu selektieren, jedoch ist eine Automatisierung dieser Verfahren durch mangelnde bzw. eingeschränkte Online-Fähigkeit schwierig. Als mögliche „Zwischenstufe“ können *theodolitbasierte Verfahren* betrachtet werden.

Das Kernstück eines theodolitbasierten Messsystems stellt der bildgebende Sensor dar. Beispielhaft sei hier auf die Entwicklung von Leica Geosystems verwiesen, welche speziell für einen bildgebenden Theodoliten ein optisches System entwickelt hat (WALSER 2004). Die Entwicklung von Leica ist nur ein Teil des in jüngster Zeit immer intensiver betriebenen Forschungsgebietes der bildgebenden Theodolitmesssysteme. Weiters erwähnenswert sind Entwicklungen an der Technischen Universität München (WASMEIER 2003), der Ruhr-Universität Bochum (SCHERER 2004) und die langjährige Entwicklungsarbeit am Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien (ROIC 1996, MISCHKE & KAHMEN 1997, REITERER 2004).

Für einen verbreiteten und produktiven Einsatz solcher Messsysteme bedarf es einer Steigerung von Flexibilität und Effizienz; erreichbar ist dies durch einen höheren Automatisierungsgrad des Gesamtsystems. Diese sollten sich vor allem auf die hochkomplexen Entscheidungsfindungen innerhalb des jeweiligen Messprozesses konzentrieren, welche auch den Inhalt des vorliegenden Artikels bilden.

Der vereinfachte Messablauf eines bildgebenden Theodolitmesssystems besteht aus folgenden Schritten: Bilderfassung, Bildbearbeitung, Punkterfassung und Punktfilterung.

Zusätzlich zu den genannten Hauptschritten des Messprozesses bedarf es eines Bearbeitungsschrittes, der für die Erfassung von Bild- bzw. Objektinformation, welche in weiterer Folge für die automatisierte Entscheidungsfindung genutzt wird, verantwortlich ist. Dementspre-

* Dieser Beitrag stellt eine leicht gekürzte Fassung der im Rahmen der „Oldenburger 3D-Tage 2005“ erschienen Publikation „*Wissensbasierte Steuerung bildgebender Sensoren*“ dar.

chend sollte dieser Analyseprozess mit Sorgfalt gewählt bzw. entwickelt werden; Bedacht sollte dabei auch auf die Online-Fähigkeit genommen werden.

2 Bildanalyse

Wie bereits erwähnt dient die entwickelte Bildanalyse der Extraktion von Bildinformation¹ (sog. Image Features), welche die Grundlage für die Auswahl geeigneter Algorithmen, die Reihenfolge ihrer Anwendung und die Grundlage für die Auswahl der notwendigen Parameter bildet. Um eine möglichst schnelle (online) Berechnung der Bildinformation zu ermöglichen, basieren sämtliche Bildmerkmale auf den Grauwerten der Bildmatrix. Für die Bildanalyse werden folgende statistische Methoden verwendet:

- statistische Momente erster bis dritter Ordnung (PRATT 1978),
- Haralick Momente² (HARALICK & SHAPIRO 1993).

Anschließend an die Berechnung der Bildmerkmale werden diese durch eine Fuzzifizierung in qualitative Werte umgerechnet, gemeinsam mit den Ursprungswerten als so genannte Entscheidungsmatrizen zusammengefasst und in geeigneter Form gespeichert.

Damit stehen für die automatisierte Entscheidungsfindung insgesamt 68 numerische Werte, deren Fuzzy-Werte und die durch Benutzerrückanfragen gesammelten Objektinformationen zur Verfügung. Eine vollständige Beschreibung der entwickelten Bild- bzw. Objektanalyse findet sich in (REITERER 2004).

3 Wissensbasierte Entscheidungsfindung

Um den komplexen Auswahlprozess von Algorithmen, die Reihenfolge ihrer Anwendung, sowie die Festlegung der notwendigen Parameter zu automatisieren, bedarf es der Entwicklung eines geeigneten Entscheidungssystems. In der Literatur finden sich eine Unzahl von unterschiedlichen Techniken zur Realisierung solcher Entscheidungssysteme. Neben konventionellen Programmiersprachen wie C++ oder Java zählen wohl künstliche neuronale Netze und wissensbasierte Systeme zu den bekanntesten Vertretern solcher Techniken.

Nachfolgend wird auf den wissensbasierten Ansatz eingegangen, da dieser gegenüber konkurrierenden Ansätzen eine Reihe von Vorteilen zu bieten hat.

Zu den Komponenten eines wissensbasierten Systems zählen: die Wissensbasis, die Inferenzkomponente, die Benutzerschnittstelle, die Erklärungskomponente und die Wissenserwerbskomponente. Vorteil eines wissensbasierten gegenüber einem herkömmlichen Ansatz ist vor allem die klare Trennung von Problemwissen und Wissensverarbeitung, d.h. dem Programmcode an sich. Dadurch kann eine Erweiterung bzw. Modifikation der Wissensbasis wesentlich leichter erfolgen, — sogar der Austausch der gesamten Wissensbasis durch eine andere ist ohne größere Probleme durchführbar.

¹ Es sei erwähnt, dass neben der Bildanalyse eine simple Objektanalyse (Objekttyp, Lichtverhältnisse, u.v.a.m.) durch Benutzerrückanfragen durchgeführt wird. Die gesammelten Informationen gehen in den Entscheidungsprozess mit ein.

² Die 13 Haralick Momente (HARALICK & SHAPIRO 1993) ermöglichen es, aus der Grauwert-Abhängigkeits-Matrix $p(i,j)$ (grey-level co-occurrence matrix) statistische Merkmale zu berechnen. In der Grauwert-Abhängigkeits-Matrix werden die Auftrittshäufigkeiten von Grauwertkombinationen (für einen festgelegten Abstand und Winkel) eingetragen. Für das hier vorgestellte Verfahren wurden die Grauwert-Abhängigkeits-Matrix und die daraus resultierenden Haralick-Momente für einen Pixelabstand von 1 und die vier Richtungen 0°, 45°, 90°, 135° berechnet (zusätzlich wird der arithmetische Mittelwert für jede Richtung berechnet).

Wie bereits eingangs erwähnt zielt die entwickelte Automatisierung auf drei Grundprozesse des Messablaufes ab: Automatisierung der Bildbearbeitung (BVV), der Punkterfassung (IOP) und der Punktfilterung (IPF). Das Konzept des Messsystems ist in Abbildung 1 dargestellt.

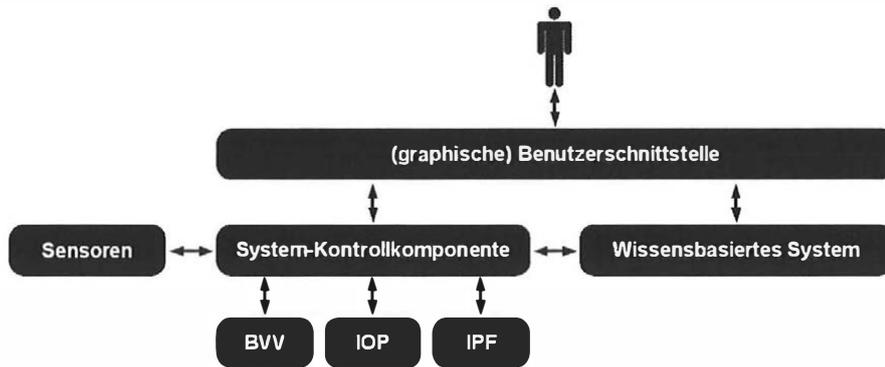


Abbildung 1: Konzept des entwickelten Messsystems.

3.1 Automatisierung der Bildbearbeitung

Eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung von Punkterfassungsalgorithmen ist eine ausreichende Bildqualität. Oft ist es im praktischen Einsatz nötig, die Qualität vorliegender digitaler Bilder durch entsprechende Bildbearbeitungsverfahren zu verbessern.

In REITERER ET AL. (2003) wurden verschiedene Bildbearbeitungsverfahren vorgestellt und deren Notwendigkeit bei der Anwendung von Punkterfassungsalgorithmen diskutiert; konkret wurden folgende Algorithmen implementiert: Medianfilter, Gaußfilter, Kantenextraktionsverfahren (Sobel-, Prewitt-, Roberts Operator), Histogrammstreckung, Aufhellung, Abdunkelung.

Der Zusammenhang zwischen extrahierten Bildmerkmalen / Objektmerkmalen und Algorithmen wurde in Form von Regeln in eine eigene Wissensbasis implementiert. Für die wissensbasierte Bildbearbeitung sei hier beispielhaft die sehr einfache Regel für die Auswahl einer Bildaufhellung angeführt (Clips-Syntax):

```

(defrule Aufhellung
  (Stat_Momente (M1_f s_klein | klein))
  (Stat_Momente (M3_f mittel_positiv | gross_positiv | s_gross_positiv))
=>
  (assert (Zustand (Aufhellung JA))))
  
```

Grundsätzlich ist eine Regel in zwei Teile unterteilt, nämlich in den *Bedingungsteil* (*lefthand side – LHS*) und den *Aktionsteil* (*righthand side – RHS*); das Symbol „=>“ trennt die beiden Teile. Im Bedingungsteil stehen die sogenannten *Vorbedingungen*, welche für eine Ausführung der Regel erfüllt sein müssen. Erst wenn alle Vorbedingungen erfüllt sind, wird der Aktionsteil der Regel ausführbar. Unsere Beispielregel enthält zwei Vorbedingungen: (1) das statistische Moment erster Ordnung muss einen Fuzzy-Wert von *s_klein* oder *klein* haben; (2) das statistische Moment dritter Ordnung muss einen Fuzzy-Wert von *mittel_positiv*, *gross_positiv* oder *s_gross_positiv* haben. Sind beide Vorbedingungen erfüllt, wird dem

„working memory element“³ Zustand (*Aufhellung*) der Wert *JA* zugewiesen; eine Aufhellung kann durchgeführt werden.

Der Ablauf der wissensbasierten Bildbearbeitung gliedert sich in mehrere Schritte. Nach der Extraktion der Bildmerkmale werden die notwendigen Bildbearbeitungsalgorithmen ausgewählt. Im nächsten Schritt wird dem Benutzer die Möglichkeit gegeben, kritische Bearbeitungsschritte (z.B. informationsreduzierende Filter) aus dieser Auswahlliste zu entfernen. Anschließend werden für sämtliche Bearbeitungsschritte die notwendigen Parameter bestimmt und in einem letzten Schritt die Reihenfolge ihrer Anwendung festgelegt. Die getroffene Auswahl wird in eine sog. *Taskliste* geschrieben und der Systemkontrollkomponente (siehe Abbildung 1) übergeben, welche die einzelnen Algorithmen ausführt und die Ergebnisse in geeigneter Form speichert. Eine Neuberechnung der Bildmerkmale rundet diesen Systemprozess ab.

Ergebnis dieses ersten Teilsystems stellt ein für die nachfolgende automatisierte Punkterfassung besser geeignetes Bild (bzw. Bildfolge) dar (siehe Abbildung 2).

3.2 Automatisierung der Punkterfassung

Der zweite große Teilschritt im Gesamtprozess stellt die Auswahl und Anwendung geeigneter Punkterfassungsalgorithmen (sog. *Interest Operatoren*) dar. *Interest Operatoren* identifizieren markante Punkte anhand der Farb- bzw. Helligkeitsänderungen im erfassten Bild. Bei der Auswahl markanter Punkte sind eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen (FÖRSTNER 1991): Deutlichkeit, Invarianz, Stabilität, Interpretierbarkeit.

In der Literatur findet man eine Unzahl von verschiedenen *Interest Operatoren* (HARRIS 1998, FÖRSTNER 1991, PAAR 2001); keiner dieser Algorithmen ist jedoch geeignet, um unterschiedlichste Punktarten mit ausreichender Zuverlässigkeit zu erfassen. Daher wurden im vorliegenden Messsystem drei verschiedene Algorithmen implementiert: Förstner Operator, Harris Operator und Hierarchical Feature Vector Matching Operator (HFVM).

Für eine Erklärung der allgemeinen Funktionsweise eines *Interest Operators* sei auf die Literatur verwiesen (FÖRSTNER 1991, MISCHKE & KAHMEN 1997, REITERER 2004).

Ziel der wissensbasierten Punkterfassung ist es, die für nachfolgende Bearbeitungsschritte (z.B. Deformationsanalyse) am besten geeigneten Objektpunkte zu erfassen. Das Wissen, welches für die Implementierung des Entscheidungssystems notwendig ist, wurde im Zuge umfangreicher Tests und Evaluierungsverfahren (REITERER 2004) gesammelt. Exemplarisch sei ein Teil der Entscheidungsregel (Clips-Syntax) für den Förstner Operator angeführt:

```
(defrule foerstner
  (or (or (or (and (1_Haralick_Moment (H1_0_f klein | s_klein | mittel))
                 (5_Haralick_Moment (H5_0_f klein | s_klein | mittel)))
        (and (1_Haralick_Moment (H1_90_f klein | s_klein | mittel))
              (5_Haralick_Moment (H5_90_f klein | s_klein | mittel))))
      .....
      ..... ))
  =>
  (assert (IOP (Foerstner JA)))
```

³ Die „working memory“ stellt neben den eigentlichen Regeln („rule memory“) den zweiten Teil eines regelbasierten Systems dar. Sie ist eine Sammlung von einzelnen *Typen* sowie deren *Instanzen*. Vergleichbare Formen sind *record* in Pascal oder *struct* in C. Die eigentlichen Elemente des Arbeitsspeichers („working memory elements“) sind dann konkrete *Instanziierungen*.

Die Regel für die Auswahl des Förstner Operators beinhaltet eine ganze Reihe von Vorbedingungen, welche mit logischen UND und ODER verknüpft sind. Sind sämtliche Vorbedingungen bzw. deren Verknüpfungen erfüllt, so werden in weiterer Folge die erforderlichen Parameter bestimmt.

Werden neben dem Förstner Operator auch noch ein zweiter bzw. ein dritter *Interest Operator* als geeignet selektiert (gleiche *Interest Operatoren* mit unterschiedlichen Parametereinstellungen werden in diesem Kontext als „unterschiedliche Operatoren“ betrachtet), so wird zusätzlich die Reihenfolge ihrer Anwendung regelbasiert gesteuert.

Sämtliche getroffenen Entscheidungen werden wieder in eine *Taskliste* geschrieben und der Systemkontrollkomponente (siehe Abbildung 1) übergeben. Nach Anwendung der ausgewählten Algorithmen liegen die Bild- bzw. Objektkoordinaten⁴ in einzelnen Punktlisten vor. Im letzten Bearbeitungsschritt sollen die Einzelpunktlisten zusammengefasst werden und die Punkte auf die für die nachfolgenden Berechnungsschritte wesentlichen (z.B. Deformationsanalyse) reduziert werden.

3.3 Automatisierung der Punktfilterung

Wie bereits oben angemerkt, bedarf es trotz der angewandten Bildbearbeitung und der optimal gesteuerten *Interest Operatoren* meist einer zusätzlichen Reduktion der erfassten Punkte. Die entwickelte Punktfilterung arbeitet in einem zweistufigen Prozess: (1) Punktfilterung auf Basis vordefinierter Regeln (wissensbasiert) und (2) Punktfilterung auf Basis einer Benutzerinteraktion (benutzerbasiert).

Der erste Teil der Punktfilterung basiert auf einem Entscheidungssystem ähnlich jenen, wie in den letzten beiden Abschnitten beschrieben. Die Eingangsdaten sind jedoch nicht mehr extrahierte Bildmerkmale, sondern Bildkoordinaten der erfassten Objektpunkte – erweitert um zusätzliche Informationsparameter, welche von den *Interest Operatoren* zurückgeliefert werden. Auf Grundlage dieser „Punktmerkmale“ erfolgt eine Einteilung der Punkte in vordefinierte Gewichtungsklassen („Wichtigkeitsklassen“). Aufgrund der Komplexität dieser Regelbasis soll auf eine exemplarische Auflistung einer Regel verzichtet werden.

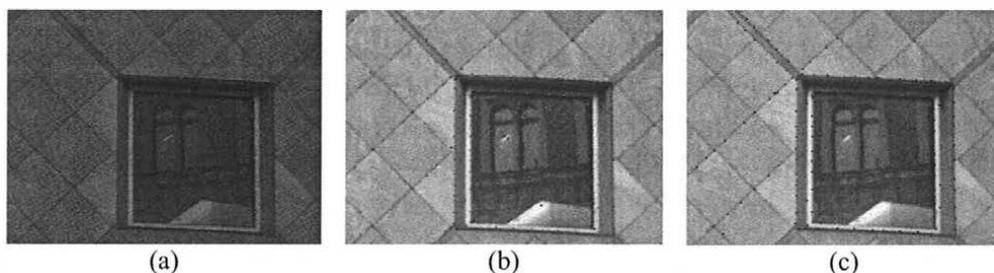


Abbildung 2: (a) Stark unterbelichtete Aufnahme; (b) Aufnahme nach der wissensbasierten Bildbearbeitung inklusive des Ergebnisses der wissensbasierten Punkterfassung; (c) Punktmenge nach Anwendung der Punktfilterung.

Der zweite Teil der Punktfilterung arbeitet mit Hilfe von Benutzerinteraktion. Zum einen hat der Benutzer die Möglichkeit, nur Punkte einer gewissen Gewichtungsklasse beizubehalten,

⁴ Objektkoordinaten können durch Bestimmung der „Ablageparameter“ und der daraus resultierenden Richtungsmessungen berechnet werden; Details in (MISCHKE & KAHMEN 1997).

und zum anderen steht dem Benutzer die Möglichkeit offen, Einzelpunkte bzw. Punktgruppen über eine geeignete graphische Schnittstelle zu löschen.

Mit Hilfe dieser zweistufigen Punktfilterung kann die erfasste Punktmenge ideal an die Bedürfnisse nachfolgender Berechnungs- bzw. Bearbeitungsschritte angepasst werden. Abbildung 2 zeigt eine Beispielaufnahme (Haas-Haus in Wien) nach Anwendung aller drei beschriebenen Bearbeitungsschritte.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Artikel präsentiert ein wissensbasiertes Entscheidungssystem für ein (online) Videotheodolit-basiertes Messsystem. Die Entscheidungsfindung konnte durch den kombinierten Einsatz wissensbasierter Techniken und Bildanalyseprozesse weitgehend automatisiert werden. Dem Benutzer wird jedoch die Möglichkeit gegeben, bei kritischen Prozessen die Systementscheidung zu revidieren.

In Zukunft könnte ein höherer Grad an Automatisierung erreicht werden, indem zusätzliche Bildanalyseprozesse miteinbezogen werden (z.B. Zernike Features) bzw. der Bildinhalt selbst für die online Entscheidungsfindung genutzt wird. Durch eine Bild- bzw. Objektbeschreibung, welche durch ein *Cognitive Vision System* erzeugt wird, könnte zudem eine objektspezifische Punktfilterung geschaffen werden.

Literatur

- FÖRSTNER, W. (1991): Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung, DGK, Vol. C, Nr. 370, München.
- HARALICK, R., SHAPIRO, L. (1993): Computer and Robot Vision, 1. Auflage, Addison-Wesley, New York.
- HARRIS, C., STEPHENS, M. (1998): A combined corner and edge detector. In: Proceedings of the 4th ALVEY vision conference, Matthews (Hrsg.), University of Manchester.
- KAHMEN, H., NIESSNER, A., DE SEIXAS, A. (2001): 3D Object Sensing Using Rotating CCD Cameras. In: Kropatsch / Bischof (Hrsg.), Digital Image Analysis, 1. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York.
- MISCHKE, A., KAHMEN, H. (1997): A New Kind of Measurement Robot System for Surveying of non Signalized Targets. In: Optical 3-D Measurement Techniques IV, Grün and Kahmen (Hrsg.), Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- PAAR, G., ROTTENSTEINER, F., PÖTZLEITNER, W. (2001): Image Matching Strategies. In: Kropatsch / Bischof (eds.), Digital Image Analysis, 1. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York.
- PRATT, W. (1978): Digital Image Processing, 1. Auflage, John Wiley and Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto.
- REITERER, A. (2004): A Knowledge-Based Decision System for an On-line Videotheodolite-based Multisensor System. Dissertation, Technische Universität Wien.
- REITERER, A., KAHMEN, H., EGLY, U., EITER, T. (2003): Knowledge-Based Image Preprocessing for a Theodolite Measurement System, In: Optical 3-D Measurement Techniques VI – Vol. I, S. 183-190, Grün and Kahmen (Hrsg.), Zürich.
- ROIC, M. (1996): Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Dissertation, Technische Universität Wien.

- SCHERER, M (2004): Intelligentes Tachymeter und Digitalkamera; Low-Cost aber High-Tech, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 10/2004, S. 150-156, Wichmann Verlag.
- WALSER, B. (2004): Development and Calibration of an Image Assisted Total Station, Dissertation, ETH-Zürich.
- WASMEIER, P. (2003): The Potential of Object Recognition Using a Servo-Tacheometer TCA2003. In: Optical 3-D Measurement Techniques VI – Vol. II, S. 48-54, Grün and Kahmen (Hrsg.), Zürich.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Alexander Reiterer
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 27-29
A-1040 Wien

Allgegenwärtige Positionierungsmethoden für Intelligente Navigationssysteme

Günther Retscher
Institut für Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien

Kurzfassung

In den letzten Jahren wurden neue Positionierungsverfahren entwickelt, die in vermehrten Ausmaß in modernen Navigationssystemen zur Unterstützung von satellitengestützten Navigationsverfahren (GNSS) und der weit verbreiteten Koppelnavigation zum Einsatz kommen. Dabei liefern diese Methoden unterschiedliche Genauigkeiten für die Ortsbestimmung. Ihre Integration in moderne intelligente Navigationssysteme führt zu einer erheblichen Leistungssteigerung für die Positionsbestimmung in Gebieten mit schlechter Satellitenverfügbarkeit (z.B. im Stadtgebiet, Übergang in Gebäude und andere abgeschattete Gebiete, etc.). In diesem Beitrag werden diese Positionierungsverfahren kurz vorgestellt und beschrieben. Diese Positionierungsverfahren bilden auch die Basis für viele ortsbezogene Dienste, die sog. Location Based Services (LBS).

1 Einleitung

Die Kombination und Integration verschiedener Positionierungsverfahren ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit moderner, intelligenter Navigationssysteme und -dienste. Handelsübliche Systeme setzen jedoch hauptsächlich auf die satellitengestützte Positionierung (GNSS) für die absolute Positionsbestimmung. Signalverluste werden in der Regel mit der Koppelnavigation mittels relativer Positionsbestimmung überbrückt. Bei längeren Signalunterbrechungen entstehen jedoch größere Positionierungsfehler, da die relativen Sensoren ziemlich stark driften und eine ungünstige Fehlerfortpflanzung aufweisen. Dieser Umstand ist mit ein Hauptgrund, dass in moderne, intelligente Navigationssysteme eine Integration von zusätzlichen Sensoren und Positionierungsverfahren vorgenommen werden soll. Des weiteren ist eine Alternative zur Positionierung mittels GNSS gewünscht, damit auch eine kontinuierliche Ortung des Nutzers im Stadtgebiet und in Bereichen mit starken Abschattungen der Satellitensignale sowie in Gebäuden möglich wird. Nutzbare, alternative Positionierungsverfahren sind z.B. die Methoden zur Lokalisierung von Mobiltelefonen, die Nutzung von WLAN (Wireless Local Area Networks), UWB (Ultra Wide Band), RFID (Radio Frequency Identification) sowie Bluetooth. Nach Pahlavan et al. (2002) können dabei zwei verschiedene Strategien unterschieden werden, wobei im ersten Fall ein eigenes Funknetz aufgebaut wird, das für die Positionierung eingesetzt werden kann, und bei der zweiten Methode bereits bestehende Netzwerkinfrastruktur zur Positionierung eines mobilen Nutzers genutzt wird. Die zweite Methode hat demnach den Vorteil, dass kein eigenes Funknetz aufgebaut werden muss. Einige dieser Verfahren wurden speziell für die Positionsbestimmung in Gebäuden entwickelt. Sie können aber auch im Übergangsbereich in der Nähe von Gebäuden sowie im Stadtgebiet eingesetzt werden. Das Prinzip dieser Verfahren wird im folgenden beschrieben. Ihre Anwendung finden diese Methoden teilweise in dem Forschungsprojekt NAVIO (Fußgängernavigation in Gebäuden und im städtischen

Umfeld), dass sich mit der Führung von Besuchern der Technischen Universität Wien von in der Nähe befindlichen Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs zu Büros und Personen der Universität beschäftigt (Gartner et al. 2004). Dabei wird ein mobiles Navigationssystem eingesetzt, das aus verschiedenen Sensoren besteht. Neben GNSS kommen noch WLAN und RFID Positionierung, die Positionsbestimmung mit Mobiltelefonen, die Koppelnavigation zur Messung der Richtung und des zurückgelegten Weges über einen digitalen Kompass, Kreisel und Beschleunigungssensoren zur Schritterkennung sowie ein Barometer zur Höhenbestimmung zum Einsatz.

2 Überblick über alternative Positionierungsverfahren für die Navigation

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Positionierungsverfahren und Sensoren für moderne, intelligente Navigationssysteme und –dienste sowie deren Beobachtungen und erreichbaren Genauigkeit.

Positionierungsverfahren		Beobachtungen	Genauigkeiten
GNSS	GPS	y, x, z	$\pm 6 - 10 \text{ m}$
	DGPS		$\pm 1 - 4 \text{ m}$
Geschwindigkeit von GNSS		v_y, v_x v_z	$\sim \pm 0,05 \text{ m}^{-1}$ $\sim \pm 0,2 \text{ m}^{-1}$
Positionierung mit Mobiltelefon (GSM)	Cell ID	y, x	$\pm 150 \text{ m} - 35 \text{ km}$
	Solo Matrix		$\pm 50 - 100 \text{ m}$
WLAN Positionierung	IMST ipos	y, x, z	$\pm 1 - 3 \text{ m}$
UWB Positionierung (TDoA)		y, x, z	$\pm 0.2 - 1 \text{ m}$
RFID Positionierung (Active Landmarks)		y, x, z	$< \pm 6 \text{ m}$
Bluetooth (Active Landmarks)		y, x, z	$\pm 10 \text{ m}$
Inertiale Navigationssysteme (INS)	Crossbow IMU700CA-200	a_x, a_y, a_z φ, ψ, θ	$< \pm 0.08 \text{ m s}^{-2}$ $< \pm 0.03 \text{ }^\circ/\text{s}$
	Inertial Measurement Unit		
Koppelnavigation	PointResearch DRM-III Dead Reckoning Module	y, x	$\pm 20 - 50 \text{ m per 1 km}$
		z φ	$\pm 3 \text{ m}$ $\pm 1^\circ$
Richtung	Honeywell Compass Module HMR 3000	φ	$\pm 0.5^\circ$
Beschleunigung	Crossbow Accelerometer CXTD02	a_{tan}, a_{rad}, a_z	$> \pm 0.03 \text{ ms}^{-2}$
Barometer	Vaisala Pressure sensor PTB220A	z	$\pm 1-3 \text{ m}$

Tabelle 1: Positionierungsverfahren für Navigationssysteme und –dienste sowie deren Beobachtungen und erreichbaren Genauigkeiten

(Genauigkeitsangaben aus Duffett-Smith and Craig 2004, Imst 2004, Kong et al. 2004, Chon et al. 2004, Crossbow 2004a, PointResearch 2004, Honeywell 2004, Crossbow 2004b, Vaisala 2004) wobei y, x, z die 3D-Koordinaten der aktuellen Position des Nutzers, v_y, v_x, v_z die Geschwindigkeiten, a_x, a_y, a_z die Beschleunigungen, a_{tan} die Tangentialbeschleunigung und a_{rad} die radiale Beschleunigung in der xy -Ebene sind, φ die Richtung (Orientierung) des Nutzers in der xy -Ebene, ψ die Längsneigung und θ die Querneigung ist.

Für die Lokalisierung von Mobiltelefonen wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, die teilweise auf klassischen, terrestrischen Navigationsverfahren beruhen. Ihr Prinzip wurde z.B. in Retscher (2002) eingehend beschrieben. Die erreichbare Positionierungsgenauigkeit hängt

im wesentlichen von der verwendeten Methoden und dem Mobilfunknetz (GSM, W-CDMA, UMTS) ab. Höchste Genauigkeiten können mit dem Hyperbelschnittverfahren, dem sog. Enhanced Observed Time Difference (E-OTD), erzielt werden, bei dem Laufzeitdifferenzen von Signalen von Basisstationen zwischen der Mobilstation und einer Referenzstation im Netzwerk, der sog. Location Measurement Unit (LMU), bestimmt werden. Die erreichbare Positionierungsgenauigkeit liegt im Bereich von 50 bis 150 m, wobei Messungen zu mindestens 3 Basisstationen auszuführen sind. Liegen diese Messungen nicht vor, so kann eine Positionierung nur durch Angabe der Mobilfunkzelle (Cell ID), in der sich der Nutzer gerade befindet, erfolgen. Die erreichbare Positionierungsgenauigkeit reduziert sich dann auf 150 m bis 1 km im Stadtgebiet und bis zu 35 km in ländlichen Gebieten. Da E-OTD eine Modifikation der Hardware des Mobilfunknetzes und die Installation von vielen Referenzstationen (eine LMU für jeweils 3 bis 5 Basisstationen) erfordert, was hohe Kosten für die Netzbetreiber zur Folge hat, wurde dieses Verfahren weltweit erst in wenigen Ländern verwirklicht. Neuere Entwicklungen haben sich daher auf die Reduktion der Kosten und notwendigen Hardware konzentriert. Die sog. Matrix Methode kommt ohne zusätzliche Hardware und LMU's aus. Es wird lediglich ein Serving Mobile Location Centre (SMLC) benötigt, in dem die Position des Nutzer bestimmt wird (siehe Duffett-Smith und Craig 2004). In diesem Fall wird im Mobiltelefon ein Softwareupdate installiert. Das Telefon misst die relative Empfangszeit von Signalen verschiedener Basisstationen in seiner näheren Umgebung. Diese Zeitmessungen werden vom SMLC regelmäßig von anonymen Mobiltelefonen angefordert. Aus diesen Messungen können die Abweichungen der Sendezeitpunkte der Basisstationen von der Systemzeit (die sog. „Network Timings“) berechnet werden. Wenn nun ein bestimmtes Mobiltelefon lokalisiert werden soll, so werden im Handset die relativen Empfangszeiten der Signale gemessen und der Matrix Locator im SMLC berechnet mit diesen Messungen und den Network Timings die aktuelle Position des Telefons. Da die Messungen nicht simultan erfolgen müssen, können anstelle der Messungen von anonymen Handsets auch die Messungen eines einzelnen, bewegten Telefons verwendet werden. Dies wird auch als Solo Matrix bezeichnet. Dann werden die Zeitmessungen an verschiedenen Positionen des Mobiltelefons dazu genutzt, um das Network Timing Model zu berechnen, und die Messung an der aktuellen Position, um diesen Ort zu bestimmen. Es ist weiters möglich, aus allen Messungen in einem Berechnungsschritte alle Positionen des Mobiltelefons zu bestimmen, und man erhält somit die Trajektorie des bewegten Telefons. Die erreichbare Positionierungsgenauigkeit der Matrix Methode entspricht dem E-OTD Verfahren und es konnten Genauigkeiten im Bereich von 50 bis 100 m bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 67 % im GSM Netzwerk bei verschiedenen Tests erzielt werden. Eine Kombination von Matrix mit der Satellitenpositionierung wird als Enhanced GPS (E-GPS) bezeichnet. In diesem Fall ist im Telefon sowohl ein GPS Empfänger eingebaut als auch die Solo Matrix Funktion integriert. Wie beim gebräuchlichen Verfahren des Assisted GPS (A-GPS) stellt die Matrix Funktion Hilfsdaten, wie Näherungskordinaten und Zeitinformationen, für die GPS Positionierung zur Verfügung. Damit kann die Zeit für die Satellitenakquisition reduziert und die Reichweite von GPS erhöht werden.

Neben dem Mobiltelefon gewann der Einsatz von WLAN (Wireless Local Area Networks) in den letzten Jahren an großer Bedeutung. WLAN verwendet Funksignale, die auf dem internationalen Standard IEEE 802.11 des Instituts of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) basieren (siehe z.B. Schill 2004). In einem WLAN Netz gibt es sog. Access Points (oder Hotspots), die vergleichbar mit den Basisstationen in einem Mobilfunknetz sind. Der Nutzer kann mit Hilfe verschiedener Verfahren geortet werden. Als Messgröße eignet sich der

Signalpegel der Funksignale, die von verschiedenen Access Points empfangen werden. Aus der Signalstärkemessung kann eine Distanz zwischen dem Access Point und der aktuellen Position des Nutzers abgeleitet werden und über Trilateration der Ort des Nutzers bestimmt werden (siehe z.B. Bastisch et al. 2003). Dieses Verfahren hat jedoch den großen Nachteil, dass die gemessenen Signalpegel der Funksignale nicht einfach in eine Strecke umgerechnet werden können, da die Pegel nicht nur in Abhängigkeit von der Distanz zum Access Point abnehmen, sondern sehr stark von Multipath und anderen Fehlereinflüssen im Gebäude abgeschwächt werden. Diese Nachteile treten bei dem sog. Fingerprint-Verfahren nicht auf, bei dem die gemessenen Signalpegel direkt für die Positionsbestimmung herangezogen werden. Hier werden die gemessenen Signalstärken zu den Access Points nicht in Distanzen umgerechnet, sondern die Messwerte werden mit Signalpegelwerten von Kalibrierungspunkten, die in einer Datenbank gespeichert sind, verglichen, um die aktuelle Position des Nutzers abzuleiten. Für die Positionsbestimmung in einem Gebäude muss vorerst die Datenbank aufgebaut werden und es müssen dazu Kalibrierungsmessungen im gesamten Gebäude ausgeführt werden, damit festgestellt werden kann, in welchem Raum sich der Benutzer gerade befindet. Da die aktuell gemessenen Signalstärken und die in der Datenbank gespeicherten Werte in der Praxis nicht identisch sind, erfolgt die Zuweisung der Position durch Zuhilfenahme statistischer Kenngrößen. Verbunden mit einer Postprocessing Bearbeitung zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Position reicht für diese Methode als Minimalkonfiguration die Messung zu einem Access Point aus. Von der Fa. IMST werden 1 bis 3 m als erreichbare Genauigkeit für die Positionierung in einem Testgebäude angegeben (Imst 2004). Der große Vorteil von diesem Verfahren ist die wesentlich höhere Positionierungsgenauigkeit im Vergleich zur Signalstärkemessung mit Distanzbestimmung. Der Einrichtungsaufwand (Kalibrierung des Messsystems) ist allerdings sehr groß und bei baulichen Veränderungen müssen neue Referenzen in der Datenbank hinterlegt werden (Retscher und Thienelt 2004).

Ultra Wideband (UWB) Systeme, welche Bandweiten über 1 GHz einsetzen, wurden zur Datenübertragung mit hohen Übertragungsgeschwindigkeiten entwickelt und unter IEEE 802.15.3a standardisiert. Diese können zur genauen Laufzeitmessung (Time of Arrival ToA) oder Laufzeitdifferenzmessung (Time Difference of Arrival TDoA) von Signalen mehrerer Basisstationen für die Positionsbestimmung in Gebäuden eingesetzt werden (Pahlavan et al. 2002, Kong et al. 2004). Im Gegensatz zu WLAN konnte gezeigt werden, dass UWB Signale nicht von Multipath beeinträchtigt werden und sich somit besonders zur Distanzmessung in Gebäuden eignen (Win and Scholtz 1998). Kong et al. (2004) konnte Positionierungsgenauigkeiten im Bereich von 0.2 to 1 m bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 67 % für die Positionierung in einem Bürogebäude mit Messungen zu 8 Basisstationen erreichen.

Radio Frequency Identification (RFID) wird in der Konsumgüterindustrie für die berührungslose Übertragung von Produktinformationen eingesetzt und wird in Zukunft höchstwahrscheinlich den Strichcode zur Produktidentifikation ersetzen. Prinzipiell besteht die RFID Technologie aus drei Komponenten, nämlich einem Transponder (oder Tag), dem Lesegerät und einer Antenne (siehe z.B. Finkenzeller 2002). Das Lesegerät kann die auf dem Tag gespeicherten Informationen lesen, wobei die Reichweite bei maximal 6 m im Falle von Tags mit eigener Stromversorgung liegt. Um RFID für die Positionierung einzusetzen, besteht die Möglichkeit die Umwelt mit RFID Tags auszustatten, auf denen der Ort gespeichert ist, und dem mobilen Nutzer ein Lesegerät samt Antenne zur Verfügung zu stellen. Möchte man RFID z.B. in der Fahrzeugnavigation einsetzen, so kann man RFID Tags entlang von

Straßenabschnitten anbringen, in denen keine Positionierung mit GNSS möglich ist (z.B. im Tunnel, unter Brücken, etc.), und das Fahrzeug mit einem RFID Lesegerät und Antenne ausstatten (Chon et al. 2004). Wenn das Fahrzeug einen RFID Tag passiert, so wird seine Kennung und zusätzliche Informationen über den Tag gelesen und man weiß somit, wo man sich gerade befindet. Dabei kann der Tag bei Fahrzeuggeschwindigkeiten bis zu 150 km/h zuverlässig gelesen werden. Eine weitere Anwendung wäre die Fußgängernavigation, wenn bestimmte Sehenswürdigkeiten (Landmarks bzw. Points of Interest) mit RFID Tags ausgestattet werden und diese zur Positionsbestimmung herangezogen werden. Dies führt zum Konzept der sog. Aktiven Landmarks (siehe Brunner-Friedrich 2004), wo der Nutzer eines Navigationssystems mit Hilfe seiner „smarten“ Umgebung seinen aktuellen Aufenthaltsort bestimmt.

Bluetooth, das ursprünglich zur Datenübertragung über kurze Reichweiten (maximal 10 m) entwickelt wurde, kann auch für die Positionierung eingesetzt werden, wenn es ausreicht, den Ort des Nutzers durch eine Zelle mit einem Radius von 10 m zu beschreiben, wenn er sich gerade im Empfangsbereich eines Bluetooth Senders befindet. Aktive Landmarks können z.B. mit Bluetooth Sendern ausgestattet werden und der Nutzer hat ein mobiles Endgerät mit Bluetooth. Betritt der Nutzer nun den Empfangsbereich des Senders wird eine Verbindung hergestellt und er erhält die Koordinaten des Landmarks übermittelt (Brunner-Friedrich 2004).

Für die Positionsbestimmung in Gebäuden wurden noch andere Methoden entwickelt, wobei einige dieser Verfahren Transponder oder Sender, die im Gebäude installiert sind, nutzen. Eine weitere Möglichkeit sind visuelle oder optische Trackingverfahren, bei denen spezielle Zielmarken im Gebäude angebracht werden, die zur Navigation und Positionsbestimmung des Nutzers eingesetzt werden (siehe z.B. Newman et al. 2004). Neue Entwicklungen im Bereich der Satellitenpositionierung haben auch GPS Empfänger hervorgebracht, die in der Lage sind, auch sehr schwache GPS Signale in Gebäuden zu empfangen. Dies wird auch als „High Sensitive“ GPS (HSGPS) bezeichnet. Untersuchungen von Lachapelle (2004) haben gezeigt, dass mit diesen Systemen jedoch eine wesentlich geringere Genauigkeit für die Positionierung in Gebäuden als bei freier Sicht zu den Satelliten in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Satelliten und deren geometrischer Konfiguration erzielt werden kann. Dabei stellt die Hauptfehlerquelle die Mehrwegausbreitung der Signale (Multipath) dar. Für eine dreidimensionale Positionierung in einem mehrstöckigen Gebäude ist auch die Angabe des korrekten Stockwerks von großer Bedeutung. Eine entscheidende Verbesserung liefert hier der Einsatz eines Barometers zur Höhenbestimmung (Retscher 2004).

3 Integration der Positionierungsverfahren

Zur Integration der Messungen der verschiedenen Sensoren wird in modernen Navigationssystemen in der Regel ein Kalman Filter eingesetzt. Ein möglicher Ansatz ist z.B. in Retscher und Mok (2004) beschrieben. Hier erfolgt eine kombinierte Positionsbestimmung aus den Messungen aller verfügbaren Sensoren in einem kaskadenförmigen Kalman Filter. Im Falle der Navigation eines Fahrzeugs kann im Anschluss die resultierende Trajektorie einer digitalen Straßenkarte mit Hilfe der Kartenvergleichstechnik (Map Matching) überlagert werden. Kealy und Scott-Young (2004) haben den Prozess des Map Matchings in den Kalman Filter Ansatz integriert, in dem die Koordinaten des zugeordneten Straßenabschnitts als zusätzliche Beobachtungen in den Filter eingeführt werden. Dies wird auch als „Intelligent

Navigation“ bezeichnet und bringt eine wesentliche Verbesserung für die optimale Schätzung der unbekannt Parameter vor allem beim Ausfall der GPS Beobachtungen. Eine kurze Beschreibung des Ansatzes findet man auch in Retscher und Kealy (2005). Dieser Ansatz soll auch für die kombinierte Positionsbestimmung eines Fußgängers im Projekt NAVIO (Gartner et al. 2004) verwirklicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz der in diesem Beitrag vorgestellten Positionierungsverfahren und –methoden führt zu einer wesentlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit und Erhöhung der Zuverlässigkeit von modernen, intelligenten Navigationssystemen und –diensten. Es ist zu erwarten, dass zukünftige Dienste (z.B. Location Based Services, mobile Navigationssysteme) vermehrt diese Technologien einsetzen werden. Aufgrund der Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden ist eine Kombination verschiedener Verfahren sinnvoll, bei der die Nachteile des einen Systems durch die Vorteile eines anderen kompensiert werden. In dem Forschungsprojekt NAVIO (Gartner et al. 2004) werden diese Technologien auf ihre Einsetzbarkeit und Leistung näher untersucht.

Literaturverzeichnis

- Bastisch H., S. Häfker, J. Krause, S. Wilking, B. Haje, 2003: Projekt NOM@D - Location Based Services. Präsentation, Kommunikationsnetze, Universität Bremen, Deutschland, <http://www.comnets.uni-bremen.de/itg/itfg521/aktuelles/fg-treffen-230103/20030120-LBS-Allgemein-v2.pdf>, Last access 01.2005.
- Beal, J. R. (2003) Contextual Geolocation - A Specialized Application for Improving Indoor Location Awareness in Wireless Local Area Networks, in: Papers presented at the Midwest Instruction and Computing Symposium MICS2003, The College of St. Scholastica, Duluth, Minnesota, USA, http://www.css.edu/depts/cis/mics_2003/MICS2003_Papers/Beal.PDF, Last access 01.2005.
- Brunner-Friedrich, B. (2004) The Use of Landmarks and Active Landmarks in Pedestrian Navigation Systems in Combined Indoor/Outdoor Environments, Technical Report, http://cartography.tuwien.ac.at/forschung/NAVIO/papers/WP3_WPG4.pdf, Last access 01.2005.
- Chon, H. D., Jun, S., Jung, H. and An, S. W. (2004) Using RFID for Accurate Positioning, in: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6-8 December, 2004, 10 pgs.
- Crossbow (2004a) IMU700CA – Fiber Optic Gyro Based IMU, Product Information, Crossbow, USA, http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Inertial_pdf/6020-0037-01_B_IMU700CA.pdf, Last access 12.2004.
- Crossbow (2004b) CXTD Digital Tilt and Acceleration Sensor, Product Information, Crossbow, USA, http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Tilt_pdf/6020-0012-01_B_CXTD.pdf, Last access 12.2004.
- Duffett-Smith, P. J. and Craig, J. (2004) Matrix, and Enhanced Satellite Positioning, Invited paper presented at the 5th IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies, Savoy Place, London, UK, 18-20 October 2004, 4 pgs.
- Finkenzeller, K. (2002) *RFID Handbook: Fundamentals and Application in Contactless Smart Cards and Identification*, Carl Hanser Verlag, Munich, Germany.
- Gartner, G., Frank, A. and Retscher, G. (2004a) Pedestrian Navigation System for Mixed Indoor/Outdoor Environments, in: Gartner G. (Ed.): *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation, TU Wien, Heft 66, Papers presented at the 2nd Symposium on Location Based Services and Telecartography, January 28-29, 2004, Vienna, Austria, pp. 161-167.
- Gartner, G., Frank, A. and Retscher, G. (2004b) Pedestrian Navigation System in Mixed Indoor/Outdoor Environment – The NAVIO Project, in: Schrenk M. (Ed.): CORP 2004 and Geomultimedia04. Proceedings of the CORP 2004 and Geomultimedia04 Symposium, February 24-27, 2004, Vienna, Austria, pp. 165-171, http://corp.mmp.kosnet.com/CORP_CD_2004/archiv/papers/CORP2004_GARTNER_FRANK_RETSCHER.PDF, Last access 12.2004.
- Honeywell (2004) HMR 3000 Digital Compass Module, User's Guide, Honeywell International Inc., USA, http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmr3000_manual.pdf, Last access 12.2004.

- IEEE 802.11 (2004) IEEE 802.11™ Wireless Local Area Networks - The Working Group for WLAN Standards, <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>, Last access 12.2004.
- Imst (2004) Indoor Locating – Imst ipos, Project c21, Presentation, IMST GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2, D-47475 Kamp-Lintfort, Germany.
- Kealy, A. N. and Scott-Young, S. (2004) An Integrated Position and Attitude Determination System to Support Real-Time, Mobile, Augmented Reality Applications, in: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6-8 December, 2004, 17 pgs.
- Kong, H., Kwon, Y. and Sung, T. (2004) Comparisons of TDOA Triangulation Solutions for Indoor Positioning, in: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6-8 December, 2004, 11 pgs.
- Lachapelle, G. (2004) GNSS Indoor Location Technologies, in: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6-8 December, 2004, 15 pgs.
- Newman, J., Wagner, M., Bauer, M., Mac Williams, A., Pintaric, T., Beyer, D., Pustka, D., Strasser, F., Schmalstieg, D. and Klinker, G. (2004) Ubiquitous Tracking for Augmented Reality, Technical Report, Vienna University of Technology, <http://www.ims.tuwien.ac.at/media/documents/publications/ubitrackismar04.pdf>, Last access 12.2004.
- Pahlavan, K. Li, X. and Mäkelä, J.-P. (2002) Indoor Geolocation Science and Technology, *IEEE Communications Magazine*, February 2002, pp. 112-118.
- PointResearch (2004) DRM-III Dead Reckoning Module - Engineering Development Tools, PointResearch Corporataion, USA, http://www.pointresearch.com/drm_eval.htm, Last access 12.2004.
- Retscher, G. and Mok, E. (2001) Integration of Mobile Phone Location Services into Intelligent GPS Vehicle Navigation Systems, in: Papers presented at the 3rd Workshop on Mobile Mapping Technology, January 3-5, 2001, Cairo, Egypt.
- Retscher, G. (2002) Diskussion der Leistungsmerkmale von Systemen zur Positionsbestimmung mit Mobiltelefonen als Basis für Location Based Services, in: Papers presented at the Symposium on Telekartographie, January 28-29, 2002, TU Wien, Austria, published as *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, No. 58, Institute of Cartography, Vienna University of Technology, Austria, pp. 41-58.
- Retscher, G. (2004) Multi-sensor Systems for Pedestrian Navigation, in: Papers presented at the ION GNSS 2004 Conference, September 21-24, 2004, Long Beach, California, USA, CD-Rom Proceedings, 12 pgs.
- Retscher, G. and Mok, E. (2004) Sensor Fusion and Integration using an Adapted Kalman Filter Approach for Modern Navigation Systems, *Survey Review*, Vol. 37, No. 292 April 2004, pp. 439-447.
- Retscher, G. and Thienelt, M. (2004) Die Zukunft des Einkaufens – Was können Geodäten dazu beitragen? *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, Wichmann Verlag, Heidelberg, AVN 11/12, pp. 387-393.
- Retscher, G. and Kealy, A. (2005): Ubiquitous Positioning Technologies for Intelligent Navigation Systems. in: Papers presented at the 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2005, University of Hannover, Germany, March 17-18, 2005, 10 pgs.
- Schill, A. (2004) Drahtlose lokale Netzwerke, WLAN, Vorlesungsunterlagen „Mobile Kommunikation und Mobile Computing“, Institut für Systemarchitektur, Fakultät Informatik, TU Dresden, Deutschland, http://www.rn.inf.tu-dresden.de/scripts_lsrn/lehre/mobile/print/08.pdf, Last access 08.2004.
- Vaisala (2004) PTB220 Digital Barometer, Vaisala, Finland, http://www.vaisala.com/DynaGen_Attachments/Att2468/PTB220%20Brochure.pdf, Last access 12.2004.
- Win, M. and Scholtz, R. (1998) On the Performance of Ultra-Wide Bandwidth Signals in Dense Multipath Environment, *IEEE Commun. Letters*, Vol. 2, No. 2, Feb. 1998, pp. 51-53.

Acknowledgements

Die in dieser Arbeit präsentierte Forschung wird vom FWF Projekt NAVIO (Fußgängernavigation in Gebäuden und im städtischen Umfeld) des Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung, Österreich, Projektnr. P16277-N04, unterstützt.

Anschrift:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günther Retscher
 Institut für Geodäsie und Geophysik
 Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
 Technische Universität Wien
 Gusshausstrasse 27-29
 A-1040 Wien

NSDI based on Spatial Databases

Miodrag Roić
Institute of Engineering Geodesy and
Spatial Information Management
University of Zagreb

Summary

Primary purpose National Spatial Data Infrastructure (NSDI) is generally best possible usage of spatial data funds, which includes efficient data collection, better processing and storage and most importantly a prompt delivery to its users. Different data sources, with different accuracy, nature, models and other factors make it quite a challenge for a NSDI to manage. Only by properly modeling fundamental layers of a spatial data fund, which include cadastral and topographical databases, an efficient NSDI can be created.

The paper presents an overview of SDBMS technology's development and current status, combined with a short analysis of requirements potentially posed to it by the NSDI. Also some remarks on the modeling of state's fundamental spatial data layers (cadastral and topographical) in view of realization of some derived systems are given.

Key words: NSDI, Spatial database

Zusammenfassung

Das Hauptziel der Nationalen raumbezogenen Dateninfrastruktur (NSDI) ist im allgemeinen die bestmögliche Anwendung von raumbezogenen Datenvorräten, was eine wirkungsvolle Datensammlung, bessere Bearbeitung und Speicherung, und am wichtigsten, unverzügliche Auslieferung an ihre Benutzer einschliesst. Verschiedene Datenquellen mit unterschiedlicher Genauigkeit, Natur, Modellen und anderen Faktoren macht es ziemlich herausfordernd für NSDI, dies zu schaffen. Eine wirkungsvolle NSDI kann nur durch richtig modellierte Grundschichten der raumbezogenen Datenvorräten, die Kataster- und topographischen Datenbanken umfassen, kreiert werden.

Die Arbeit stellt den Übersicht von der Entwicklung der SDBMS-Technologie, wie auch den gegenwärtigen Status, kombiniert mit einer kurzen Analyse der seitens NSDI an sie potenziell erhobenen Forderungen. Es werden auch einige Bemerkungen mit Bezug auf die Modellierung von den fundamentalen raumbezogenen Staatsdatenschichten (Kataster- und topographische) im Licht der Realisierung von einigen hergeleiteten Systemen gegeben.

Schlüsselworte: NSDI, raumbezogene Datenbanken

1 Introduction

In last ten or so years there has been very much talk and papers about the NSDI. All the definitions have been given on conceptual level (Phillips et al. 1999), and some advanced perspectives reviewed (Rajabifard et al. 2002) and trends described (Ryttersgaard 2001). Majority of the papers describe high level data models and semantics, needs for data standardization in order to enable interchange, data and system hierarchies and of course large amount of work on specific national needs and approaches.

However there has not been very much talk about lower level system (especially clearing-house) configurations. This is quite important because of the vast amount of the data being collected in last several years thanks to advanced collection technologies and techniques. Even when considering a less structured data model it is quite a challenge to manage very large databases, and spatial data is highly structured in nature. In order for clearinghouse to serve its purpose appropriately it must be able to efficiently respond to spatial queries and provide users with information about available spatial data for a specific part of Earth's surface.

In order to understand challenges met in this area, some general knowledge about spatial information systems and spatial database concepts is necessary.

2 Spatial data management systems

Spatial and any other data management systems exist as long as human civilization, but with the development of computer technology they tend to develop more rapidly. Depending on their primary purpose one could recognize two types of information systems:

- transaction processing systems and
- decision support systems.

Transaction processing systems manage very large databases with a large amount of transactions in time, but have analytical capabilities limited to a smaller set. On the other hand, decision support systems deal with (relatively) smaller data sets but must be able to promptly respond to a great variety of analytical queries. A typical example of the former is cadastral and of the latter facility management system.

2.1 Evolution

Although it is not always easy to strictly differentiate stages in the process of evolution of spatial data management systems, one general classification can be introduced as follows.

First commercially available and usable architecture of spatial data handling systems was based on separated spatial and non-spatial data segments management and called the "dual architecture". Spatial data was handled by a CAD or CAD-like system and the thematic data was stored in a standard (relational) database management system. Both segments of spatial object were then connected by common unique identifier (Figure 1).

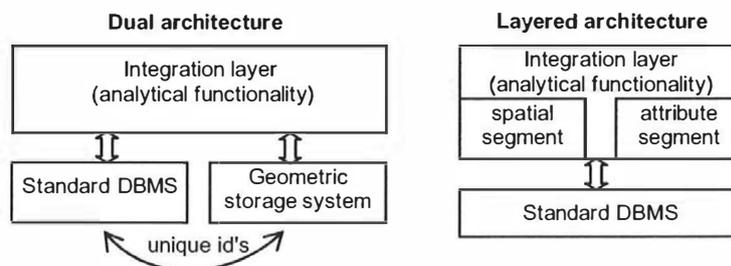


Figure 1: *Early spatial data management systems architectures*

Typical usage scenario included querying database and geometric subsystems separately in order to compose and/or analyze the object or set of objects. Apart from the fact that those

two subsystems were completely separated resulting in poor performance caused by inability to optimize querying, most important drawbacks were, almost impossible task of maintaining consistency between the two separate systems and a great deal of data redundancy. This means that a spatial component of an object can be changed without these changes being "seen" by the other part of the system (or vice versa), unless a great deal of manual work by the user is conducted.

In order to overcome dual architecture's drawbacks a second one, called layered architecture was researched and developed (Figure 1). Dual architecture's main problem being two separated systems responsible for each its own data segment resulted in idea of storing both spatial and non-spatial data in the same database management system. Integration layer in this case is "sitting" on top of a standard (relational in most cases) DBMS and is managing both spatial and descriptive data segments of the systems objects. Spatial segment was often modeled as a structured set of topological and geometric primitives implemented in relational model in the lowest level (database).

Nevertheless, with object-oriented modeling techniques gaining significance in spatial data management community, often the case was having a lot of object-oriented features available in integration layer where all of the modeling had to be conducted. Non-native support for spatial data types within the lowest layer (database) of this architecture narrows its usage to a mere data warehouse. The entire logic of the system is now contained within the integration layer requiring a significant amount of programming in order to make analytical querying, consistency checking and other functionality that needed to be available to the user. Again, apart from some simple low level indexing, no tools are available for system performance boosting, painfully needed when managing large amounts of data during multiple simultaneous transactions.

Finally, with database vendors discovering the importance of spatial data handling capabilities integrated within systems low-level structure, first integrated architecture solutions emerged. Spatial data primitives become available for data modeling and querying just as any other "standard" data type and equally as important, increasing level of analytical functionality become integrated within a standard data structure. Integrated architecture based systems are more than capable of query performance and storage size optimization, primarily thanks to the native spatial data integration and are therefore justly called spatial database management systems (SDBMS). Various configurations of middleware models are met here. One approach is based on front end applications provided by traditionally GIS-oriented vendors serving primarily as user interface and/or providing additional level of analytical functionality, relying on spatial database management systems for data storage, management and analysis. Second one is fully SDBMS based, provided it offers required analytical functionality and user interface implementation capabilities, and they certainly do (Figure 2).

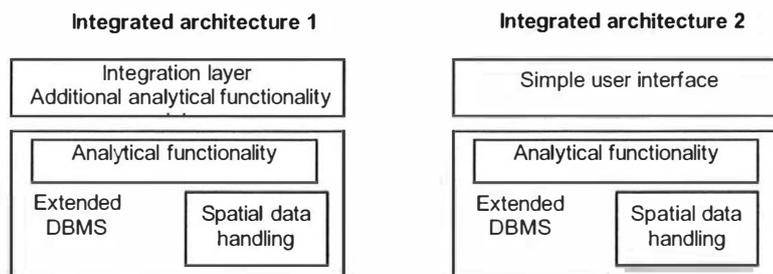


Figure 2: Contemporary system architectures

Each of the approaches is a bit more suited for different kind of system implementation, depending on whether its primary purpose is transaction processing or decision support, but without excluding each other. Another important fact here is data modeling approach (Roić et al, 2002; (Matijević, 2004). Especially when developing data model for systems dealing with very large and transaction intensive data sets, logical data model should not be based on user interface level but on the core engine of the system here being the SDBMS. In other words user interface must be adjusted to data model and not vice versa. This is best accomplished by keeping the development of data model unaware of the interface until it is almost done.

2.2 Spatial indexing, why is it so important?

In order to understand spatial capabilities of SDBMS one should be generally familiar with at least a half of its core technology, spatial indexing (the other half, spatial relationships and operators will not be considered here). Large amount of spatial indexing approaches and techniques have been proposed, some researched and few of them finally found their application in various fields of spatial data handling. In spatial databases spatial indexes are a crucial component primarily due to a large amount of data to be tested for certain spatial relationship. Testing these relationships is always computationally intensive and reducing the data set to be tested significantly improves performance of the system. Spatial query is typically performed in two steps, sometimes called primary or filtering step and secondary or refinement step (Figure 3). First low-cost (computationally not intensive) step tests larger amount of data to select a smaller subset that could be spatially related. Having selected these candidates, a second, higher-cost step with computationally intensive operations refines the set leaving only objects that satisfy required conditions.

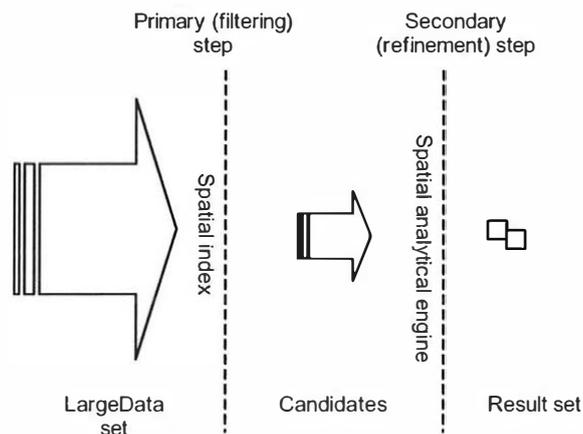


Figure 3: *Spatial query processing*

3 Use cases

Why is it so important and how can NSDI benefit from spatial databases? First of all, neither SDBMS nor any other technology isn't better just by itself. In case bad planning, superficial requirements analysis or some other careless steps during the data modeling phase should occur, no technology will "save the day". It simply provides powerful tools for the people involved in development of the data model.

In order to achieve the best possible integration, nation's fundamental spatial datasets (cadastral, topographic, ...) should be developed on similar models (Ryttersgaard 2001). One of the benefits from integrating these fundamental datasets is the ability to simply derive new data from the existing. Although it is not necessary to use the same or even similar technological basis here, it being the case certainly makes it easier. Also, with the fact that these datasets are often handled by the state, choosing common technological basis for them isn't unimaginable.

Land administration systems have always been an important part of a state's apparatus, viewed in either traditional (ownership, value and land use) or more contemporary way (land market support). Be its primary purpose land market support, land taxation or land reconsolidation some sort of land valuation system is a must-have for every modern state. Depending on a general level of state's economic strength, and of course its primary purpose, such system's output as well as input shall differ. Provided data models are compatible, one simple example could be derived from earlier mentioned fundamental databases. It is possible, and fairly simple, to combine data from these two databases in order to derive some new data. Elevation data from DTM which should be a part of topographic database can provide input for calculation of 3D spatial orientation and slant for a chosen parcel or set of them thereby broadening user's perception of its value. Also additional datasets can be introduced (land market value regions) to, combined with previously gathered data additionally enrich the user's perception of a certain part of the land (Figure 4).

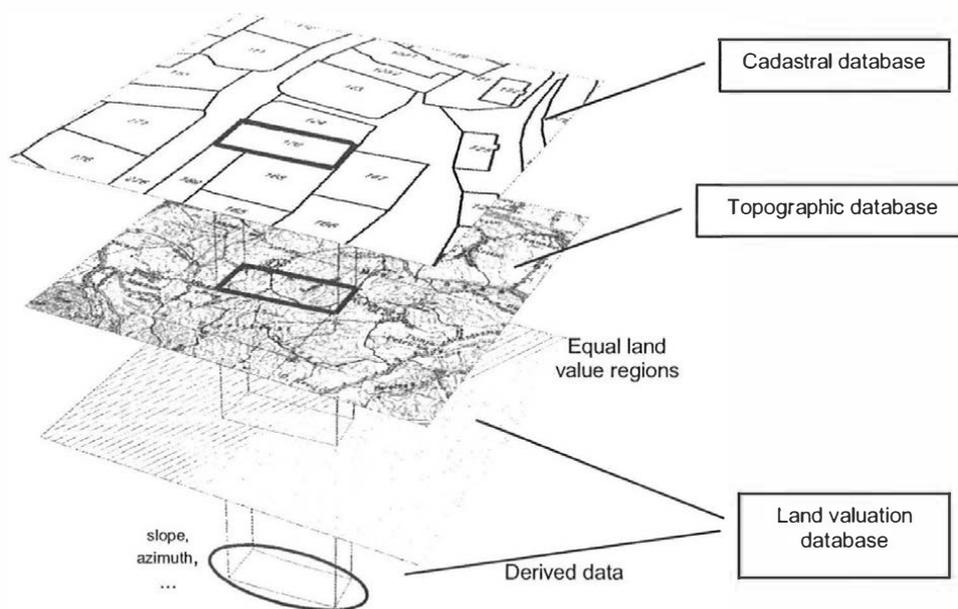


Figure 4: *Land valuation system concept*

In order to be able to implement such a derived system, all data serving as input must be reachable in a fast and efficient manner. With nation-wide data sets this is possible only if data is spatially indexed for fast access.

One of the most important parts (at least in the implementation level) of NSDI is a service keeping data about all available data within some administrative area or a whole state. The data about data is called metadata and the service which manages it is usually called the

Clearinghouse. So, the Clearinghouse is in charge of managing very large spatial database because metadata has to be spatially referenced to serve its purpose. Be it in form of exact polygons enclosing a region for which some spatial data is available, or a MBR-like generalized one, some centralized database managing this data must exist. If latter is the case a first tier of a multi-tier service could perform a primary-filter like operations giving more general view of some area's spatial data fund and directing user to a second more detailed service in any configuration regarding its implementation. Ability to answer to questions like:

which sets data of ± 2 cm accuracy, not older than 6 months, in digital form are available for the circle-like area with center in coordinates x, y and of 1 km radius

is a must for a clearinghouse service and is viable only if metadata is spatially indexed. Again, it would make data access and analyze processes including different databases more efficient if data was stored and (spatially) indexed in one common format.

Conclusions

In last twenty or so years spatial data management systems have significantly developed their quantitative as well as qualitative capabilities. Newest of the products of constant research and development in this field is spatial database management technology with several stable and advanced products available on the market. Management of very large spatial databases today in many cases, especially state level, is based on spatial databases, be it only as "smart" data warehouse for some GIS front end, or a complete solution.

NSDI and of course SDI in general, should and does cope with very large spatial databases and should therefore seriously consider SDBMS as a basis for its forming or evolution, to enable further growth and development.

References

- Matijević, H. (2004): Modelling Cadastral Data, Master Thesis, Faculty of Geodesy - University of Zagreb, Zagreb.
- Phillips, A., Williamson, I., Ezigbalike, C. (1999): Spatial Data Infrastructure Concepts, the Australian Surveyor, 44(1).
- Rajabifard, A., Feeney, M., Williamson, I. (2002): Directions for the Future of SDI Development, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 4(1).
- Roić, M., Matijević, H., Cetl, V. (2002): Object-oriented Cadastre Modelling, Proceedings of Faculty of Geodesy – University of Zagreb, Zagreb.
- Ryttersgaard, J. (2001): Spatial Data Infrastructure - Developing Trends and Challenges, International Conference on Spatial Information for Sustainable Development, Nairobi.

Adress:

Prof. dr. sc. Miodrag Roić
University of Zagreb - Faculty of Geodesy
Institute of Engineering Geodesy and Spatial Information Management
Kačićeva 26, Zagreb, HR-10000
Email: mroic@geof.hr, Web: <http://www.geof.hr/~mroic>

Lebenslauf

O. UNIV. PROF. DR.-ING. HERIBERT KAHMEN

Geburtsort / Staatsangehörigkeit

Deutsch, geboren am 23. März 1940 in Senne I nahe Bielefeld, Deutschland
Seit 1986 deutsche und österreichische Staatsbürgerschaft

Privatanschrift

Lawieserstraße 33
A-3013 Tullnerbach, Austria
Tel: +43 (2233) 54166,
Fax: +43 (2233) 54166

Gegenwärtige Stellung

Leiter der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie des
Instituts für Geodäsie und Geophysik
Technische Universität Wien
Gusshausstraße 27 - 29/E128-3
A-1040 Wien, Österreich
(Tel) +43 (1) 58801 12840
(Fax) + 43 (1) 58801 12894
(e-mail) Heribert.Kahmen@tuwien.ac.at
<http://info.tuwien.ac.at/ingeo>

Präsident der
Special Commission SC4 on „Applications of Geodesy to Engineering“
der International Association of Geodesy (IAG)

Fachliche Kompetenz

Geodäsie, Ingenieurgeodäsie, Hydrographie, Ortung mit Satelliten, Geodätische
Messtechnik, Deformationsmessungen und -analyse

Akademische Grade

- | | |
|------|--|
| 1973 | Dr.-Ing. (Ph.D.) in Ingenieurvermessung; Universität Bonn,
Deutschland |
| 1965 | Dipl.-Ing. (Diplomingenieur) der Geodäsie, Technische Universität Berlin,
Deutschland |

Berufserfahrung

- 1986 *Professor*, Technische Universität Wien (Österreich)
[Ingenieurgeodäsie, Deformationsmessungen, Deformationsanalyse, Messroboter, computergestützte Messsysteme]
- 1978 - 1986 *Professor*, Universität Hannover (Deutschland)
[Geodätische Messtechnik, Ingenieurgeodäsie]
- 1973 - 1978 *Oberingenieur*, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (Deutschl.)
[Geodätische Messtechnik, Elektronische Messtechnik, Stochastische Prozesse und geodätische Netze]
- 1969 - 1973 *Forschungsassistent*, Universität Bonn (Deutschland)
[Geodätische Messtechnik, Elektronische Messtechnik]
- 1966 - 1969 *Referendar*, Land Niedersachsen (Deutschland)
- 1965 - 1966 *Forschungsassistent*, Technische Universität Berlin (Deutschland)
[Photogrammetrie, Computer Software]

Konferenz-Organisationen

- 1989, 1993, 1995, Direktor der Internationalen Konferenz „Optical 3-D
1997, 2001, 2003, Measurement Techniques“ (abwechselnd in Wien und Zürich,
2005 zusammen mit Prof. Dr. Grün, ETH Zürich)
- 1998 Direktor der Internationalen Konferenz „Geodesy for Geotechnical
and Structural Engineering“ in Eisenstadt, zusammen mit Prof. Dr.
Brückl und Prof. Dr. Wunderlich
- 2002 Direktor der Internationalen Konferenz „Geodesy for Geotechnical
and Structural Engineering II“ in Berlin, zusammen mit Prof. Dr.
Niemeier

IAG (International Association of Geodesy) Aktivitäten

- Seit 2002 Chair der Sub-Commission 4.2 “Applications of Geodesy to
Engineering”
- Von 1995 bis 2002 Präsident der IAG Special Commission 4
„Applications of Geodesy to Engineering“
- Von 1983 bis 1986 Präsident der IAG Study Group I : 78
„Atmospheric effects on terrestrial geodetic measurements“

- | | |
|-------------------|--|
| Von 1979 bis 1983 | Mitglied der IAG Study Group I : 68
„Terrestrial interferometric methods for Geodesy and Geodynamics“ |
| Von 1976 bis 1979 | Mitglied der IAG Study Group I : 42
„Electromagnetic wave propagation and refraction in the earth`s atmosphere“ |

IUSM (International Union for Surveys and Mapping) Aktivitäten

- | | |
|-------------------|---|
| Seit 1995 | Chairman der IUSM Working Group
„Automated Control Measurements“ |
| Von 1992 bis 1995 | Mitglied der IUSM Working Group
„Automated Control Measurements“ |

Weitere internationale Aktivitäten

- | | |
|-----------|--|
| Seit 1993 | Korrespondierendes Mitglied der „Brazilian Geodetic Commission“ |
| Seit 1993 | Korrespondierendes Mitglied der „Deutschen Geodätischen Kommission“ (DGK) |
| Seit 1991 | Mitglied der „International Association for Bridge and Structural Engineering“ |
| Seit 1986 | Mitglied der Österreichischen Geodätischen Kommission |

Patente

Patent Dokument DE 3324489 C2 23. 05. 1985
Das erste motorgetriebene selbstzielende elektronische Tachymeter wurde entwickelt. Seit dieser Zeit sind Instrumente dieses Typs Standard in der Geodäsie. Die Entwicklung wurde finanziert von der „Rheinischen Braunkohlenwerke AG“, Köln, Deutschland. Die Hauptaufgabe des ersten Instruments war die Überwachung der Randböschungen im Braunkohletagebau.

Auszeichnungen

„Internationaler Carl-Pulfrich Preis 1981“ für theoretische Modellstudien, Sensorentwicklungen und Publikationen im Bereich der elektronischen Messtechnik in der Geodäsie.

Gastprofessuren

Juli 1977	University of Thessaloniki (Griechenland)
September 1978	University of Beograd (Jugoslawien)
1981 - 1984	University of Curitiba (Brasilien)
Seit 1984	University of Recife (Brasilien)
Juni- November 1982	University of New Brunswick, Fredericton (Kanada) Mitglied im Forschungsprojekt: Improvement of Loran-C propagation modelling for off-shore navigation
Juli - Oktober 1984	University of New Brunswick, Fredericton (Kanada) Mitglied im Forschungsprojekt: Improvement of Loran-C propagation modelling for off-shore navigation
Juli 1990	University of Zagreb (Jugoslawien)
Februar 1991	University of Calgary (Kanada) Masterstudiengang: Positioning and Navigation for Industrial Processes
Mai - September 1996	University of New Brunswick (Kanada) Mitglied im Forschungsprojekt: Navigation of Industrial Processes with high precision GPS
September-Oktober 1998	Wuhan University (China)
August 2001	Wuhan University (China)
Juli - August 2002	University of Calgary (Kanada) Masterstudiengang: Positioning and Navigation for Industrial Processes
August 2003	Wuhan University (China)
Jänner 2004	Sarajevo University (Bosnien)

Beratungstätigkeit und Industrie-Forschungsprojekte seit 1971

1. 1971	Verdichtung des Geodätischen Netzes 1. Ordnung in Algerien
	<u>Ort:</u> Atlas Region im Südosten von Algerien
	<u>Unternehmen:</u> Hansa-Luftbild D-4400 Münster (Deutschland)

2. 1982 - 1986 Entwicklung und Installation eines vollautomatischen Messsystems zur Überwachung der kinematischen Prozesse der Randböschungen im Braunkohletagebau (Entwicklungskosten 2.000.000 DM)
- Ort: Hambach bei Köln
Unternehmen: Rheinische Braunkohlenwerke AG
 Stuettegenweg 2
 D-50935 Köln (Deutschland)
3. 1984 - 1989 Entwicklung und Installation eines vollautomatischen Messsystems für die hochpräzise Navigation von Kletterschalungssystemen der sechs höchsten Kühltürme der Welt (1984) (Höhe 170m, Durchmesser 165m)
- Baustelle: Johannesburg, Südafrika
Unternehmen: Balcke Dürr AGG
 Homberger Str. 2
 D-40882 Ratingen (Deutschland)
4. 1984 - 1994 Einrichtung von Forschungslaboratorien (Geodätische Messtechnik)
- Ort: Universida de Federal de Pernambuco, Recife (Brasilien)
5. 1985 - 1995 Entwicklung und Installation von Messsystemen und Deformationsauswertelgorithmen für die hochgenaue Erfassung von großen Schalenstrukturen bei Kernkraftwerken (Überprüfung der Grundplatte mittels hydrostatischem Nivellement bestehend aus 85 Sensoren; Überprüfung der Schale mit einem vollautomatischen Messsystem, Entwicklungskosten 1.000.000 DM)
- Ort: Neckarwestheim bei Stuttgart
Unternehmen: Balcke Dürr AG
 Homberger Str. 2
 D-40882 Ratingen (Deutschland)
6. 1988 - 1994 Entwicklung und Installation des ersten GPS-basierten Messsystems für die Vermessung des Flussbettes der Donau in Österreich
- Ort: Donau, Österreich
Unternehmen: Österreichische Donaukraftwerke AG
 A-3370 Ybbs (Österreich)
7. 1990 – 1991 Entwicklung und Installation eines computergestützten Messsystems zur Deformationsmessung von großen Brücken bei Belastungstests
- Baustelle: Donaubrücke, Bratislava, Slowakei
Kooperationspartner: University of Bratislava, Department of Engineering Surveys
 SQ 81368 Bratislava (Slowakei)

8. 1993 - 1994 Entwicklung und Installation eines computergestützten hydrostatischen Nivellements-systems zur Beobachtung der Deformationen der Turbinenhalle eines Wasserkraftwerks (während des Tunnelbaus für eine weitere Turbine)
- Baustelle: Ybbs, Österreich
Unternehmen: Österreichische Donaukraftwerke AG
A-3370 Ybbs (Österreich)
9. 1994 - 1995 Entwicklung von GPS-basierten Messsystemen für die Absteckung und Qualitätskontrolle von Schienenwegen
- Ort: Wien, Österreich
Unternehmen: Porr AG
A-1010 Wien
10. 1996 - 1997 Konzeptionelle Entwicklung von geodätischen Netzen für die Hochgeschwindigkeitstrasse: Frankfurt - Köln
- Baustelle: Frankfurt-Köln (Deutschland)
Unternehmen: Geo Data
A-3800 Leoben (Österreich)
11. seit 1998 Entwicklung eines technischen Informationssystems für den Tunnelbau unter Ausnutzung von Methoden der Künstlichen Intelligenz
- Baustellen: in Österreich
Company: Geo Data
A-3800 Leoben (Österreich)
12. seit 1999 Entwicklung eines wissensbasierten Mess- und Bewertungssystems für die Vorhersage von Hangrutschungen
- Baustellen: Drei-Schluchten-Damm (China)
Company: Bureau of Geotechnique of Chiangjiang Water Resources Commission, Wuhan (China)
13. seit 2000 Entwicklung von GPS-basierten Navigationssystemen zur Optimierung des Bauprozesses bei Hochhäusern mit Fertigbaumodulen. Das primäre Ziel der Entwicklung ist die transportbegleitende Erfassung von Position und Orientierung des einzelnen Moduls bis zum hochpräzisen Einbau
- Baustellen: in Österreich
Unternehmen: Firma Mischek
Wien (Österreich)

Auszug aus Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in den Bereichen: Exakte Ingenieurwissenschaften, Deformationsmessungen und Deformationsanalyse, Multisensorsysteme, Anwendung von Messrobotern, Navigationssysteme, Echtzeitanwendungen

- 1) KAHMEN, H.
Untersuchung von analogen und digitalen Phasenmeßsystemen in der elektrooptischen Entfernungsmessung
Veröffentlichungen der Deutschen Geodätischen Kommission in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft 186, München 1973.
- 2) BRÜGGERMANN, G., HALLERMANN, L., KAHMEN, H.
Mikrometeruntersuchungen an Sekundentheodoliten
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 3/1973.
- 3) KAHMEN, H.
Statistical Analysis of the Irregular Phase Fluctuations in Electromagnetic Distance Measurement
Vorlage und Vortrag, International Seminar on Electromagnetic Distance Measurement, Lagos, 1973.
- 4) KAHMEN, H.
Die Bedeutung des Lasers für die Geodäsie
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 7/1974.
- 5) KAHMEN, H.
Numerical Filtering of Trilateration Networks
Vortrag und Vorlage, XVI. Generalversammlung der IAG in Grenoble, August 1975.
- 6) KAHMEN, H., SCHNÄDELBACH, K.
Berichte zur XVI. Generalversammlung der IUGG-Assoziation für Geodäsie
Sektion I - Geodätische Netze. Sonderheft der Zeitschrift für Vermessungswesen 1976.
- 7) KAHMEN, H.
Some Considerations on the Stochastic Behaviour of the Angles of Refraction and the Refraction Indices, concerning Laser- and Microwave Distance Measurements
International Symposium on Electro-Magnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric Refraction, Wageningen 1977.
- 8) KAHMEN, H.
The estimation of weights of meteorologically influenced measurements
DGK Reihe B, Nr. 252, München 1980.
- 9) KAHMEN, H.
Anwendung der stochastischen Prozesse auf die Modellbildung am Beispiel der Vertikalwinkelmessung und elektronischen Entfernungsmessung
In: Pelzer, H. (Hrsg.) Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1980.

- 10) KAHMEN, H.
Geodätische Messtechnik und die Theorie der Zufallsfunktionen
 In: Festschrift 100 Jahre Geodätische Lehre und Forschung in Hannover, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover 1981.
- 11) KAHMEN, H.
Neuere Instrumente und Methoden der Ingenieurvermessung
 VDI-Berichte 472, Frankfurt 1983.
- 12) KAHMEN, H., SCHWÄBLE, R., SUHRE, H.
Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter
 Zeitschrift für Vermessungswesen 8/1983.
- 13) KAHMEN, H.
Determination of Refraction - Free Directions by the Two Colour Method
 In: Pelzer, H., Niemeier, W. (Hrsg.), *Precise Levelling*, Dümmler, Bonn 1983.
- 14) KAHMEN, H.
Polare Vermessungssysteme zur Erfassung kinematischer Vorgänge
 In: Pelzer (Hrsg.): *Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung*, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 1985.
- 15) KAHMEN, H.
Grundlagen zur Erfassung und Verarbeitung stochastischer und deterministischer Signale
 In: Pelzer (Hrsg.): *Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung*, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 1985.
- 16) KAHMEN, H.
Erfassung und Analyse kinematischer Vorgänge an Hoch- und Erdbauten in der Ingenieurgeodäsie
 In: Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der T. U. Wien, 1986.
- 17) KAHMEN, H.
Surveillance de zones de glissements et de modifications tectonique; le systeme tacheometrique GEOROBOT a visee automatique
 Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1987.
- 18) KAHMEN, H., SCHWARZ, J., WUNDERLICH, TH.
GPS-Messungen im Testnetz „Neue Welt“
 Österr. Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, 1987.
- 19) KAHMEN, H., STEUDEL, J.
Das automatisch zielende Meßsystem GEOROBOT II
 In: Schnädelbach, Ebner (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 88*, Dümmler Verlag, Bonn 1988.
- 20) DAMJAKOB, H., KAHMEN, H.
Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken durch rechnergestützte vektorielle Vermessungssysteme am Beispiel von Naturzugkühltürmen
 Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1989.

- 21) KAHMEN, H. STEUDEL, J.
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Echtzeitüberwachung von Böschungssystemen beim Abbau von Braunkohle mit dem Messsystem Georobot
 In: Grün/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D-Measurement Techniques, Karlsruhe 1989.
- 22) KAHMEN, H.
Polare Ortungsverfahren in der Hydrographie
 27. DVW Workshop, Oldenburg 1991.
- 23) KAHMEN, H.
Hybrid Measurement Robots in Engineering Surveys
 ISPRS Congress, Washington 1992.
- 24) KAHMEN, H.
Hochpräzise Zielerfassung durch Roboterteodolite
 In: Matthias/Grün (Hrsg.): Ingenieurvermessung 92, Bonn 1992.
- 25) KAHMEN, H. (Hrsg.)
Industrievermessung
 Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 11 -12/93. Wichmann Verlag, 1993.
- 26) KAHMEN, H.
Optische 3-D-Messverfahren mit Messrobotern
 Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1993.
- 27) KAHMEN, H., PALTE, G.
Filteransätze für die Prädikation der Bewegungen von Objektpunkten in Rutschungsgebieten
 Mitteilungen der Geodätischen Institute der Universität Graz, Folge 78. 1993.
- 28) DÖLLER, H., KAHMEN, H.
Gewässervermessung auf der Donau nach neuen DGPS-Konzepten
 Zeitschrift für Vermessungswesen, 1994.
- 29) KAHMEN, H., KOPACIK, A., STANEK, V., VYBRIAL, P.
Bestimmung von 2-D-Deformationen mit Beschleunigungssensoren
 FIG XX. International Symposium on Deformations, Istanbul September 1994.
- 30) KAHMEN, H.
Deformation Measurements, Deformation Analysis and Quality Control for Large Shell-Type Structures
 1st Turkish International Symposium on Deformations, Istanbul, September 1994.
- 31) KAHMEN, H., ROIC, M.
A New Generation of Measurement Robots for Object Reconstruction without Targeting
 Int. Conference „On Optical 3-D Measurement Techniques III, Wien 2. - 4. Oktober 1995.
- 32) KAHMEN, H.
Static and Kinematic Positioning with GPS for the Construction and Maintenance of High Speed Railway Lines
 Scientific Assembly of the International Association of Geodesy. Rio de Janeiro, 3. - 9. 9. 1997.

- 33) MISCHKE, A., KAHMEN, H.
A New Kind of Measurement Robot Systems for Surveying of Non Signalized Targets
 4th International Symposium on "Optical 3-D Measurement Techniques", Zürich, 29.
 9. - 2. 10. 1997.
- 34) KAHMEN, H., WUNDERLICH, TH.
Investigation of the Deformation Pattern in The Karawanken Region
 In: Festschrift f. Prof. Mertikas, Univ. of Thessaloniki, Greece, 1997.
- 35) KAHMEN, H., MENTES, G.
Contribution to the Dynamics of Hydrostatic Tiltmeters
 Proc. International Symposium "Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering", Eisenstadt, Österreich, 1998.
- 36) KAHMEN, H., WUNDERLICH, TH., WIESER, RETSCHER, G., KUHN, M., PLACH, H.,
 TEFERLE, F. N.
Ein modernes Konzept zur Absteckung von Hochgeschwindigkeitstrassen
 Zeitschrift für Vermessungswesen, (123) April, 1998.
- 37) KAHMEN, H.
Building Structures as Kinematic Systems
 Proceedings: IAG Symposium 18. – 30. July 1999, Birmingham UK, Springer
 Verlag, Berlin, 2000.
- 38) KAHMEN, H.
Object Recognition with Video-Theodolites and without Targeting the Object
 Proceedings: IWAA, 6th International Workshop on Alignment Accelerator, 18.-
 22.10.1999, Grenoble, France, 1999.
- 39) KAHMEN, H., DE SEIXAS, A.
*Neue Theodolitmessverfahren für die Bestimmung von Deformationen an nicht sig-
 nalisierten Objekten*
 In: Schnädelbach (Hrsg.) Ingenieurvermessung 2000, München 2000.
- 40) KAHMEN, H.
Messsysteme – Wissensbasierende Systeme
 Schriftenreihe des Geodätischen Institutes der Universität Darmstadt, Darmstadt
 2000.
- 41) KAHMEN, H., NIESSNER, A., DE SEIXAS, A.
3 D Object Sensing Using Rotating CCD Cameras
 In Kropatsch, W. G., Bischof, H. (Hrsg.) „Digital Image Analysis“, Springer Verlag,
 Berlin, ISBN 0-387-95066-4, 2001.
- 42) KAHMEN, H.
Ingenieurgeodäsie
 in Zilch, K., Diederichs, C. J., Katzenbach, R. (Hrsg.) „Handbuch für
 Bauingenieure“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 3-540-65760-6, 2001.
- 43) MASTELIC, S., KAHMEN, H.
Deformation Analysis with Modified Kalman-Filters
 Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measure-
 ments. California, Orange, March 2001.

- 44) KAHMEN, H., HABERLER, M., ZHANG, Z., GUO, G.
Multi Sensor Systems and a Conception for an Alert System for Landslide in the Three Gorges Area, China
 in: "Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering II", H. Kahmen, W. Niemeier, G. Retscher (Hrg.); TU Vienna, Institute of Geodesy and Geophysics, ISBN 3-9501492-1-X, S. 250 - 255, 2002.
- 45) SCHUH, H., BRUNNER, K., KAHMEN, H.
Austrian Contributions to the XXIII: General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics
 in: "Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation", H. Schuh, K. Brunner, H. Kahmen (Hrsg.); Special Issue, 0029-9650, 104 S, 2003.
- 46) CHMELINA, K., KAHMEN, H.
Combined Evaluation of Geodetic and Geotechnical Data during Tunnel Excavation by Use of a Knowledge-Based System
 Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91, 1; S. 85-91, 2003.
- 47) FABIANKOWITSCH, J., KAHMEN, H., MATT, PH.
Evaluation of the vibrational spectrum of high slim towers with wind electrical turbines
 Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91,1; S. 77-84, 2003.
- 48) NIEßNER, A., KAHMEN, H.
Die Farbinformation aus CCD-Bildern als Basis für qualitative Deformationsuntersuchungen
 Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 110, 11-12; S. 371 - 378, 2003.
- 49) KAHMEN, H.
Die Entwicklung moderner Festpunktfelder und ihre Bedeutung für die heutigen Herausforderungen in der Ingenieurgeodäsie
 Vortrag: DGON Symposium Positionierung und Navigation, Dresden (eingeladen); 18.03.2003 - 19.03.2003; in: "POSNAV 2003 ", Schriftenreihe des Geodätischen Instituts, Dresden, S. 303 - 314, 2003.
- 50) NIEMEIER, W., KAHMEN, H.
Integrated Optimization of Landslide Alert Systems - EU Project OASYS
 Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft Nr. 250, ISSN 0174-1454, S. 177 - 184, 2004.
- 51) KAHMEN, H., REITERER, A.
Image assisted theodolites - State of the art and future
 in: „Commemorative volume for the 60th birthday of Prof. Dr. Armin Grün“, hrsg. von: Photogrammetry and Remote Sensing Group, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, ETH-Zürich, S. 143 - 148, 2004
- 52) REITERER, A., EGLY, U., EITER, T., KAHMEN, H.
A Knowledge-Based Videometric Measurement System
 Vortrag: 18th IFIP World Computer Congress WCC Toulouse 2004, A Stream within AIAI-2004 on WCC-2004, in: „The Symposium on Professional Practice in AI“, Toulouse, 22. 8. 2004 - 27. 8. 2004, E. Mercier-Laurent, J. Debenham (Hrg.), 1, ISBN 2-907801-05-8, S. 313 - 322, 2004.

Herausgabe von Büchern

- 1) KAHMEN, H.
Elektronische Messverfahren in der Geodäsie
Sammlung Wichmann, Buchreihe, Band 8, Karlsruhe 1977
- 2) 2. Auflage, deutsche Ausgabe 1978
- 3) russische Ausgabe 1981
- 4) GROßMANN, W., KAHMEN, H.
Vermessungskunde II
Slg. Göschen, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1983
- 5) GROßMANN, W., KAHMEN, H.
Vermessungskunde I
Slg. Göschen, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1985
- 6) KAHMEN, H.
Vermessungskunde II
Slg. Göschen, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1986
- 7) KAHMEN, H.
Vermessungskunde I
Slg. Göschen, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1988
- 8) KAHMEN, H., FAIG, W.
Surveying
W. de Gruyter, Berlin - New York, 1988
- 9) GROßMANN, W., KAHMEN, H.
Vermessungskunde III
Slg. Göschen, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1988
- 10) GRÜN, A., KAHMEN, H. (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques I
Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989
- 11) KAHMEN, H.
Vermessungskunde
18. Auflage, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1993
- 12) GRÜN, A., KAHMEN, H. (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques II
Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1993
- 13) GRÜN, A., KAHMEN, H. (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques III
Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1995
- 14) KAHMEN, H.
Vermessungskunde
19. Auflage, W. de Gruyter, Berlin - New York, 1997

- 15) GRÜN, A., KAHMEN, H. (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques IV
Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 1997
- 16) KAHMEN, H., BRÜCKL, E., WUNDERLICH, TH. (Hrsg.)
Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering
Proc. International Symposium “Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering”, Eisenstadt, Österreich, 1998.
- 17) GRÜN, A., KAHMEN, H. (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques V
Proceedings of the 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, October 1 - 4, 2001, Vienna, Austria, ISBN 3-9501492-0-1, 2001.
- 18) H. KAHMEN, W. NIEMEIER, G. RETSCHER (Hrsg.)
Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering II
TU Vienna, Institute of Geodesy and Geophysics, ISBN 3-9501492-1-X; 543 S, 2002.
- 19) A. GRÜN, H. KAHMEN (Hrsg.)
Optical 3-D Measurement Techniques VI
Vol. I, Vol. II, International Congress on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich, 3-906467-43-0; 730 S, 2003.

Dissertationen

Dissertationen während der Professur an der Technischen Universität Hannover

1982 2. Gutachter	KULPE Hans-Rainer Der Einfluss der Mehrwegausbreitung auf die Streckenmessung mit frequenzmodulierten Mikrowellen im maritimen Bereich. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, ISSN 0174-1454.
1983	SCHWÄBLE Rainer Systemansätze für die automatische Zielverfolgung mit elektrooptischen Tachymetern in küstennahen und Binnengewässerbereich. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, ISSN 0174-1454.
1985	SILVA Tarcisio Ferreira Einsatzmöglichkeiten polarer Vermessungssysteme für die Beobachtung lokaler begrenzter geodynamischer Vorgänge. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, ISSN 0174-1454.
1986	SCHLICHLING Reinhard Zur Volumenbestimmung von Flüssigkeiten in Hohlräumen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, ISSN 0174-1454.
1986	DALLMANN Klaus-Jürgen Zur Winkelempfindlichkeit langbrennweitiger Spiegelfernrohre mit positionssensiblen Photodioden als Bildempfänger. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, ISSN 0174-1454.

Dissertationen während der Professur an der Technischen Universität Wien

1989 2. Gutachter	HE Guanping Bildverbesserung mittels digitaler Filterung
1989 2. Gutachter	SCHLÖGELHOFER Ferdinand Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie
1991	FBIANKOWITSCH Johannes Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern
1992	DÖLLER Herbert Echtzeit-Peilungen mit DGPS-Codemessungen
1992	HAMOUI Haysam Beitrag zur Untersuchung von Ionosphärenmodellen bei GPS-Messungen
1993	ROIC Miodrag Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten

1995	RETSCHER Günther 3-D Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren
1997 2. Gutachter	SPIESS Stefan Efficient Calibration of a Two Faced Laser Tracking System
1998	MISCHKE Alfred Entwicklung eines Video-Theodolit-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten
1998	KUHN Michael Deformation an vertikal schwingenden Bauwerken mit Differenzdruckgebern
2000	MASTELIC-IVIC Sinisa Untersuchungen zur Modellanpassung mit modifizierten Kalman-Filtern bei Deformationsanalysen
2001	DE SEIXAS Andrea 3D-Objektkonstruktion mittels Gitterlinienverfahren
2002	CHMELINA Klaus Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten
2002	NIESSNER Anton Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnützung der Farbinformation
2003	KABASHI Ismail Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen
2004	REITERER Alexander A Knowledge-Based Decision System for an On-line Videotheodolite-Based Multisensor System
2004	HABERLER Michaela Einsatz von Fuzzy-Methoden zur Detektion konsistenter Punktbe- wegung
2004 2. Gutachter	WALSER Bernd Development and Calibration of an Image Assisted Total Station

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1970-1973, Dezember 1976.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen. 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1973-1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1974-1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1976.
- Heft 13 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1976-1978, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichungen des Instituts für allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.
- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.

- Heft 21 Veröffentlichungen des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.
- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSKA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassung der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o. Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H. P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zur GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.
- Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodells, Wien, Juli 1992.
- Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.
- Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.

- Heft 42 M. SCHÖNER, W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Mai 1996.
- Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.
- Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.
- Heft 45 W. DAXINGER, Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte, Wien, Juli 1996.
- Heft 46 M. PLONER, CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes, Wien, November 1996.
- Heft 47 Zum Gedenken an Karl Killian „Ingenieur“ und „Geodät“ 1903-1991, Veröffentlichung der Fachgruppe Geowissenschaften, Wien, Februar 1997.
- Heft 48 A. SINDHUBER, Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen, Wien, Mai 1998.
- Heft 49 W. WAGNER, Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data, Wien, Dezember 1998.
- Heft 50 R. WEBER, E. FRAGNER (Editoren), Prof. Bretterbauer, Festschrift zum 70. Geburtstag, Wien, Juli 1999.
- Heft 51 Ch. ÖHRENER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle, Wien, April 1999.
- Heft 52 M. LECHTHALER, G. GARTNER (Hrsg.), Per Aspera ad Astra, Festschrift für Fritz Kelnhofer zum 60. Geburtstag, Wien, Jänner 2000.
- Heft 53 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER (Hrsg.), Interaktive Karten (Atlanten) und Multimedia-Applikationen, Wien, März 2000.
- Heft 54 A. MISCHKE, Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, Wien, Dezember 2000.
- Heft 55 Veröffentlichung des I.P.F. anlässlich der Emeritierung von Prof. Dr. Peter Waldhäusl, Wien, September 2001.
- Heft 56 F. ROTTENSTEINER, Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS, Wien, Mai 2001.
- Heft 57 D. LEGENSTEIN, Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien, Wien, Juli 2001.
- Heft 58 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER und K. BRUNNER (Hrsg.), Telekartographie und Location Based Services, Wien, Jänner 2002.
- Heft 59 K. BRETTERBAUER, Die runde Erde eben dargestellt: Abbildungslehre und sphärische Kartennetzentwürfe, Wien, 2002.
- Heft 60 F. KELNHOFER und K. BRUNNER (Hrsg.), Maps and the Internet, Wien, 2002
- Heft 61 L. DORFFNER, Erzeugung von qualitativ hochwertigen 3D Photomodellen für internetbasierte Anwendungen mit besonderem Augenmerk auf Objekte der Nahbereichsphotogrammetrie, Wien, 2002
- Heft 62 K. CHMELINA, Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Wien, 2002
- Heft 63 A. NIESSNER, Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnutzung der Farbinformation, Wien, 2003

- Heft 65 N. PFEIFER, 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation, Wien, 2002
- Heft 66 G. GARTNER (Hrsg), Location Based Services & Telecartography, Wien, 2004
- Heft 67 I. KABASHI, Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen, Wien, 2004
- Heft 68 J.BÖHM, Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI, Wien 2004
- Heft 69 R.WEBER, W.SCHLÜTER, U.SCHREIBER, O. TITOV Evolving Space Geodesy Techniques (EGS XXVII General Assembly, Nice, France, 2002), Wien 2004
- Heft 70 G. WEINWURM, Amalthea's Gravity Field and its Impact on a Spacecraft Trajectory, Wien 2004