

Heft 46

Neubiberg, 1994

Festschrift für
Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer
zum 60. Geburtstag

Herausgegeben von
Kurt Brunner
und
Jürgen Peipe

SCHRIFTENREIHE

STUDIENGANG VERMESSUNGSWESEN
UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN



Heft 46

Neubiberg, 1994

Festschrift für
Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer
zum 60. Geburtstag

Herausgegeben von
Kurt Brunner
und
Jürgen Peipe

SCHRIFTENREIHE

STUDIENGANG VERMESSUNGSWESEN
UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN



Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München gefördert.

Auflagenhöhe: 600

Hergestellt am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München

Redaktion: *Kurt Brunner, Jürgen Peipe*

Textverarbeitung: *Angelika Arnold, Uwe G. F. Kleim*

Desktop Publishing und kartographische Bearbeitung: *Uwe G. F. Kleim*

Reproduktionstechnik: *Ernst Gradischnig, Uwe G. F. Kleim*

Druck: AKE Druck, Holzkirchen

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Der Prodekan des Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München

Bezugsnachweis:

**Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Studiengang Vermessungswesen
D - 85577 Neubiberg**

ISSN 0173 – 1009



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort der Herausgeber	9
<i>Schödlbauer, Albert</i> Universitätsprofessor Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag	11
<i>Welsch, Walter M.</i> Die glazialgeodätischen Arbeiten Professor Dorrers	15

Fachbeiträge

<i>Albertz, Jörg</i> Wahrnehmungspsychologische Aspekte der Herstellung von Satelliten-Bildkarten	27
<i>Brunner, Kurt</i> Frühe Anwendungen der Photogrammetrie für topographische Aufnahmen in der geowissenschaftlichen Forschung und auf Expeditionen	37
<i>Caspary, Wilhelm</i> GIS-Technologie und Vermessungswesen	49
<i>Chrzanowski, Adam</i> Deformation Monitoring and Analysis – Some Recent Developments	55
<i>Derenyi, Eugene E.</i> Pseudo-Stereo Mapping	65
<i>Erez, Moshe T.</i> Photogrammetry's Role in the Digital Era	69
<i>Faig, Wolfgang</i> Computer Assisted Photogrammetric Measurements: Developments at the University of New Brunswick	75
<i>Finsterwalder, Rüdiger</i> Der räumliche Rückwärtsschnitt nach Konturlinien des Geländes	79

	Seite
<i>Hein, Günter W.</i> Integration von GPS und GIS	85
<i>Heister, Hansbert</i> Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code	95
<i>Hoch, Ludwig</i> Ausgewählte Probleme der stereoskopischen Auswertung von Aufnahmen mit einer Dreizeilenkamera am analytischen Auswertegerät	103
<i>Kick, Wilhelm</i> Das Gemälde des Satschéngletschers am Nanga Parbat aus dem Jahr 1856	109
<i>Konecny, Gottfried</i> Geographische Informationssysteme aus der Sicht der Photogrammetrie	117
<i>Kraus, Karl und Robert Ecker</i> Digitale Orthophotos und Geo-Informationssysteme	129
<i>Kröll, Friedrich S.</i> Interpolation – eine triviale Ingenieuraufgabe?	137
<i>Kupfer, Günther und Bernhard Weber</i> Eine unkonventionelle Anwendung der analytischen Photogrammetrie	155
<i>Kurz, Bernd J.</i> Target Design: A Simplifying Approach for Computer Vision	159
<i>Li, Keren</i> Ein Programm-Modul zur analytischen MOMS-Modellauswertung	171
<i>Masry, S. E., L. Mayer and J. Hughes Clarke</i> Integrating Geographic Information and Image Analysis Functionality into a Single Spatial Analysis System	179
<i>Peipe, Jürgen</i> Zur Bewegungsmessung mit Leuchtspurverfahren	185
<i>Schmidt-Falkenberg, Heinz</i> Zur Gliederung des Erdinneren	191

	Seite
<i>Schwiertz, Christian</i> GPS-gestützte Aerotriangulation – Funktionalmodelle in Tensorschreibweise	201
<i>Stephani, Manfred</i> Photogrammetrie in der Denkmalrekonstruktion – die Brunnenanlage auf Herrenchiemsee	207
<i>Torlegård, Kennert</i> Variance Components in the Photogrammetric Error Budget	217
<i>Zhou, Xiuguang</i> An Orientation Free Global Image Matching Based on Wavelet Transform	229
 Anhang	
Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Dorrer	243
Anschriften der Autoren	249
Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München	253

Vorwort der Herausgeber

Diese Festschrift ist aus Anlaß des 60. Geburtstages von Herrn Professor Dr.-Ing. *Egon Dorrer* entstanden. Sie enthält siebenundzwanzig Beiträge von Kollegen, Freunden und Schülern, die ihn ein Stück auf seinem wissenschaftlichen Weg begleitet haben – meist verbunden durch das gemeinsame Interesse am Fach Photogrammetrie in seinen verschiedenen Ausprägungen.

Die beiden ersten Beiträge würdigen Leben und Werk des Jubilars. Die folgenden sind Fachaufsätze, vorzugsweise aus dem Bereich Photogrammetrie, aber auch aus anderen Zweigen der Geowissenschaften.

Allen, die zum Gelingen dieses Bandes beigetragen haben, sei es durch einen schriftlichen Beitrag oder durch tatkräftige Mitarbeit bei der Herstellung der Druckvorlagen, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Neubiberg, im Februar 1994

Kurt Brunner

Jürgen Peipe

Albert Schödlbauer

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag

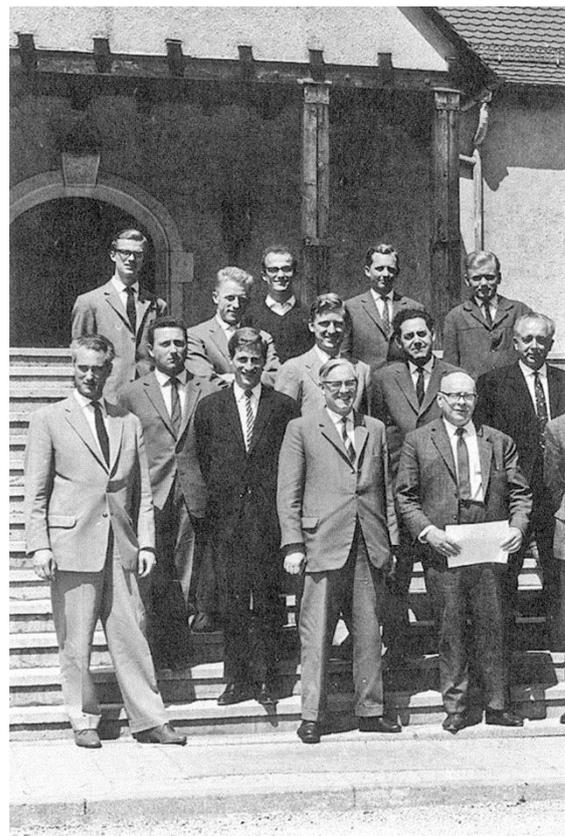
Am 14. Februar 1994 begeht Universitätsprofessor Dr.-Ing. Egon Dorrer seinen 60. Geburtstag. Mit dieser Festschrift gratulieren ihm seine Freunde, Kollegen und Schüler sehr herzlich. Der Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München würdigt einen geschätzten Kollegen, der wesentlich zum Aufbau des Studienganges beigetragen hat.

Egon Dorrer wurde 1934 in München geboren. Er besuchte in Günzburg und in München die Oberrealschule und verließ sie 1951 nach Erwerb der Mittleren Reife. Er wollte Vermessungsingenieur werden und mußte zur Vorbereitung auf diesen Beruf zunächst ein eineinhalbjähriges Praktikum durchlaufen, das er am Flurbereinigungsamt München ableistete. Im Anschluß an diese praktische Tätigkeit besuchte Egon Dorrer von 1953 bis 1955 die Staatsbauschule München und erwarb dort den Grad eines Ingenieurs für Vermessungstechnik. Die Ausbildung an dieser höheren technischen Lehranstalt, der Vorläuferin der heutigen Fachhochschule München, war solide und praxisorientiert. Engagierte Dozenten wie Dipl.-Ing. Rudolf Heindl, Dipl.-Ing. Karl Buchka, Dipl.-Ing. Franz Hegnauer und Dr.-Ing. Josef Sutor verstanden es, den jungen Ingenieur zu motivieren, seine mit einem Prädikatsexamen unter Beweis gestellten Fähigkeiten in ein weiterführendes Studium einzubringen.

Egon Dorrer nutzte die Chance, immatrikulierte an der Technischen Hochschule München und setzte dort noch 1955 sein dem Vermessungswesen gewidmetes Studium mit nunmehr universitärer Ausrichtung fort. Seine akademischen Lehrer waren die Professoren Dr.-Ing. Max Kneißl und Dr.-Ing. Richard Finsterwalder sowie die Privatdozenten Dr.-Ing. Walther Hofmann und Dr.-Ing. Rudolf Sigl. Der mit dem erfolgreichen Abschluß verbundene akademische Grad eines Diplom-Ingenieurs wurde Egon Dorrer 1959 verliehen.

An dieser Stelle seines Lebensweges erfolgte die Weichenstellung für seine spätere akademische Laufbahn: in unmittelbarem Anschluß an das Studium konnte Egon Dorrer an dem von Prof. Finsterwalder geleiteten Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie eine

Stelle als Hilfsassistent und bald danach als Wissenschaftlicher Assistent übernehmen. Schwerpunkte seiner Tätigkeit waren in dieser Zeit praktische Arbeiten der Photogrammetrie, z.B. terrestrisch-photogrammetrische Gletschervermessungen in den Alpen und in Norwegen, sowie Stereoauswertungen von Aufnahmen des Nanga-Parbat-Massivs. Den mit dieser Tätigkeit verbundenen Zweig der terrestrischen Photogrammetrie hat Egon Dorrer bis heute gepflegt. Bewahrt hat er sich auch seine ausgeprägte Liebe zur Natur und zu den Bergen.



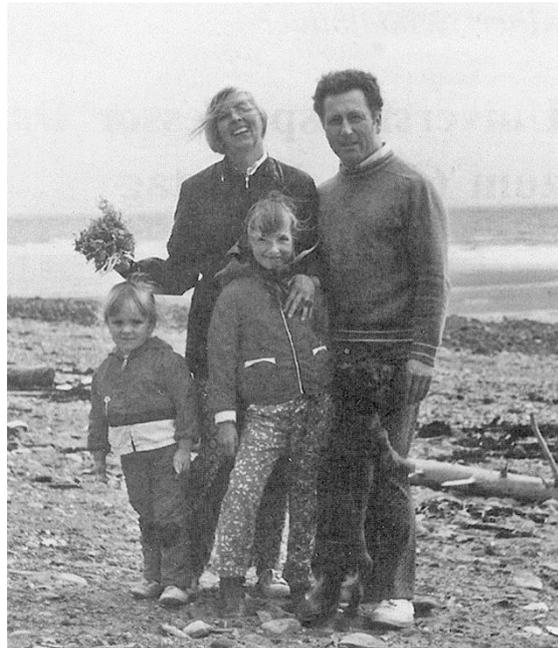
Besuch des Zeiss-Werkes in Oberkochen durch das Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie Anfang der 60er Jahre. Neben E. Dorrer (untere Reihe: 2. v. li.) u. a. Rü. Finsterwalder, A. Schödlbauer, J. Hothmer, Prof. Förstner, W. Brucklacher, Prof. Finsterwalder (v. li. N. re.).

1962 bis 1963 hatte Egon Dorrer Gelegenheit, als Assistant Geodesist am Glaciology and Polar Research Laboratory des Department of Geology der University of Michigan in Ann Arbor zu arbeiten und von dort aus im Südsommer 1962/63 an einer geodätisch-glaziologischen Expedition in die Antarktis teilzunehmen. Ziel der in ein mehrjähriges Beobachtungsprogramm eingebundenen geodätischen Arbeiten dieser Expedition war die Feststellung von Bewegungen des Ross-Schelfeises, eine Aufgabe, in die Egon Dorrer die Erfahrungen aus seinen Gletschermessungen in den Alpen und in Norwegen einbringen konnte und die er mit unkonventionellen Lösungsansätzen bereicherte. Drei Jahre später, im Südsommer 1965/66, wurde ihm die Leitung einer zweiten Expedition zum Ross-Schelfeis anvertraut. Eine offizielle Anerkennung fanden diese Aktivitäten durch die Verleihung der Antarktis-Verdienstmedaille der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und mit der Benennung eines Gletschers in der Transarktischen Gebirgskette als *Dorrer Glacier*.

Wohl während einiger durch Kälte und Sturm erzwungenen Arbeitspause, an denen die Meßtrupps die Zelte mehrere Tage lang nicht verlassen konnten, hat sich Egon Dorrer auch mit einigen projektfernen geodätischen Problemen befaßt. Von großer wissenschaftlichen Tragweite haben sich dabei die bei dieser Gelegenheit entwickelten numerischen Methoden zur direkten Lösung der Geodätischen Grundaufgaben (Übertragung geographischer Koordinaten und das dazu inverse Problem) erwiesen, mit denen er sich später in seiner Doktorarbeit vertieft auseinandersetzte. Seine Promotion zum Doktor-Ingenieur erfolgte 1966 bei Prof. Kneißl.

Abgesehen von dem erwähnten Gastaufenthalt in den USA und seiner Teilnahme an den zwei genannten Expeditionen hat Egon Dorrer im weiteren seine wissenschaftliche Laufbahn am Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie in München fortgesetzt, zunächst als Wissenschaftlicher Assistent und ab 1966 als Oberingenieur.

1967 folgte Egon Dorrer einem Ruf als Associate Professor an das Department of Surveying Engineering der University of New Brunswick in Fredericton, Kanada. Er beteiligte sich dort aktiv am Ausbau der Abteilung, die heute zu einer der angesehensten geodätischen Lehr- und Forschungsstätten Nordamerikas zählt, und leistete mit Untersuchungen über die Anwendung des Tensorkalküls auf Probleme und Aufgaben der numerischen Photogrammetrie, mit der Entwicklung von Verfahren der Blockausgleichung sowie im Bereich der rechner-



Prof. Dorrer mit Frau Brunni und den Töchtern Angela und Petra in Kanada 1972



Prof. Dorrer bei einem Gastaufenthalt in Tucuman/Argentinien 1973

gestützten interaktiven Photogrammetrie wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbeiträge. Die Anerkennung für sein großes Engagement blieb nicht aus, als ihn die Universität 1972 zum Full Professor ernannte.

Daß Egon Dorrer trotz dieser erfolgs- und aussichtsreichen Karriere noch im gleichen Jahr einem Ruf auf die Professur für Photogrammetrie an der soeben gegründeten Hochschule der Bundeswehr München folgte, hing sicherlich nicht nur mit wissenschaftlichen Aspekten zusammen, sondern auch mit der niemals abgerissenen starken Bindung zu seiner Heimatstadt München und zu seiner bayeri-



Prof. Dorrer im Kreise seiner Kollegen an der Universität der Bundeswehr München im Jahre 1983
(v. li. n. re. die Professoren Neugebauer, Welsch, Dorrer, Schödlbauer, Oberholzer und Caspary)

schen Heimat, eine Bindung, die er in der Abgeschiedenheit Frederictons wohl besonders spürte. Man darf davon ausgehen, daß seine aus Göttingen stammende Frau Bruni, die er beim Skifahren in Südtirol kennengelernt und 1964 geheiratet hatte, ähnlich empfand und eine Rückkehr nach Europa tatkräftig unterstützte.

Auch an der Hochschule der Bundeswehr München mußte Egon Dorrer zunächst einmal Aufbauarbeit leisten: Entwicklung eines Curriculums, eines Lehrplans, einer Studien- und einer Prüfungsordnung; der Aufbau des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie sowie die Planung und Errichtung eines photogrammetrischen Laboratoriums; schließlich die völlig neu zu gestaltende Lehre; und viele andere Aufgaben, die seinen vollen persönlichen Einsatz erforderten, darunter auch die Leitung des Studiengangs Vermessungswesen als Prodekan in zwei zweijährigen Wahlperioden.

Im Bereich der Forschung widmete sich Egon Dorrer weiterhin der rechnergestützten Photogrammetrie. Er konzipierte ein System, bei dem ein Graphik-Mikrorechner mit einem Stereoauswertegerät verbunden wurde, und er entwickelte Programme zur photogrammetrischen Datengewinnung mit interaktiven Editierfähigkeiten. Auf dem Gebiet der analytischen Photogrammetrie leistete er weiter-

hin theoretische und operationelle Beiträge zur On-line-Aerotriangulation und bereicherte das rechentechnische Instrumentarium durch Anwendung der interaktiven Rechnersprache APL auf elementare und fortgeschrittene Operationen der numerischen Photogrammetrie. Hierzu zählt auch die Entwicklung von APL-Software zur Bestimmung der Verformung von Objekten unter Wasser.

In den letzten Jahren hat sich Egon Dorrer unter anderem mit Verfahren der Motographie zur Bestimmung von Bewegungen und Deformationen unterschiedlicher Körper befaßt. Er untersuchte ferner die Möglichkeiten, die das Global Positioning System (GPS) im kinematischen Modus zur absoluten Orientierung von Luftbildern und zur Auswertung von Aerotriangulationen bietet, und setzte sich theoretisch und praktisch mit den geometrischen Problemen auseinander, die bei Stereoauswertung von Aufnahmen mit der MOMS-02-Dreizeilenkamera auftreten.

Natürlich liegt der 60. Geburtstag noch zu früh im Lebenslauf, als daß jetzt schon eine abschließende Würdigung des wissenschaftlichen Werkes von Egon Dorrer möglich wäre. Dazu steckt der Jubilar noch viel zu tief in der laufenden Arbeit. Auch hat er sich mit einem neuen Projekt, das Untersuchungen zur Erstellung von Kartenprototypen



Prof. Dorrer bei der Feier zu seinem
50. Geburtstag

der Marsoberfläche aus HRSC- und WAOSS-Aufnahmen gewidmet ist, noch sehr viel vorgenommen. Einige Merkmale seiner Arbeit lassen sich aber schon heute als kennzeichnend für das wissenschaftliche Lebenswerk von Egon Dorrer feststellen: die große Breite seiner Betrachtungs- und Arbeitsweise und seine stets auf die Verknüpfung

von Theorie und Experiment ausgerichteten Strategien der Problemlösung. Egon Dorrer hat das photogrammetrische Meßprinzip an viele benachbarte Disziplinen herangeführt und hat auch auf dem umgekehrten Weg Erkenntnisse aus diesen Bereichen der Photogrammetrie erschlossen. Das eigentliche Ziel seiner Arbeit waren dabei weniger die theoretischen Erkenntnisse – diese entwickelte er eher bei-läufig – sondern der aus diesen Erkenntnissen fließende Nutzen für die Praxis.

Egon Dorrer wurde und wird im Kollegenkreis als stets freundlicher, humorvoller, kooperativer, engagierter und hilfsbereiter Kollege sehr geschätzt. Der weit über sein engeres berufliches Umfeld hinausreichenden Wertschätzung dürfte es zuzuschreiben sein, daß ihm über seine Aufgaben an der Universität der Bundeswehr München hinaus eine Reihe von Ämtern in Arbeitskreisen und Berufsverbänden angetragen wurden, die er sodann mit Engagement bekleidete. So war er – um nur die wichtigsten Ämter zu nennen – von 1974 bis 1981 Leiter des Arbeitskreises Numerische Photogrammetrie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 1984 bis 1988 Zweiter Vorsitzender dieser Gesellschaft und von 1988 bis 1992 ihr Präsident. Seit 1981 ist Egon Dorrer Ordentliches Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission.

Der Autor dieses Beitrags, der den beruflichen Lebensweg von Egon Dorrer in gemeinsamer Assistententätigkeit an der Technischen Hochschule München und als Kollege an der Universität der Bundeswehr München über viele Jahre begleitet hat, dankt dem Jubilar für eine langjährige kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Mit den Herausgebern und Autoren dieser Schrift sowie mit seinen Kollegen aus dem Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München wünscht er dem Jubilar noch viele Jahre Gesundheit, Schaffenskraft und familiäres Glück.

Walter M. Welsch

Die glazialgeodätischen Arbeiten Professor Dorrers



Abb. 1: Egon Dorrer auf dem Ross Ice Shelf, Antarktika

Zusammenfassung

Professor Dorrer hat in der ersten Zeit seiner wissenschaftlichen Arbeit intensiv glazialgeodätische Forschungen betrieben, die ihn zu ausgedehnten Expeditionen in die Antarktis und Arktis führten. Der vorliegende Bericht beschreibt die Stationen seines Schaffens und vermerkt, daß es ihm – wie eine Exkursion zum Nanga Parbat in jüngster Vergangenheit beweist – gelingt, auch heute noch die wissenschaftlichen Möglichkeiten der Glazialgeodäsie durch Einsatz moderner Techniken zu bereichern.

Summary

During the initial period of his scientific work Professor Dorrer pursued intensively geodetic research activities in glaciology. They led him to

extensive expeditions to Antarctic and Arctic regions. The report presented here describes the various stages of this time. Referring to a recent scientific excursion to the Nanga Parbat area in the Himalayas it is pointed out that even today Professor Dorrer is still creative by introducing new ideas and the latest geodetic technologies to glaciology.

Das berufliche Umfeld

Professor Dorrers wissenschaftliche Arbeiten sind nicht auf die Lösung photogrammetrischer Probleme, denen freilich sein hauptsächliches Engagement gilt, beschränkt. Neben Fragestellungen der Landesvermessung, denen er sich besonders in seiner Dissertation widmete, nehmen glazialgeodätische Aufgaben in den ersten zehn Jahren seines wissenschaftlichen Wirkens einen recht breiten Raum ein.

Glazialgeodäsie kann man nicht in der Gelehrtenstube betreiben; sie lebt von der Arbeit im Felde, die die Gewinnung von Daten ermöglicht, deren Analyse die Kenntnisse über das Verhalten der Gletscher der Erde erweitern und weiterreichende Schlußfolgerungen, etwa über die Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft, ermöglichen. Professor Dorrer war in diesem Sinne mehrfach in der Arktis und Antarktis tätig. Dem Arbeiten auf diesem Gebiet war sicherlich die berufliche Umgebung Professor Dorrers in jener Zeit förderlich, die von der expeditionsfreundlichen Atmosphäre am Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie der Technischen Universität München unter der Leitung von Prof. Dr. Richard Finsterwalder, vom Kontakt zur Kommission für Glaziologie bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, von seinem Aufenthalt am Laboratory of Glaciology and Polar Research an der University of Michigan und von seiner Tätigkeit an der University of New Brunswick in Fredericton, Kanada, geprägt war.

Ich erinnere mich noch sehr gut an mein erstes »glaziologisches« Zusammentreffen mit Professor Dorrer im Jahre 1969 an der Rechenstelle des Geodätischen Institutes der Technischen Universität München, deren Leiter ich damals war. Ich hatte von meinem Chef, Prof. Dr. M. Kneißl, die Aufgabe erhalten, Professor Dorrer, damals schon ein angesehener antarktischer Expeditionist und Glaziologe, dem ich – ein »Rechenknecht« – großen Respekt zollte, in den Gebrauch des »programmgesteuerten Zeichenautomaten Zuse Z 64« einzuweisen. Professor Dorrer lauschte meinen Erklärungen still und geduldig, holte sodann einen Lochstreifen hervor, legte ihn ein und schon zeichnete der Automat (»Plotter« nannten wir ihn erst später) die Bewegungsvektoren der Punkte, die Professor Dorrer auf dem Ross Ice Shelf geodätisch eingemessen hatte: Er wußte längst Bescheid (in den zwanzig Jahren seither habe ich immer wieder festgestellt, daß er »schon Bescheid wußte«, ohne es freilich angedeutet oder gar gesagt zu haben). – Ich hatte wieder einmal »Hautkontakt« mit der Glaziologie bekommen, einer Wissenschaft, die mich als Bergsteiger, der insbesondere die großen Eisfahrten in den Alpen und den Bergen der Welt liebte, faszinierte.

Ein zweites glazialgeodätisches Zusammentreffen mit Professor Dorrer hatte ich in einem der Camps auf dem Juneau Icefield in Alaska; es war allerdings nur ein »indirektes« Treffen – doch davon später.

Im folgenden möchte ich die Expeditionen nachzeichnen, die Professor Dorrer zu glazialgeodätischen Arbeiten in die Antarktis und in die Arktis

geführt und ihm die Möglichkeit gegeben haben, unsere Kenntnisse über ausgedehnte Gletschergebiete der Erde zu erweitern.

Norwegen

Als Egon Dorrer seine erste glaziologische Expedition ausführte, war er (noch nicht promovierter) wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Universität München bei Prof. Dr. Richard Finsterwalder. Professor Finsterwalder hatte über einen längeren Zeitraum an zehn ausgewählten Gletschern der Ostalpen Änderungsmessungen vorgenommen, deren Ergebnis – 60 cm jährlicher Höhenverlust im Zeitraum von 1920 bis 1950 – ein wichtiger Nachweis für die negative Massenbilanz der Gletscher eines größeren Gebietes darstellte.

Um aber auch Aussagen über die Veränderungen der Gletscherstände außeralpiner Gebiete zu bekommen, führte Professor Finsterwalder an bedeutenden Gletschern in geographisch und klimatisch verschiedenen Zonen der Erde Besatzungsaufnahmen durch: 1928 am Fedtschenkogletscher im NW-Pamir, 1934 an Gletschern des Nanga Parbat–Massivs im NW-Himalaya und 1937 an den beiden bedeutendsten Abflußgletschern des Jostedalubre in Norwegen (Abb. 3).

Die Wiederholungsmessungen im Pamir fanden 1958, die im Himalaya 1954 und 1958 statt. Der eine der beiden Abflußgletscher des Jostedalubre, der Nigardsbre, wurde von norwegischer Seite wiederholt nachgemessen, während der zweite, der Tungsbergdalsbre, von Egon Dorrer im Juli 1961 zum zweiten Male photogrammetrisch vermessen wurde. Die wichtigsten Ergebnisse [*Kick und Dorrer, 1964*] waren das Verschwinden eines 50 ha großen, fast 100 m tiefen Gletscherstausees und ein Massendefizit zwischen 1937 und 1961, das einer jährlichen Abnahme der Eisdicke im Gletscherzungenbereich von 1-2 m entsprach.

Antarktis

Unter dem Namen »*Ross Ice Shelf Survey (RISS)*« wurde 1961 in den USA ein Forschungsprojekt zur Lösung einiger fundamentaler Probleme der Gletscherbewegung zur Förderung durch die National Science Foundation (NSF) vorgeschlagen. Die NSF folgte dem Vorschlag und unterstützte das Projekt, das im Rahmen des US Antarctic Research Program zwei Vermessungsexpeditionen im Abstand mehrerer Jahre vorsah.

Schon im antarktischen Sommer 1962/63 fand unter Leitung von Prof. Dr. W. Hofmann eine internationale Expedition (RISS I) statt, an der Egon Dorrer, damals tätig am Glaciology and Polar Research Laboratory der University of Michigan, als Geodät teilnahm. Das anspruchsvolle Vorhaben sah vor, quer über das Ross Ice Shelf ein geodätisches Profil zu legen, aus dessen erneuter Vermessung einige Jahre später die Bewegung des Schelfeises analysiert werden könnte (Abb. 2). Über eine Gesamtstrecke von 1000 km wurde ein Polygonzug mit 114 Pegelpunkten in 76 Meßtagen eingemessen [Hofmann, Dorrer und Nottarp, 1964]. In einer Wiederholungsmessung (RISS II) im »Sommer« 1965/66, diesmal unter Leitung von Egon Dorrer, konnten etwa 90% der Punkte wieder aufgefunden und erneut vermessen werden. Es ergaben sich Bewegungsraten bis zu 935 m/Jahr [Dorrer et al., 1969; Dorrer, 1970; Dorrer et al., 1971].

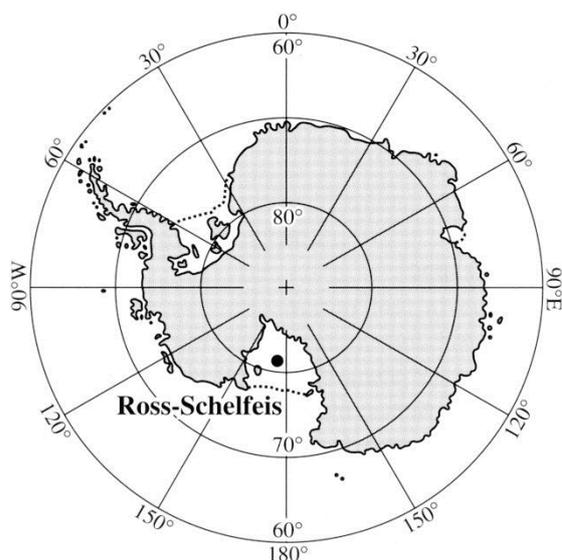


Abb. 2: Die südliche Polkappe – Antarktika

Welcher Antarktisforscher möchte nicht einmal am Südpol gewesen oder – noch besser – auf ihm gestanden haben. Am leichtesten läßt sich dieser Wunsch erfüllen, wenn man in ein US-amerikanisches Verhaben eingebunden ist, aber auch dann nur, wenn es das wissenschaftliche Interesse erfordert. Es gilt also, die wissenschaftliche Notwendigkeit eines Aufenthaltes am Pol nachzuweisen. Es gelang Professor Hofmann, die amerikanische Expeditionsleitung davon zu überzeugen, daß Bewegungs- und Verformungsmessungen am Südpol ein erstrebenswertes Ziel seien. Also wurde im Sommer 1962/63 am Südpol eine Deformationsfigur ausgelegt und mit geodätischer Präzision vermessen. Die Wiederholungsmessungen fanden im Som-

mer 1965/66 statt. – Professor Dorrer ist damit einer der wenigen deutschen Wissenschaftler, die – sogar zweimal – am Südpol gearbeitet haben.

Egon Dorrer war aber nicht nur ein im Felde arbeitender Geodät; er hat vielmehr auch die Auswertung und Analyse der Messungen durchgeführt. Dabei ist das eine nicht geringer zu achten als das andere.

Die Feldarbeit (Abb. 1) wird bestimmt von den extremen Bedingungen der antarktischen Umwelt, die die Güte und den Fortschritt der Arbeit und das allgemeine Wohlbefinden der Expeditionsteilnehmer erheblich beeinflussen. Prägende Faktoren allgemeiner Art sind die Witterung (Kälte, Wind, Drift), die besonderen Sichtverhältnisse (Overcast, Whiteout, Luftflimmern, Luftspiegelungen, extreme Refraktion), die Spalten, die eine heimtückische Gefahr in den antarktischen Eisgebieten darstellen, die Logistik im allgemeinen und im besonderen das rechtzeitige Eintreffen des Nachschubes an Treibstoff und Verpflegung (Expeditionskameraden berichten allerdings, daß Egon Dorrer sich als ausgesprochen genügsam erwiesen hat) und nicht zuletzt die Harmonie der Gruppe im menschlichen Miteinander und bei der Arbeit. Hinzu kommen die ganz besonderen Anforderungen an die Kenntnis der eingesetzten Instrumente, die Erarbeitung eines ausgefeilten Beobachtungsprogrammes und die Präzision der Beobachtungen, die erreicht werden muß, soll ein 1000 km langer Polygonzug mit einem brauchbaren Ergebnis abgeschlossen werden. Einen Eindruck von den Anforderungen vermittelt Egon Dorrer in einem Überblick, der der Präzisionswinkelmessung auf dem Ross Ice Shelf gewidmet ist [Dorrer, 1963 und 1965].

Die Reduktion der Rohwerte geodätischer Beobachtungen wegen aller möglichen systematischen Abweichungen vom gewünschten Modell ist bei einem Polygonzug besonders heikel, da – im Gegensatz zu geschlossenen geometrischen Figuren – keinerlei unabhängige oder rechnerische Kontrollen möglich sind. Letztlich sind derartige Reduktionen jedoch Bestandteil des geodätischen Alltags. Bei Messungen auf dem Ross Schelfeis liegen aber besondere Bedingungen vor, die darin begründet sind, daß Geodäsie auf bewegtem Untergrund betrieben wird. Dies ist im vorliegenden Fall besonders kritisch, da keine Sichtverbindung zu unbewegten Punkten besteht. Egon Dorrer hat in seinen Analysen die grundlegende Abhängigkeit der gemessenen Winkel und Strecken von der Zeit oder den – auch nichtlinearen – Deformationseigenschaften der Eisoberfläche aufgezeigt und eine Möglichkeit angegeben, wie aus einer zweimaligen, zu verschiedenen

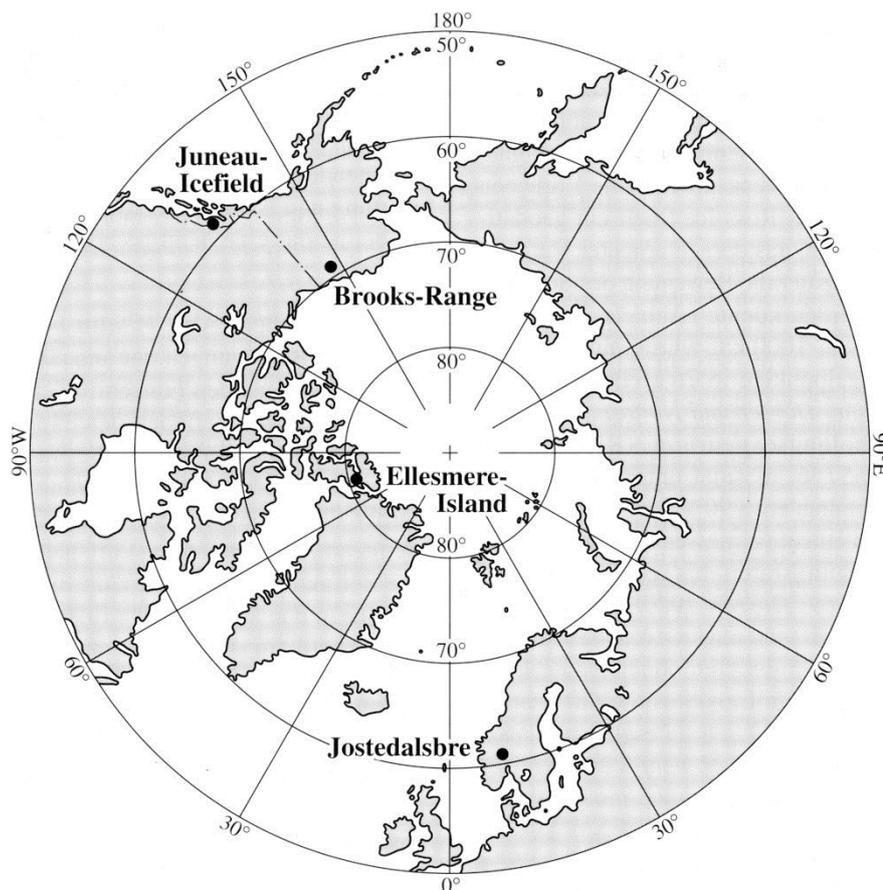


Abb. 3: Die nördliche Polkappe

Zeiten durchgeführten Messung eines Polygonzuges die horizontale Verschiebung der Polygonpunkte unter optimaler Ausnutzung bekannter Gegebenheiten ermittelt werden kann. Das Verfahren [Dorrer, 1967; Dorrer et al., 1971] läßt sich auf die geodätische Bestimmung horizontaler Bewegungen größerer Bergbaugebiete, tektonisch unruhiger Krustenbereiche und sonstiger, in sehr langsamer Bewegung befindlicher Teile der Erdoberfläche ausdehnen. Es wurde in der Folge auch wiederholt für die Analyse von Gletscherbewegungen, z. B. in Grönland, angewendet. – Professor Dorrer hat mit diesem Verfahren, durch geodätische Messungen auf bewegtem Untergrund die Bewegungen dieses Untergrundes zu ermitteln, einen neuen und wesentlichen Beitrag auf dem Gebiet der kinematischen Deformationsanalyse geleistet.

Die glazialgeodätischen Arbeiten in Norwegen und am Ross Ice Shelf – für diese wurde Professor Dorrer dadurch geehrt, daß einem Gletscher in der Antarktis sein Name verliehen wurde – fanden zu der Zeit statt, als Egon Dorrer noch Assistent an der Technischen Universität München war. Kurze Zeit später (1967) wurde er, inzwischen zum Dok-

tor-Ingenieur promoviert, als Professor an das Department of Surveying Engineering der Universität von New Brunswick in Fredericton berufen. Auch hier war das Umfeld »glaziofriendly«, so daß Professor Dorrer glazialgeodätische Fragen weiterhin beschäftigten, jetzt aber in arktischen Regionen.

Northwest Territories, Kanada

Zwischen August 1961 und April 1962 hatte sich eine 600 km² große Tafel vom Ward Hunt Ice Shelf im Norden der Ellesmere Insel, westlich der Spitze Grönlands, im äußersten Norden, gelöst (Abb. 3). Die Tafel hatte sich in mehrere große Eisinseln aufgelöst, von denen eine mit einer Geschwindigkeit von mehr als 1 km/Tag nach Osten driftete und den Robeson Kanal zwischen der Ellesmere Insel (Kanada) und Grönland verblockte und Treibeis daran hinderte, in den Kanal einzudringen. Da Ähnliches schon 1946 geschehen war, wurde damit begonnen, die Eisbewegungen des Schelfeises zu untersuchen. Erste Vermessungen fanden 1964 und 1965 statt.

Die Wiederholungsmessungen wurden von Professor Dorrer im Frühsommer 1968 ausgeführt [Dorrer, 1971]. Er fand eine – gegenüber den antarktischen Schelfeisen ganz bedeutend kleinere – Bewegungsrate von 0.5 m/Jahr heraus. Nach Kenntnis dieses Parameters war es möglich, die Menge des jährlich neu gebildeten Eises abzuschätzen. Es ergab sich eine so kleine Masse, daß der Schluß gezogen werden konnte, daß – auch unter Berücksichtigung anderer äußerer Umstände – in naher Zukunft nicht mehr mit dem Kalben einer größeren Eistafel gerechnet werden müsse. Über die Geschwindigkeitsmessungen hinaus beschäftigte sich Professor Dorrer auch mit dem Verzerrungsverhalten des Schelfeises, indem er die Hauptachsen des Verzerrungstensors in einem 1 km² großen Gefeiert bestimmte. Daraus leitete er das im untersuchten Gebiet herrschende Fließgesetz und die Spannungsverhältnisse im Eis ab. Die Analysen ergaben u. a., daß eine auffällige, bislang ungeklärte Wellenstruktur an der Oberfläche des Schelfeises nicht auf Kräfte im Innern des Eises zurückgeführt werden könne. – Bemerkenswerte Refraktionswerte veranlaßten Professor Dorrer zu weiteren Untersuchungen.

Brooks Range, Alaska

Schon als Professor Dorrer an die Universität der Bundeswehr München berufen war, arbeitete er noch an der Analyse von Daten, die er – im Zusammenarbeit mit der Universität von Alaska in Anchorage – auf den Mc Call Glacier in der Brooks Range, Alaska, während einer Feldkampagne im Sommer 1971 gewonnen hatte (Abb. 3).

Der Mc Call Gletscher ist einer der wenigen Gletscher in den Vereinigten Staaten, die regelmäßig überwacht werden. Er gehört zu den Gletschern der Arctic Circle-Gletscherkette, die – wie die der »Westamerikanischen« Kette – in der Internationalen Hydrologischen Dekade zur intensiven Beobachtung empfohlen worden waren. Die Aufgabe bestand in einer Abschätzung der Massenbilanz des Gletschers für den Zeitraum von 1958 - 1971. Die eigentliche Vermessung wurde aerophotogrammetrisch ausgeführt. Zusätzlich waren aber umfangreiche terrestrische Arbeiten für die Paßpunktbestimmung notwendig, da entsprechende Daten von der Erstvermessung im Jahre 1958 nicht zur Verfügung standen. Neben der photogrammetrischen Methode wurden auch die jährliche Variation der Höhe der Gleichgewichtslinie (das ist die Linie, die das Nährvom Zehrgebiet des Gletschers trennt, an der also weder Massenzuwachs noch –verlust auftritt) und

die Variation der Höhe der 500 mbar-Luftdrucklinie zur Ermittlung der Massenbilanz herangezogen.

Die nach den verschiedenen Untersuchungsmethoden erzielten Ergebnisse zeigten hinreichende Übereinstimmung in der Feststellung eines Massenverlusts von etwa 10-15 Mio. m³ während des Beobachtungszeitraumes von 13 Jahren; zur Veranschaulichung kann man sich vorstellen, daß die Eisdicke des 6.22 km² großen Gletschers im Beobachtungszeitraum um 1.5-2 m abgenommen habe [Dorrer, 1976].

Himalaya, Pakistan

Ganz bemerkenswert sind Professor Dorrers Experimente, die Abbildungsgeometrie alter Landschaftsgemälde mit Hilfe aktueller terrestrischer und photogrammetrischer Messungen zu rekonstruieren. Die Bedeutung dieser Vorgehensweise ist darin zu sehen, daß die Bilder alter Landschaftsmaler herangezogen werden können, um Aussagen über historische Gletscherstände, insbesondere zur Zeit des letzten Gletschermaximums in den Alpen, zu bekommen.

Die Gletscher der Alpen erreichten um 1850 einen Höchststand; seither schmelzen sie ab. Die Tatsache des Gletscherschwundes in den Alpen kann aber, da die Alpengletscher nur einen winzigen Bruchteil der weltweit vorhandenen Gletscher ausmachen, nicht ohne weiteres auf die Gletscher der Welt, über die bisher nur wenig systematisches Wissen gesammelt wurde, übertragen werden. Um aber dennoch zu Aussagen über die Gletschergeschichte außeralpiner Gebiete zu kommen, können alte Zeichnungen und Gemälde zu Hilfe genommen werden, wenn gewisse Voraussetzungen erfüllt sind. Dazu gehört, daß die Entstehungszeit und der Aufnahmestandort des Bildes bekannt und die Darstellung der topographischen Gegenstände des Gemäldes zuverlässig sein müssen. Professor Dorrer hat während einer Expedition im Jahre 1987 die diesbezüglichen geometrischen Voraussetzungen zweier Bilder Adolph von Schlagintweits, der zusammen mit seinen Brüdern Hermann und Robert 1856 den Naga Parbat, Pakistan, besuchte und ihn von verschiedenen Seiten zeichnete und aquarellierte, mit Erfolg untersucht [Dorrer, 1989].

Hochinteressant sind die grundlegenden Betrachtungen, die er zum Wahrnehmungsvorgang ausgedehnter Objekte durch den menschlichen Betrachter macht. Die menschliche Wahrnehmung ist gegenüber der eindeutig definierbaren perspektivischen

Abbildung eines photogrammetrischen Meßphotos sehr viel komplizierter: Auge und Kopf sind ständig in Bewegung, um das Landschaftsbild abzutasten; das Sehzentrum des Gehirns verarbeitet fortwährend die auf der Netzhaut abgebildeten Punkte zu einem Gesamtbild, dessen geometrische Eigenschaften denen einer Photographie nicht mehr gleichen. Dennoch lassen sich aus einem akribisch ausgeführten Gemälde, insbesondere wenn es durch geodätische Messungen unterstützt wird und mit einer genauen topographischen Karte verglichen werden kann, verlässliche Aussagen über den Standort und die geometrische und interpretatorische Güte des Bildinhaltes machen. Die geodätische Analyse der beiden von Professor Dorrer untersuchten Panoramen hat eine fundierte Voraussetzung für eine weiterführende Diskussion der glaziologischen Geschichte des Gebietes um den Nanga Parbat geschaffen.

Ein Forschungsreisender der heutigen Zeit oder auch ein Bergsteiger wird, was er sieht, nicht mehr mit Pinsel und Farbe, sondern mit einem Photoapparat festhalten. Er wird, was häufig geschieht, ein aus mehreren Einzelbildern zusammengesetztes Panorama anfertigen. Auf der oben erwähnten Expedition wurde ein solches Panorama von der Rupalflanke des Nanga Parbat aufgenommen. Professor *Dorrer [1990]* hat daraufhin untersucht, wie die Einzelbilder entzerrt und miteinander verknüpft werden müssen, um zu einer geometrisch eindeutigen und einheitlichen Darstellung zu kommen. Von der Seite der Bildaufnahme her ist eine systematische Erfassung und Überdeckung des betrachteten Raumes die wichtigste Voraussetzung. Auswertetechnisch wird die digitale Bildverarbeitung immer bessere Möglichkeiten bieten, da sie mosaikartige Bilder nicht nur geometrisch, sondern vor allem auch radiometrisch nahtlos und kontrastausgleichend überarbeiten und zusammensetzen kann.

Juneau Icefield, Alaska

Einleitend hatte ich erwähnt, daß ich mit Professor Dorrer neben meinem ersten »glaziologischen« Zusammentreffen am Zeichenautomat des Geodätischen Instituts noch ein zweites hatte, über das ich später berichten wollte. Die Gelegenheit dafür ist jetzt gekommen, da ich einen Aufenthalt Professor Dorrers auf dem Juneau Icefield erwähnen will. Über ihn wird in der Literatur nicht berichtet. Ich erfuhr erst davon, als ich meinen Namen an einem Deckenbalken des einzigen Gebäudes des Camp 19 auf dem Juneau Icefield, Alaska, eintrug,

wie es die Teilnehmer am Juneau Icefield Research Program traditionsgemäß tun, um sich und ihre Namen zu verewigen. In eben jenem Gebäude, einem winzigen Hüttchen, fand sich auch der Namenszug Professor Dorrers aus dem Jahre 1971. Dieses zweite, »indirekte« Zusammentreffen hat mir die Idee gegeben, in der vorliegenden Festschrift die glaziologischen Arbeiten Professor Dorrers darzustellen.

Da ich die geodätischen Arbeiten des Juneau Icefield Research Program (JIRP) seit 1981 leite, will ich im folgenden kurz über das Programm berichten. Und weil ich inzwischen auch schon mehrfach längere Zeit im Camp 19 zugebracht habe, möchte ich an einem ausgewählten Projekt zeigen, was Professor Dorrer damals im Camp 19 fasziniert haben mag.

Unmittelbar nördlich der Hauptstadt von Alaska, Juneau, liegt ein ausgedehntes Netz von Gletschern, die in ihrer Summe das Juneau Icefield bilden (Abb. 3 und 4). Dieses arktische Eisgebiet im sogenannten Taku Distrikt gehört mit etwa 4000 km² zu den größten zusammenhängenden Eisfeldern außerhalb von Grönland und der Antarktis. Es ist der am meisten vergletscherte Sektor der nördlichen kanadischen Coast Range. Wegen seines maritimen Klimas auf der Ostseite einerseits und seiner trocken-kontinentalen Witterungsverhältnisse auf der Westseite andererseits ist es ein ideales Naturlaboratorium für glaziologische Studien im weiteren Sinne. Das Gebirge erscheint eisüberflutet oder – wie man sich die Alpen während der Eiszeit vorstellen mag – als im Eis ertrunken. Die höchsten Eisfelder liegen in einer Höhe von ca. 2000 m, die höchsten Gipfel sind der Devil's Paw (2616 m) und der Mount Nesselrode (2469 m). Die hochgelegenen plateauartigen Eisgebiete fließen in vielen Talgletschern häufig bis in Meereshöhe ab. Die südöstliche Hälfte des Eisfeldes besteht im wesentlichen aus dem System der Taku-Llewellyn-Gletscher, die sich über 120 km vom Atlin Lake im Norden zum Taku River im Süden erstrecken. Dieses Gletschersystem wird vom JIRP glaziologisch bearbeitet.

Das JIRP (Abb. 5) wurde 1946 organisiert, um in interdisziplinärer Zusammenarbeit langfristige Untersuchungen und Studien anzustellen mit dem Ziel, die gesamte Umwelt arktischer Gletscherregionen kennen- und verstehen zu lernen. Das Programm wurde 1959 durch die Gründung des Summer Institute of Glaciological and Arctic Sciences erweitert. Diese »Sommerschule« hat sich die Aufgabe gestellt, alljährlich während zweier Sommermonate akademische Vorlesungen mit

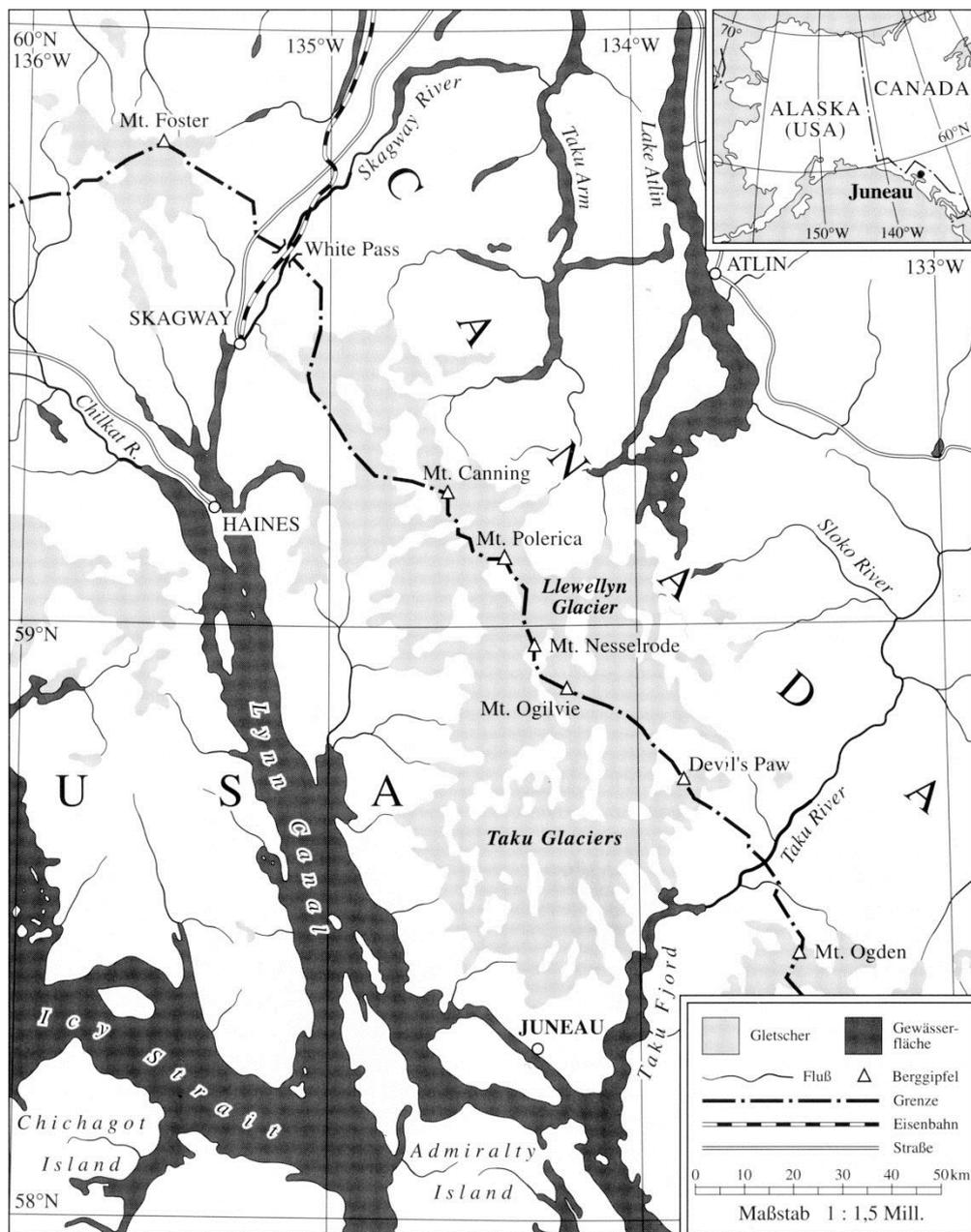


Abb. 4: Das Juneau Icefield, Alaska

Feldexkursionen, -praktika und -übungen zu verbinden, um die Vielfalt glaziologischer Probleme erfassen zu können. Unter Leitung des Gründers und Leiters, Prof. Dr. Maynard M. Miller, State University of Idaho, USA, werden unter Aufsicht und Anleitung von 20 bis 30 Experten aller möglichen glaziologischen Wissenschaftsgebiete Studenten in die komplexe Materie eingewiesen. Dabei arbeiten die Studenten, die selbst verschiedenen Disziplinen und Ausbildungsstufen angehören, praktisch an der Durchführung der Forschungsprojekte der beteiligten Wissenschaftler mit.

Das geodätische Programm sieht folgende Studien vor:

- Anlage lokaler geodätischer Netze in der Umgebung wichtiger Camps als Referenzsysteme für verschiedene geodätische Aufgaben und Arbeiten anderer Disziplinen,
- Verknüpfung der örtlichen zu einem zusammenhängenden überörtlichen Festpunktfeld und Verbindung dieses Netzes mit dem amtlichen Landesnetz,
- topographische Geländeaufnahmen ausgewählter Gebiete als Grundlage für spezielle Studien,

- Geschwindigkeits- und Verformungsmessungen an mehreren ausgewählten Gletschern und Gletscherzusammenflüssen,
- Studium der Gletscherzunge des Taku Gletschers und des Vaughan Lewis-Icefall.



Abb. 5: Das Emblem des Juneau Icefield Research Program

Der Vaughan Lewis-Icefall ist einer der gewaltigsten Gletscherbrüche Nordamerikas (Abb. 6). Das plateauartige Nährgebiet liegt in einer Höhe von etwa 1600 bis 1700 m. Das Eis fließt westwärts in den Gilkey Trench ab und überwindet dabei auf einer horizontalen Entfernung von 800 m einen Höhenunterschied von 500 m – das ist der spektakuläre Vaughan Lewis-Icefall. Er liegt jenem Camp 19 genau gegenüber. Es kann nicht wundernehmen, zu hören, daß sowohl Professor Dorrer als auch ich diesen Gletscherbruch und die sich an seinem Fuß ausbreitenden Ogiven (sich jährlich

ausbildende, wellenförmige Eisstrukturen) ausgiebig betrachtet und bestaunt haben. Aber nicht nur betrachtet, sondern auch vermessen: Abb. 6 ist aus zwei terrestrisch-photogrammetrischen Meßbildern, die vom Camp 19 aus aufgenommen wurden, zusammengesetzt. Sie, im Verein mit Aufnahmen vom sog. Cleaver, dem orographisch rechten Begrenzungsfelsen des Eisbruchs, ermöglichten die Bestimmung der Eisgeschwindigkeiten im Bruch, die an der engsten Stelle 5 m/Tag weit übersteigen. Abb. 7 zeigt das Geschwindigkeitsfeld [Rentsch et al., 1990]. Sie stellt eine Orthogonalprojektion der digitalisierten Meßphotos dar, die zur Erhöhung der plastischen Wirkung mit Techniken der Bildverarbeitung geschummert wurde; zusätzlich sind Höhenlinien eingetragen.

An dieser Stelle soll über weitere glazialgeodätische Arbeiten auf dem Juneau Icefield nicht weiter berichtet werden. Eine ausführliche Darstellung wird in Kürze in einer Monographie erfolgen [Welsch et al., 1994].

Ausblick

Gerade die letzten beiden Arbeiten Professor Dorrers am Nanga Parbat haben gezeigt, daß seine glazialgeodätischen Ambitionen noch keineswegs erloschen sind. Die intensive Beschäftigung mit den unmittelbaren Aufgaben seines Fachgebietes mag ihn für einen längeren Zeitraum von aktiven glaziologischen Expeditionen ferngehalten haben, sie hat ihn aber auch in die Lage versetzt, die Leistungsfähigkeit der modernen Technologien auf das ihm anscheinend immer noch liebe Gebiet der Glazialgeodäsie anzuwenden, um dieser Wissenschaft neue Möglichkeiten zu eröffnen.

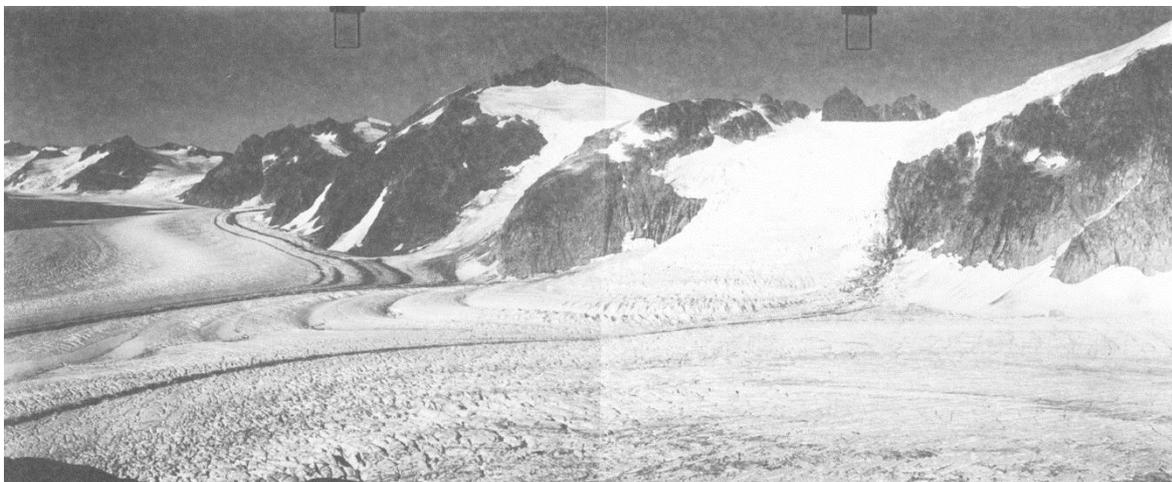
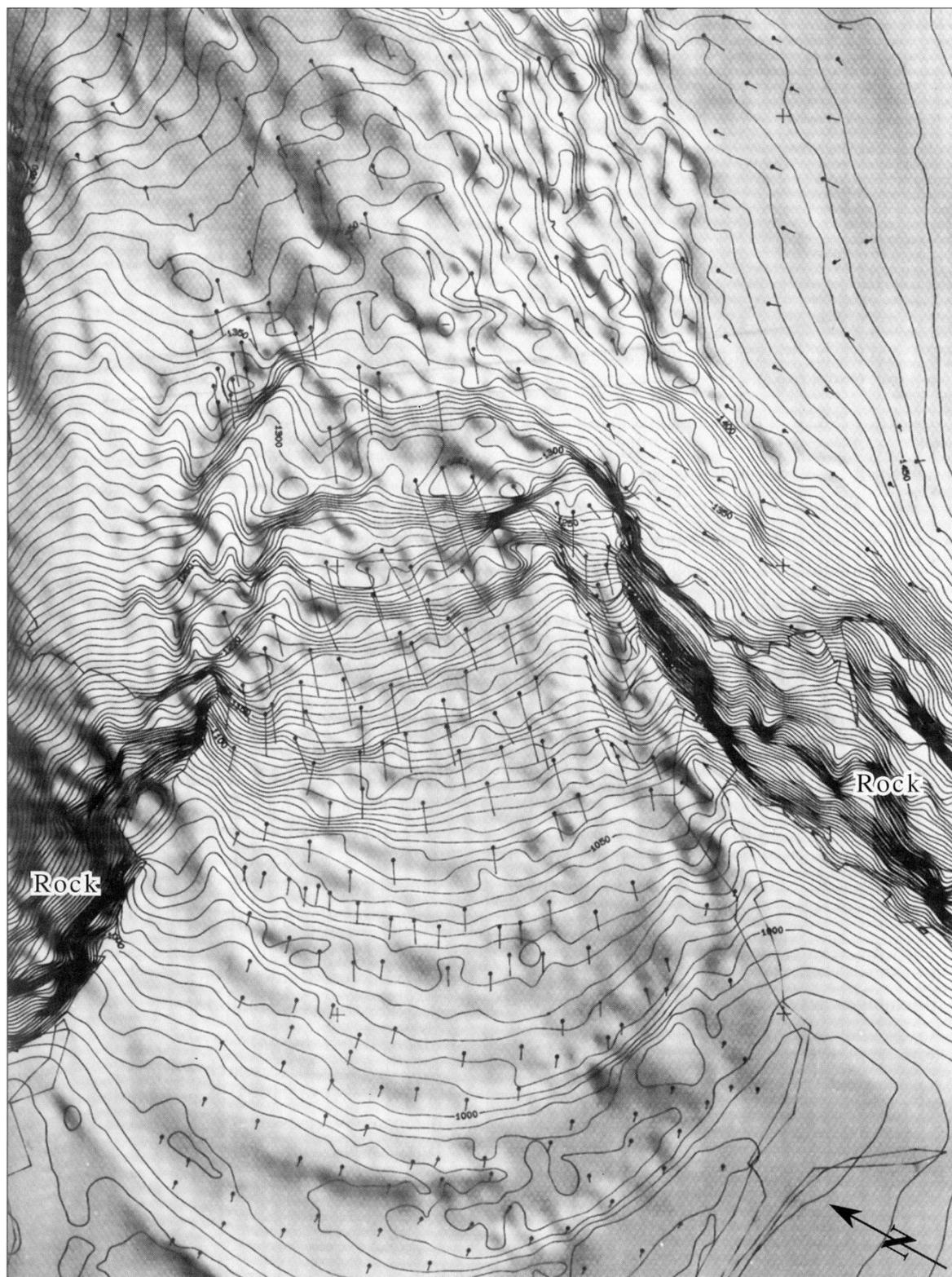


Abb. 6: Der Vaughan Lewis-Icefall



Local Survey Network
August 15, 1982

Spatial Vectors of Movement / Day,
July 29 - August 19, 1982

Scale

Scale

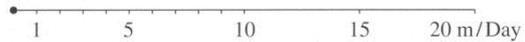


Abb. 7 Tägliche Eisbewegungen im Vaughan Lewis-Icefall

Dank

Ich danke Frau Bruni Dorrer und Herrn Dr. Oskar Reinwarth herzlich für die Gespräche, die mir geholfen haben, den Überblick über das glazialgeodätische Schaffen Professor Dorrers zu schreiben.

Literatur

- Dorrer, E. [1963]:* Präzisionswinkelmessung in der Antarktis. Polarforschung, 33. Jahrgang, Band 5, Heft 1/2, Goslar, S. 188-190
- Dorrer, E. [1965]:* Präzisionswinkelmessung bei der Ross-Ice-Shelf-Survey-Expedition 1962-63. Zeitschrift für Vermessungswesen, 90. Jahrgang, Heft 4, Stuttgart, S. 125-128
- Dorrer, E. [1967]:* Die Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit ausgedehnter Gletschergebiete. Ein Beitrag zur Erfassung horizontaler Bodenbewegungen mit geodätischen Methoden. Zeitschrift für Vermessungswesen, 92. Jahrgang, Heft 5, Stuttgart, S. 183-189
- Dorrer, E., Hofmann, W., Seufert, W. [1969]:* Geodetic Results of the Ross Ice Shelf Survey Expeditions, 1962-63 and 1965-66. Journal of Glaciology, Vol. 8, Cambridge, S. 67-90
- Dorrer, E. [1970]:* Movement Determination of the Ross Ice Shelf, Antarctica. International Association of Scientific Hydrology, Publications No. 86, Gent/Brügge, S. 467-471
- Dorrer, E., Hofmann, W., Nottarp, K., Seufert, W. [1971]:* Geodätische Geschwindigkeitsbestimmungen auf dem Ross-Schelfeis in der Antarktis. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 181, Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 65 S.
- Dorrer, E. [1971]:* Movement of the Ward Hunt Ice Shelf, Ellesmere Island, N.W.T., Canada. Journal of Glaciology, Vol. 10, No. 59, Cambridge, S. 211-226
- Dorrer, E. [1976]:* Climatological and Photogrammetric Speculations on Mass-Balance Changes of McCall Glacier, Brooks Range, Alaska. Journal of Glaciology, Vol. 17, No. 77, Cambridge, S. 479-490
- Dorrer, E. [1989]:* Zur Bildgeometrie von Landschaftsgemälden. Bildanalysen am Beispiel zweier Gletschergemälde von Schlagintweit aus dem Jahre 1856. – In: Festschrift Wilhelm Kick. Acta Albertina Ratisbonensia, Band 46, Regensburg, S. 29-38
- Dorrer, E. [1990]:* Ein entzerrtes Panoramastück der Südseite des Nanga Parbat-Massivs. – In: Brunner, K., Ebner, H. (Hrsg.): Festschrift für Rüdiger Finsterwalder zum 60. Geburtstag. Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München, München, S. 41-49
- Hofmann, W., Dorrer, E., Nottarp, K. [1964]:* The Ross Ice Shelf Survey 1962-1963. Antarctic Research Series, Vol. 2, American Geophysical Union, Publications No. 1197, Washington, D.C., S. 83-118
- Kick, W., Dorrer, E. [1964]:* Photogrammetrische Gletschervermessungen in Norwegen. Zur Kartenbeilage Tunsbergdalsbre mit den Gletscheränderungen seit Finsterwalders Aufnahme 1937. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 71. Jahrgang, Heft 11, Karlsruhe, S. 422-432
- Rentsch, H., Welsch, W., Heipke, Chr., Miller, M. M. [1990]:* Digital Terrain Models as a Tool for Glacier Studies. Journal of Glaciology, Vol. 36, No. 124, Cambridge, S. 273-278
- Welsch, M., Lang, M., Miller, M. M. [1994]:* Juneau Icefield Research Program – Geodetic Activities 1981-1993. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, in Vorbereitung

Fachbeiträge

Wahrnehmungspsychologische Aspekte der Herstellung von Satelliten-Bildkarten

Zusammenfassung

Karten werden »für die Augen« gemacht. Deshalb sollten die Erkenntnisse der Wahrnehmungspsychologie bei der Gestaltung beachtet werden. Dies gilt ganz besonders für die Herstellung von Satelliten-Bildkarten. Dazu werden die räumliche Wirkung von Helligkeitsgradienten und die Integration von graphischen Elementen in Bildkarten diskutiert. Es zeigt sich, daß schwarze Schriften und Signaturen zu bevorzugen sind und ihre Sichtbarkeit in dunklen Bildbereichen mittels Digitaler Bildverarbeitung verbessert werden kann.

Summary

Maps are made »for the eyes«. Therefore the results of psychology of perception can be helpful for map design purposes. This especially applies to the production of satellite image maps. The paper discusses the three-dimensional interpretation of shadows and the integration of graphical elements in image maps. It becomes evident that black letters and symbols should be preferred and that their visibility in dark regions of the image can be improved by image processing techniques.

1. Einleitung

Die Kartographie unterscheidet bekanntlich seit langem zwischen zwei großen Gruppen von Karten. In den *Topographischen Karten* sind »Situation, Gewässer, Geländeformen, Bodenbewachsung und eine Reihe sonstiger ... Erscheinungsformen« der Hauptgegenstand der Darstellung. In *Thematischen Karten* werden dagegen »Erscheinungen und Sachverhalte zur Erkenntnis ihrer selbst« dargestellt, wie es in reichlich gestellter Formulierung von der Internationalen Kartographischen Vereinigung ausgedrückt wurde (zitiert nach Hake [1982]).

Neben diesen beiden klassischen Formen von Karten gibt es seit Jahrzehnten eine weitere Form,

die *Bildkarten*. Dabei handelte es sich zunächst um *Luftbildkarten*, die aus entzerrten Luftbildern abgeleitet wurden. Aber schon kurz nachdem im Jahre 1972 die ersten Bilder des Landsat-Multispektralscanners verfügbar waren, wurden Versuche unternommen, auch diese neuartigen Bilddaten in Bildkarten umzusetzen; es entstanden die ersten *Satelliten-Bildkarten* [US Geological Survey, 1973].

Ausgehend von diesen – aus heutiger Sicht noch sehr unvollkommenen – Versuchen, konnten moderne Methoden zur Herstellung von Satelliten-Bildkarten entwickelt werden, wobei in durchgreifender Weise von den sehr flexiblen Methoden der Digitalen Bildverarbeitung Gebrauch gemacht wird (z.B. Albertz et al. [1987; 1988], Rivereau et al. [1992]). Diese Verfahren sind technisch weitgehend ausgereift und werden in großem Umfang praktisch eingesetzt [Galtier und Baudoin, 1992].

Die Lösung technischer Herstellungsprobleme heißt aber noch nicht, daß auch die damit zusammenhängenden gestalterischen Fragen geklärt wären. In dieser Beziehung zeigen viele veröffentlichte Satelliten-Bildkarten noch ein unbefriedigendes Ergebnis. Sie weisen nicht nur eine große Variationsbreite in der Gestaltung auf, sondern verraten auch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Kombination der für eine Karte unerläßlichen graphischen Elemente mit den Bilddaten. Leitlinien für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet können aus Erkenntnissen der Wahrnehmungspsychologie abgeleitet werden.

2. Warum Wahrnehmungspsychologie?

Karten werden »für die Augen« gemacht. Jeder Mensch hat sehr viel Erfahrung in der Verarbeitung optischer Reize, da er die Mehrzahl der Informationen über seine Umwelt durch die visuelle Wahrnehmung erhält. Sie hilft uns, etwas über unsere Umwelt zu erfahren, uns in ihr zu orientieren, auf sie einzuwirken und sie zu verändern. Diese Tatsache macht man sich – in der Regel ganz unbewußt – auch bei der Betrachtung und Interpretation

von Bildern zunutze. Dies gilt selbstverständlich auch für Luft- und Satellitenbilder. Doch auch die Kartographie »lebt« vom Vorgang des Sehens, von der visuellen Wahrnehmung. Jede Karte wird mit dem Ziel hergestellt, daß ein Kartenbenutzer topographische bzw. thematische Informationen nicht nur »sieht«, sondern auch ihren räumlich-geometrischen Zusammenhang erfassen kann. Keine verbale Beschreibung und keine Statistik vermag Informationen über eine Landschaft so schnell, vollständig, hierarchisch strukturiert und räumlich geordnet zu vermitteln wie eine kartographische Darstellung. Der Erfolg hängt freilich von der Gestaltung der Karte ab. Diese ist um so besser, je schneller, vollständiger und zuverlässiger die für einen Benutzer wichtigen Informationen visuell wahrgenommen werden können. Umgekehrt hat es Eduard Imhof recht drastisch formuliert: »Karten, die man nicht lesen kann, gehören in den Papierkorb« [Imhof, 1972, S. 215].

Folgerichtig zieht sich durch die Entwicklungsgeschichte der Kartographie das Bemühen, topographische und thematische Informationen möglichst »richtig«, sicher und übersichtlich anzubieten. Dabei wurde zu jeder Zeit von der reichhaltigen Erfahrung Gebrauch gemacht, die ein Kartenbenutzer in der Verarbeitung visueller Informationen hat. Um so erstaunlicher ist es, daß wahrnehmungspsychologische Fragen in der kartographischen Literatur nur eine geringe Rolle spielen. Die Kartographie scheint – unabhängig von der Wahrnehmungspsychologie – weitgehend ihren eigenen empirischen Weg gegangen zu sein.

Im Hinblick auf die Herstellung und Gestaltung von Satelliten-Bildkarten sollen hier zwei wahrnehmungspsychologische Aspekte angesprochen werden, nämlich die räumliche Wirkung von Helligkeitsgradienten sowie das Figur-Grund-Verhältnis, das bei der Integration von graphischen Elementen in ein Bild zum Tragen kommt.

3. Helligkeitsgradienten und ihre räumliche Wirkung

Die Bilder auf unserer Augennetzhaut sind flächenhaft. Dennoch sehen und erleben wir – auch wenn wir nicht stereoskopisch sehen – stets eine räumliche Welt um uns. Mehr noch: Auch beim Betrachten eines photographischen Bildes der Umwelt »sehen« wir nicht die Bildfläche, die wir vor Augen haben, sondern wir interpretieren den Bildinhalt in aller Regel unbewußt räumlich. Wir nehmen Körper in bestimmten Formen wahr, haben eine Vorstellung von ihrer Größe und Entfernung

und verbinden damit unmittelbar auch eine bestimmte (räumliche) Beleuchtungssituation. Bei dieser räumlichen Interpretation eines Bildes gelten »Gesetze des Sehens« – so der Titel eines klassischen Buches auf diesem Gebiet [Metzger, 1975]. Sie wurden in der Wahrnehmungspsychologie vielfach analysiert, unter Laborbedingungen experimentell untersucht und auch in ihrem Zusammenwirken studiert (dazu z.B. auch Gibson [1973], Rock [1985]).

Dabei ergab sich, daß bei der räumlichen Wahrnehmung unserer Umwelt wie auch bei der räumlichen Interpretation von Bildinhalten eine Reihe von Faktoren zusammenwirken. Es gibt einerseits gewisse geometrische Formen, die wir aufgrund unserer Erfahrung zwingend als räumliche Objekte oder als Bilder von ihnen interpretieren. Fast alle anderen Faktoren können als Gradienten gedeutet werden, nämlich als Größengradienten (Perspektive), Helligkeitsgradienten, Dichtegradienten, Texturgradienten, Farbgradienten und Kontrastgradienten (hierzu auch Albertz [1970]). Die Beiträge, die diese Gradienten im einzelnen zur räumlichen Wahrnehmung leisten, können sehr verschieden sein. In einer einfachen Perspektivzeichnung beispielsweise kann nur der Größengradient vorkommen, in einer farbigen Landschaftsphotographie wirken meist alle Gradienten zusammen.

In diesem Zusammenhang von speziellem Interesse ist die räumliche Wirkung von *Helligkeitsgradienten*. Diese entstehen aus dem Zusammenspiel von Oberflächenformen, Beleuchtungsverhältnissen und Beobachtungsrichtung. Aufgrund unserer Erfahrung »interpretieren« wir Helligkeitsgradienten in unserem Gesichtsfeld als die Folge von Oberflächenformen. Dieses wahrnehmungspsychologische Phänomen ist zwingend und unmittelbar wirksam, keineswegs das Ergebnis eines bewußten Prozesses. Es setzt voraus, daß der Betrachter der ihm dargebotenen Helligkeitsverteilung (wiederum unbewußt) einen bestimmten Ort der Lichtquelle zuordnet. Erfahrungsgemäß wird dabei die Stellung der Lichtquelle oberhalb des Gesichtsfeldes bzw. Bildes bevorzugt, meist links oben [Lauenstein, 1938; Albertz, 1970; Metzger, 1975]. Wenn die beobachteten Helligkeitsgradienten tatsächlich durch andere Beleuchtung entstanden sind und sonstige zwingende Faktoren der Raumwahrnehmung fehlen, kann es zu Fehlwahrnehmungen (Inversionen) kommen, durch die Höhen und Tiefen vertauscht erscheinen (Abb. 1). Um die beste räumliche Wirkung von Luft- und Satellitenbildern zu erzielen, sollte diese demnach so betrachtet werden, daß die tatsächliche Geländebeleuchtung im Gesichtsfeld von (links) oben kommt.

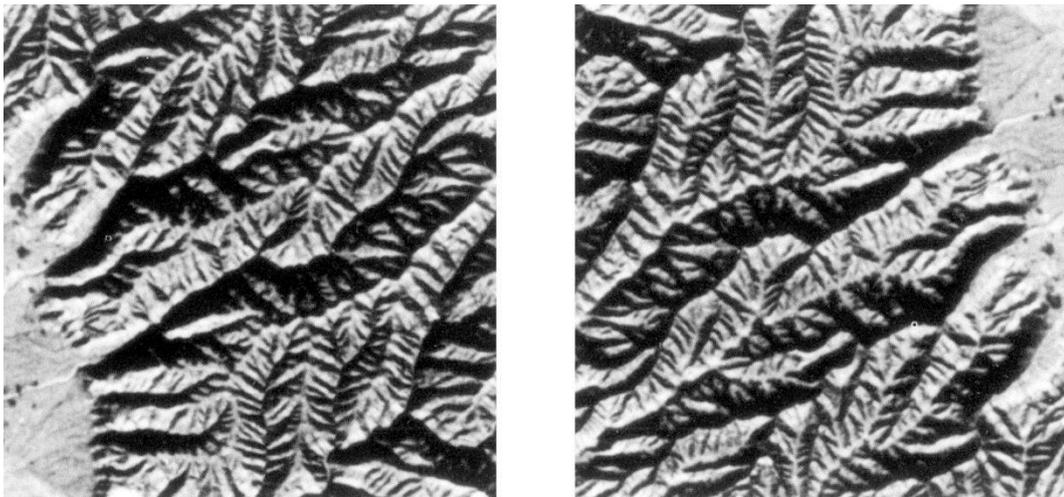


Abb. 1: Beispiel für den Inversionseffekt durch die Geländebeleuchtung: Ausschnitt aus einem Satelliten-Bild von Somalia, aufgenommen mit der Metric Camera 1983. Im linken Bild kommt die tatsächliche Beleuchtung von unten, was zur Inversion führt. Nach Drehen des Bildes um 180° (rechts) stimmt die angenommene Beleuchtungsrichtung mit der tatsächlichen gut überein; es entsteht ein richtiger Raumeindruck.

Bekanntlich macht die Kartographie in reichem Maße Gebrauch von der räumlichen Wirkung von Helligkeitsgradienten. Offenbar wurde diese Wirkung früh erkannt und durch empirisches Vorgehen allmählich genutzt, ohne daß dabei auf wahrnehmungspsychologische Erkenntnisse Bezug genommen worden wäre. Der klassische Vorläufer dieser Entwicklung ist das erste amtliche Kartenwerk der Schweiz 1 : 100 000, die berühmte *Dufourkarte* (Abb. 2). Sie benutzte zur Geländedarstellung Schattenschraffen, die unter der Annahme einer aus etwa nordwestlicher Richtung (d. h. im Kartenblatt von oben links) kommenden Beleuchtung so gestochen wurden, daß nahezu der Eindruck von unechten Halbtönen entstand. Dabei wurde nicht eine Geländebeleuchtung simuliert, sondern es wurden kombinierte Schraffen benutzt, die noch immer nach dem Prinzip »je steiler, desto dunkler« gestaltet wurden. Die zunächst als unwissenschaftlich eingestufte Karte hat große Akzeptanz gefunden und den Weltruf der schweizerischen Kartographie mitbegründet. Der Grund dafür ist einsichtig: Durch die Einführung der Schattenschraffen wurde sie den wahrnehmungspsychologischen Gesetzmäßigkeiten besser gerecht als jede andere Geländedarstellung zuvor.

Der nächste Schritt wurde erst möglich, nachdem gegen Ende des vorigen Jahrhunderts die Autotypie erfunden worden war, also Halbtöne drucktechnisch vervielfältigt werden konnten, so daß künstlich erstellte Helligkeitsgradienten als Schummerung in topographischen Karten eingefügt werden konnten.

Bei der weiteren Entwicklung war das Vorgehen zur Wahl der einschlägigen Parameter (Beleuchtungsrichtung, Richtungsvariationen, Steilheit der Gradienten, Farbtöne u. ä.) wiederum weitgehend empirisch bestimmt. Seither wurden die Techniken zur Herstellung von Schummerungen zu einem hohen Stand entwickelt. Die Ergebnisse, die die topographische Kartographie heute zu bieten hat, erfüllen



Abb. 2: Ausschnitt aus der »Topographischen Karte der Schweiz« im Maßstab 1 : 100 000, der sogenannten *Dufourkarte*, herausgegeben zwischen 1844 und 1864. Die Schattenschraffen kommen wahrnehmungspsychologischen Gesetzen in hohem Maße entgegen.

jedenfalls die aus der Sicht der Wahrnehmungspsychologie zu stellenden Anforderungen.

Eine völlig neue Situation entstand mit dem Aufkommen von Bildkarten. Während bei der Schummerung die Helligkeitsgradienten künstlich so gestaltet werden können, wie es für die Wahrnehmung der Geländeformen in topographischen Karten am besten ist, liegen in Luft- und Satellitenbildern natürlich entstandene Helligkeitsgradienten vor. Der Grund ist selbstverständlich, daß die Erdoberfläche während der Aufnahme der Bilder stets durch schräg einfallendes Sonnenlicht beleuchtet wird, was bei unebenem Gelände zu ungleichmäßigen Beleuchtungsstärken und damit zu Helligkeitsgradienten führt. Bei der Betrachtung derartiger Bilder kommt eine hervorragende räumliche Wirkung zustande, wenn die tatsächliche Beleuchtungsrichtung im Bild wiederum von links oben kommt. Für die Nordhalbkugel der Erde bedeutet dies aber, daß man die Bilder nach Süden orientieren müßte, da die Beleuchtung während der Bildaufnahme stets aus südlichen (in den meisten Fällen aus südöstlichen) Richtungen kommt. Dem steht jedoch die kartographische Konvention entgegen, topographische Kartenwerke nach Norden zu orientieren. Bei der Herstellung von Satelliten-Bildkarten kommt man aus pragmatischen Gründen nicht umhin, sich dieser Konvention anzuschließen. Die wenigen Beispiele, bei denen wegen dieser Gegebenheiten eine Südorientierung von Bildkarten der Nordhalbkugel gewählt wurde (z. B. *Kelnhöfer und Kraus [1986/87]*), können nur als Ausnahmen eingestuft werden. Praktisch besteht keine Chance, wegen dieser Effekte die gesamte geodätisch-kartographische Welt »auf den Kopf zu stellen«.

Damit müssen sich die Hersteller und vor allem die Nutzer von Satelliten-Bildkarten abfinden. Dies fällt deswegen nicht so schwer, weil die Sache in der Praxis oft weniger relevant ist als man vielleicht anzunehmen geneigt ist. Einerseits sind große Bereiche der Erdoberfläche relativ flach bzw. morphologisch so gestaltet, daß es gar nicht in nennenswertem Maße zu Inversionseffekten kommt. Andererseits sind die durch die schräge Beleuchtung entstehenden Helligkeitsgradienten nur ein Merkmal zur Wahrnehmung von Oberflächenformen. Andere Elemente der Wahrnehmung, vor allem Landschafts- und Bildstrukturen, anthropogene Objekte und Schlagschatten sowie das Vorwissen des Betrachters vermitteln räumliche Informationen, die mögliche Inversionseffekte teilweise kompensieren. Besonders störend bleiben derartige Inversionseffekte aber bei Bildkarten von Landschaften, in denen kaum andere Merkmale der räumlichen Wahrnehmung vorkommen, also bei-

spielsweise in ariden, vegetationslosen Landschaften ohne anthropogene Elemente und insbesondere in Gebirgsregionen.

Nun ist es grundsätzlich denkbar, die durch die schräge Südost-Beleuchtung der Oberflächenformen verursachten Helligkeitsgradienten unter Verwendung eines Digitalen Geländemodells zu korrigieren und neue, durch eine angenommene Nordwest-Beleuchtung erzeugte Schattierungen einzuführen. Ein solches Vorgehen setzt ein genaues Digitales Geländemodell und die Modellierung der komplizierten Beleuchtungsverhältnisse (z. B. der Richtungsabhängigkeit der Objektreflexionscharakteristik und des Atmosphäreneinflusses) voraus. Der dazu erforderliche Aufwand dürfte bei der allgemeinen Herstellung von Satelliten-Bildkarten vorläufig kaum vertretbar sein. Aber in Sonderfällen – etwa in der Planetenkartographie – wird man die Notwendigkeit für dieses Vorgehen anders bewerten müssen (vgl. Teil 5).

4. Graphische Element in Bildkarten

Eine *Bildkarte* ist stets mehr als nur ein Bild. Der Übergang vom (entzerrten, maßstäblichen) Satellitenbild zur Satelliten-Bildkarte setzt voraus, daß der bildhafte Inhalt des Kartenfeldes durch wichtige graphische Elemente ergänzt wird, die allgemein als Kennzeichen einer Karte gelten. Dazu gehören außer dem Kartenrahmen und diversen Angaben auf dem Kartenrand stets auch Erläuterungen im Kartenfeld (Namen, Ziffern u. ä.), meist aber auch weitere graphische Elemente wie Gitterlinien, Signaturen, Höhenlinien usw.. In einer Satelliten-Bildkarte, bei der die *bildhafte* Information im Vordergrund steht, wird man zusätzliche topographische Einträge auf ein Mindestmaß beschränken. Nach *Dowman et al. [1989]* sollte beispielsweise eine Bildkarte 1 : 50 000 durch Einträge ergänzt werden, die den Spezifikationen einer konventionellen Karte 1 : 250 000 nahekommen. Aber es besteht grundsätzlich das Problem, zwei gänzlich verschiedene Dinge – nämlich die diskrete, scharf und kontrastreich abgegrenzte Graphik und die flächige, unscharfe und relativ kontrastarme Bildvorlage – so zu vereinigen, daß sie beide gut erkennbar sind und sich gegenseitig möglichst wenig beeinträchtigen. Zur Lösung der Aufgabe, die konkurrierende graphische Wirkung von Bildinformation und graphischer Zusatzinformation miteinander zu kombinieren, können wiederum wahrnehmungspsychologische Erkenntnisse beitragen.

Als *technisches* Problem ist die Integration graphischer Elemente in die Bilddaten relativ leicht zu lösen. Darüberhinaus handelt es sich aber um eine *gestalterische* Aufgabenstellung, die für die Kartographie neu ist. Zwar gibt es eine lange Tradition und reiche Erfahrung mit der Kombination graphischer Elemente in einer konventionellen Karte. Bisher liegen aber noch sehr wenige Studien zur Integration von Schriften, Linien, Signaturen usw. in Bildkarten vor. Lediglich für großmaßstäbige, einfarbige Luftbildkarten gibt es systematische Untersuchungen [Schweißthal, 1967]. Die damit gewonnenen Erfahrungen lassen sich jedoch kaum auf farbige Bildkarten anderer Maßstabsbereiche übertragen. Deshalb verraten die zahlreichen, von den verschiedensten Stellen veröffentlichten Satelliten-Bildkarten noch eine große Unsicherheit auf diesem Gebiet.

Der Beitrag der Wahrnehmungspsychologie zur Lösung des Problems läßt sich aus den Erkenntnissen zum Figur-Grund-Verhältnis ableiten (z. B. Metzger [1966; 1975], Albertz [1970], Rock [1985]). Es ist bekannt, daß das Sehfeld einer flächenhaften Gliederung unterliegt. Die entstehenden Flächen sind nicht gleichwertig, sondern hierarchisch strukturiert. Einzelne Teile werden als (geometrisch begrenzte) Figuren und andere als (unbegrenzter) Grund wahrgenommen (Abb. 3).

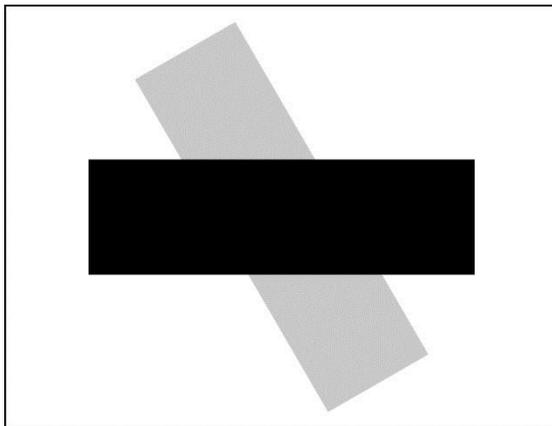


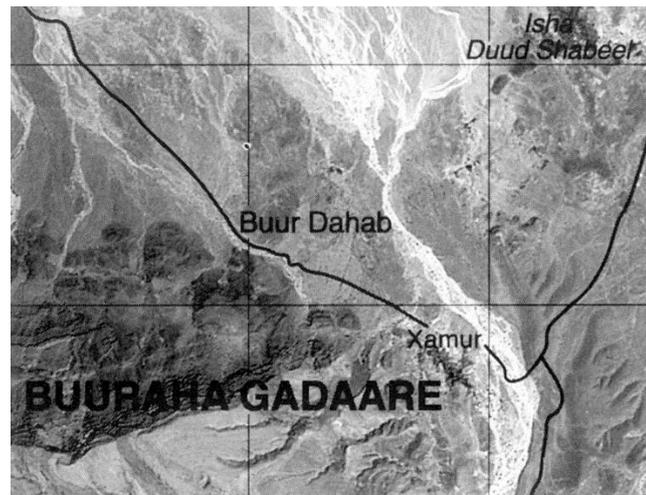
Abb. 3: Einfaches Beispiel zum Figur-Grund-Verhältnis und zur amodalen Ergänzung im Wahrnehmungsprozeß. Ein unbeeinflusster Beobachter »sieht« zwei Rechtecke, ein graues sowie ein schwarzes, welches das graue teilweise verdeckt. Die komplizierter geformte weiße Fläche wird überhaupt nicht als Objekt wahrgenommen, sondern hat den Charakter eines unstrukturierten Hintergrundes.

Wir sind es nun gewohnt, eine schwarze Schrift als Figur vor einem weißen (oder wenigstens hellen Grund zu sehen), der uns (stets unbewußt!) als »hinter der Figur durchgehend« erscheint. Selbst mit bewußter Anstrengung können wir uns das Gegenteil kaum vorstellen. Dasselbe Phänomen tritt auf, wenn uns eine schwarze Schrift im Bilduntergrund einer Satelliten-Bildkarte begegnet: wir empfinden auch diese Schrift als Figur vor dem Bild, das von ihr nur verdeckt, aber »eigentlich« nicht unterbrochen ist. Eine Negativschrift dagegen wird nicht als Figur vor dem Bilduntergrund gesehen, viel eher erscheint das Bild als Figur vor einem weißen Grund. Dann aber wirkt es nicht mehr als zusammenhängendes und nur teilweise verdecktes Ganzes, sondern ist als Figur durch die Schriftelemente wie durch Löcher deutlich unterbrochen. Aus diesem Grunde ist die Bildwirkung durch eine negative Schrift deutlich stärker gestört als durch eine positive (vgl. Abb. 4a und b).

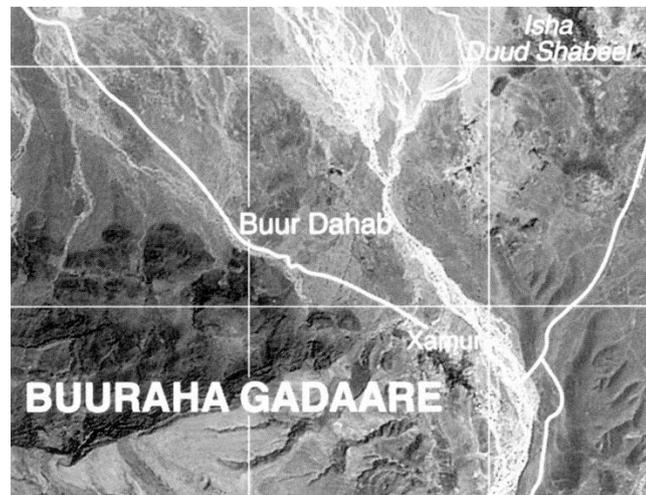
Hinzu kommt ein zweiter Effekt, der in der Wahrnehmungspsychologie als »amodale Ergänzung« bekannt ist [Michotte et al., 1966]. Was damit gemeint ist, wird wiederum aus dem einfachen Beispiel der Abb. 3 deutlich: Hier »sehen« unbeeinflusste Beobachter immer zwei übereinandergelegte, vollständige Rechtecke. Zwei tatsächlich vorliegende Trapeze werden also im Wahrnehmungsprozeß zu einer nach unserer Erfahrung sinnvoll erscheinenden Ganzheit ergänzt. Unsere alltägliche Wahrnehmungswelt ist voll von solchen Ergänzungsvorgängen, da wir viele Gegenstände unserer Umwelt nur teilweise verdeckt sehen, sie uns aber dennoch als Ganzheiten erscheinen. Offenbar ergänzen wir in der Wahrnehmung dann auch die durch Schriften oder andere graphische Elemente unterbrochenen – also verdeckt erscheinenden – Bildstrukturen zu unserer Erfahrung gemäß sinnvollen Ganzheiten. Aber auch dieser Effekt kann nur wirksam sein, wenn die graphischen Elemente als schwarze Figuren vor dem Bilduntergrund wahrgenommen werden (Abb. 5).

Um die in einer Bildkarte enthaltenen Bildstrukturen möglichst wenig zu stören, sollten also Ansätze zur Lösung des Integrationsproblems aus wahrnehmungspsychologischen Gründen davon ausgehen, daß die graphischen Elemente schwarz dargestellt werden (Abb. 4a). Dann muß aber ihre Erkennbarkeit in dunklen Bildbereichen verbessert werden. Dies kann man mit Mitteln der Digitalen Bildverarbeitung erreichen, indem man die Flächen um die graphischen Elemente aufhellt, so daß ein verlaufender, heller Saum entsteht [Albertz et al., 1992]. Die Erkennbarkeit der graphischen Elemente in den dunklen Bildbereichen wird dadurch deutlich

- a) Graphische Elemente in schwarzer Farbe in das Bild integriert und deshalb in dunklen Bereichen schlecht erkennbar.



- b) Negative graphische Elemente sind in hellen Bildbereichen schlecht erkennbar und stören die Bildwirkung stark.



- c) Graphische Elemente in schwarzer Farbe in das Bild integriert und in dunklen Bildbereichen durch eine Bildaufhellung besser erkennbar gemacht.

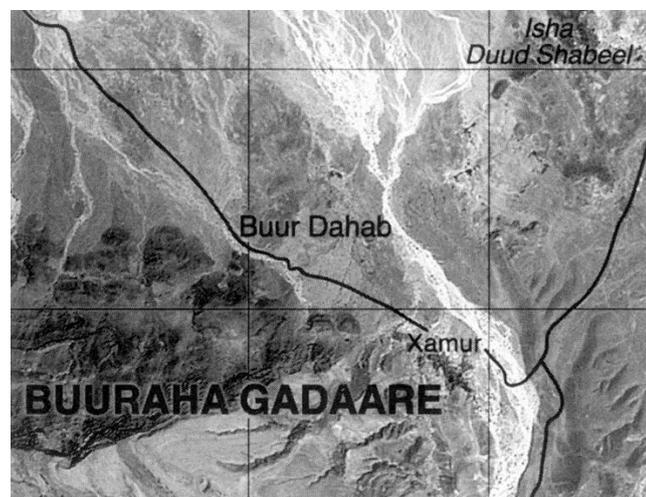


Abb. 4: Zur Integration von graphischen Elementen in Bildkarten

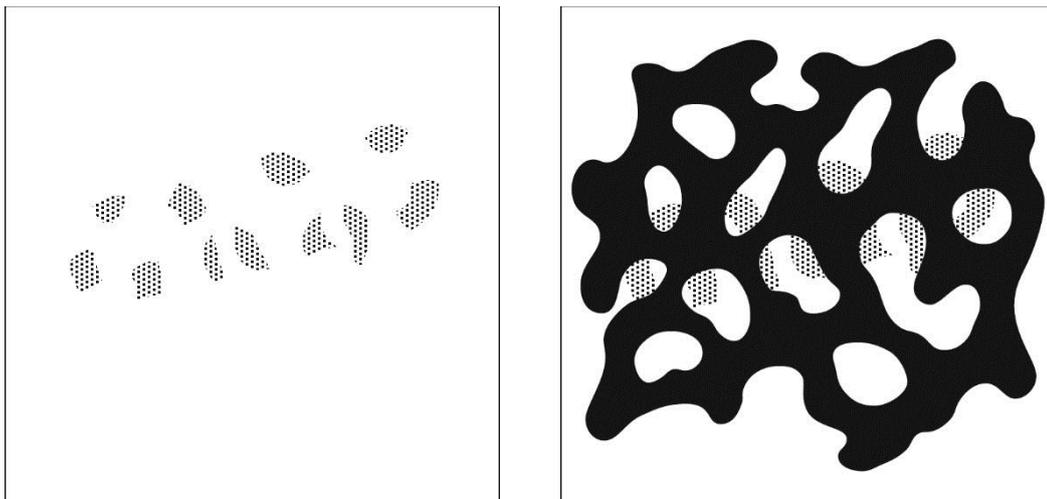


Abb. 5: Zur Wirkung der amodalen Ergänzung. Ohne Vorinformation ist es kaum möglich, den grauen Flecken links eine sinnvolle Bedeutung zuzuordnen. Erst wenn sie mit einer Bildgestalt kombiniert werden, die als »Figur« davor wahrgenommen wird (rechts), werden sie zu einer teilweise verdeckt erscheinenden Buchstabenfolge »map« ergänzt.

besser. Um zu vermeiden, daß der Aufhellungsprozeß auch in den hellen Bildteilen wirkt, wo dies gar nicht erforderlich ist, kann der Vorgang so modifiziert werden, daß die Aufhellung um die graphischen Elemente nur in den dunkleren Bildteilen wirksam wird.

Die Abb. 4 zeigt die Ausgangssituation mit schwarzer Graphik (a) sowie die das Bild stark störende Wirkung negativer Graphik (b). Eine gute Erkennbarkeit der graphischen Elemente bei einer nur geringen Beeinträchtigung der Bildinformation bietet das Ergebnis des nur in den dunklen Bildteilen wirkenden Aufhellungsprozesses (c).

5. Ausblick

Den hier angesprochenen wahrnehmungspsychologischen Aspekten wird in der weiteren Entwicklung von Satelliten-Bildkarten Beachtung zu schenken sein. Die Folgerungen, die sich aus dem Figur-Grund-Verhältnis für die Integration von graphischen Elementen in Bilddaten ergeben, können allgemein zu einer besseren Gestaltung von Bildkarten führen. Dagegen ist es kaum voraussagbar, ob es möglich und auch wirtschaftlich vertretbar sein wird, die naturbedingten Beleuchtungseffekte zu eliminieren und durch Einführung künst-

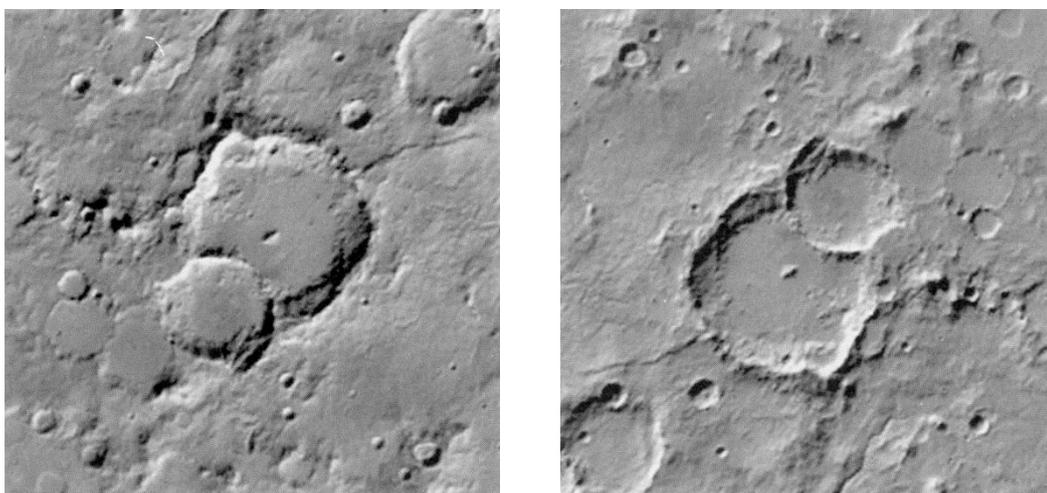


Abb. 6: Teil der Mars-Oberfläche, links mit Inversionseffekt, rechts mit richtiger Reliefwirkung (aufgenommen 1976 im Rahmen der amerikanischen Viking-Mission).

licher Helligkeitsgradienten eine optimale Geländedarstellung zu erzielen.

Als Sonderfall ist die Herstellung von Bildkarten von Planetenoberflächen zu sehen. In dieser Hinsicht wird der Mars in den nächsten Jahren im Mittelpunkt des Interesses stehen, da sich Deutschland mit zwei Kamera-Experimenten an der russischen Mission »Mars 94/96« beteiligt [Albertz et al., 1993]. Bei den zu erwartenden Bilddaten muß mit großen Beleuchtungsunterschieden und Schatten gerechnet werden. Zudem ist die Gefahr von Inversionseffekten sehr groß, da zusätzliche Kriterien der räumlichen Wahrnehmung fehlen (Abb. 6). Deshalb ist zu hoffen, daß es gelingt, die Beleuchtungseffekte zu eliminieren (»Deshading«) und neue Helligkeitsgradienten als Schummerung zu generieren (»Reshading«), so daß kartographisch hochwertige Bildkarten gewonnen werden können.

Literatur

- Albertz, J. [1970]: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation. Bildmessung und Luftbildwesen, 38. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, S. 25-34
- Albertz, J., Kähler, M., Kugler, B., Mehlbreuer, A. [1987]: A Digital Approach to Satellite Image Map Production. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, Band 75.3, Berlin, S. 833-872
- Albertz, J., Lehmann, H., Mehlbreuer, A., Scholten, F., Tauch, R. [1988]: Herstellung hochauflösender Satelliten-Bildkarten durch Kombination multisensoraler Datensätze. Internationales Jahrbuch für Kartographie, Band 28, Universitätsverlag, Ulm, S. 11-27
- Albertz, J., Lehmann, H., Tauch, R. [1992]: Herstellung und Gestaltung hochauflösender Satelliten-Bildkarten. Kartographische Nachrichten, 42. Jahrgang, Heft 6, Bonn, S. 205-213
- Albertz, J., Ebner, H., Neukum G. [1993]: Die Kamera-Experimente HRSC und WAOSS der Mission Mars 94/96. – In: Fritsch, D., Hobbie, D. (Hrsg.): Photogrammetric Week '93 (44. Photogrammetrische Woche 1993, Stuttgart). Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 121-134
- Dowman, I. J., Peacegood, G. [1989]: Information Content of High Resolution Satellite Imagery. Photogrammetria, Band 43, Amsterdam, S. 295-310
- Galtier, B., Baudoin, A. [1992]: Image Maps. Environment Observation and Climate Modelling through International Space Projects – Space in the Service of the Changing Earth – Symposium 2 »Image Processing, GIS and Space-Assisted Mapping«, International Space Year Conference, Munich. Conference Paper 2 (esa ISY-2). Commission of the European Communities, European Space Agency and German Space Agency, Paris, S. 169-173
- Gibson, J. J. [1950]: The Perception of the Visual World. Houghton Mifflin, Boston, XII, 235 S.
- Gibson, J. J. [1973]: Die Wahrnehmung der visuellen Welt. Beltz Verlag, Weinheim, 356 S.
- Hake, G. [1982]: Kartographie I. Sammlung Göschen, Band 2165. Verlag Walter de Gruyter, Berlin/New York, 6. Auflage, 342 S.
- Imhof, E. [1972]: Thematische Kartographie. Verlag Walter de Gruyter, Berlin/New York, 360 S.
- Kelnhöfer, F., Kraus, K. [1986/87]: Orthophotokarte Glurns 1 : 200 000. Beilage zu Photogrammetria, Band 41, Heft 2, Amsterdam
- Lauenstein, L. [1938]: Über die räumlichen Wirkungen von Licht und Schatten. Psychologische Forschung, Band 22, Berlin, S. 267-319
- Metzger, W. [1966]: Figural-Wahrnehmung. – In: Metzger, W. (Hrsg.): Handbuch der Psychologie, 1. Band, 1. Halbband – Wahrnehmung und Bewußtsein. Verlag Hogrefe, Göttingen, S. 693-744
- Metzger, W. [1975]: Gesetze des Sehens. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt/Main, 3. Auflage, 676 S.
- Michotte, A., Thinès, G., Crabbé, G. [1966]: Die amodalen Ergänzungen von Wahrnehmungsstrukturen. – In: Metzger, W. (Hrsg.): Handbuch der Psychologie, 1. Band, 1. Halbband – Wahrnehmung und Bewußtsein. Verlag Hogrefe, Göttingen, S. 978-1002
- Rivereau, J.-C., Munier, Ph., Le Blanc, S. [1992]: Map Production and Updating Using SPOT Data and SPOT Data Derived Products. Environment Observation and Climate Modelling through International Space Projects – Space in the Service of the Changing Earth – Symposium 2 »Image Processing, GIS and Space-Assisted Mapping«, International Space Year Conference, Munich. Conference Paper 2 (esa ISY-2). Commission of the European Communities, European Space Agency and German Space Agency, Paris, S. 163-167

Rock, I. [1985]: Wahrnehmung – Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen. Verlag Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 213 S.

Schweißthal, R. [1967]: Grundlagen, Bearbeitung und Herstellung großmaßstäbiger Luftbildkarten. Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für

Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Hochschule Hannover, Nr. 34, Hannover, 88 S.

US Geological Survey [1973]: Satellite Image Mosaic New Jersey 1 : 500 000. Reston, VA.

Frühe Anwendungen der Photogrammetrie für topographische Aufnahmen in der geowissenschaftlichen Forschung und auf Expeditionen

Zusammenfassung

Die frühen photogrammetrischen Verfahren Meßtischphotogrammetrie, Parallaxenphotogrammetrie und schließlich die terrestrische Stereophotogrammetrie fanden für die topographischen Landesaufnahmen der europäischen Staaten wenig Anwendung. Große Bedeutung haben sie jedoch auf Forschungsreisen und für gletscherkundliche Arbeiten. Der Aufsatz weist auf zumeist wenig bekannte Anwendungen in den Ostalpen, auf Spitzbergen und in den ehemaligen deutschen Kolonien in Afrika hin.

Summary

Early photogrammetric methods such as plane table photogrammetry, parallax photogrammetry and, last not least, terrestrial stereo photogrammetry have not preferably been applied for topographic national mapping of the European countries. However, these methods were of great importance with regard to expeditions and for glaciological tasks. This paper presents not well-known applications used for topographic mapping of the Eastern Alps, Spitsbergen and the former German Colonies in Africa.

1. Einleitung

Nach der Entwicklung der Meßtischphotogrammetrie – insbesondere durch A. Laussedat und A. Meydenbauer – war diesem frühen photogrammetrischen Verfahren in der topographischen Aufnahme der europäischen Staaten bekanntlich wenig Erfolg beschieden.

Lediglich in der amtlichen Landesaufnahme in den Ostalpen wurde diese photogrammetrische Methode durch die Militärgeographischen Institute Italiens (seit 1878) und Österreich-Ungarns (ab 1893)

erfolgreich und vielfach eingesetzt [Paganini und Schepp, 1891; Hübl, 1900; Bernhard, 1970].

Große Bedeutung hatten jedoch frühe photogrammetrische Verfahren für Kartierungen auf Forschungsreisen und zu gletscherkundlichen Zwecken. Die photogrammetrischen Kartierungen auf Forschungsreisen um die Jahrhundertwende sind aber heute weitgehend unbekannt und finden sich nur selten in einschlägigen technikgeschichtlichen Veröffentlichungen zur Photogrammetrie. Lediglich auf die Arbeiten W. Jordans in der Libyschen Wüste und die Kartierung von Persepolis durch F. Stolze wird regelmäßig hingewiesen.

Im folgenden soll auf eine Reihe derartiger Kartierungen mit Hilfe der Meßtischphotogrammetrie und später der terrestrischen Stereophotogrammetrie bis zum Ersten Weltkrieg aufmerksam gemacht werden. Diese Arbeiten wurden hauptsächlich in den Ostalpen sowie auf Forschungsreisen in Spitzbergen und Afrika durchgeführt.

2. Die Forschungsreisen von Jordan und Stolze

Während der Rohlfsschen Expedition in die Libysche Wüste in den Jahren 1873/74 hatte der Geodät W. Jordan gemeinsam mit dem Photographen Ph. Remele die Möglichkeit, eine topographische Aufnahme der libyschen Oasenstadt Gassr-Dachel mit der Meßtischphotogrammetrie (Einschneidephotogrammetrie) durchzuführen [Jordan, 1876; Albertz, 1986]. Abb. 1 gibt einen Ausschnitt aus dem »Plan der Oasenstadt Gassr-Dachel ...« Maßstab 1 : 5 000 wieder. Dem »Plan« ist auch die Meßanordnung zu entnehmen.

1874 bis 1878 konnte F. Stolze während einer Expedition in Persien Baudenkmale photogrammetrisch aufnehmen. Dabei gelang ihm die Aufnahme der Freitagsmoschee von Schiraz und des Ruinenfeldes von Persepolis [Albertz, 1986].

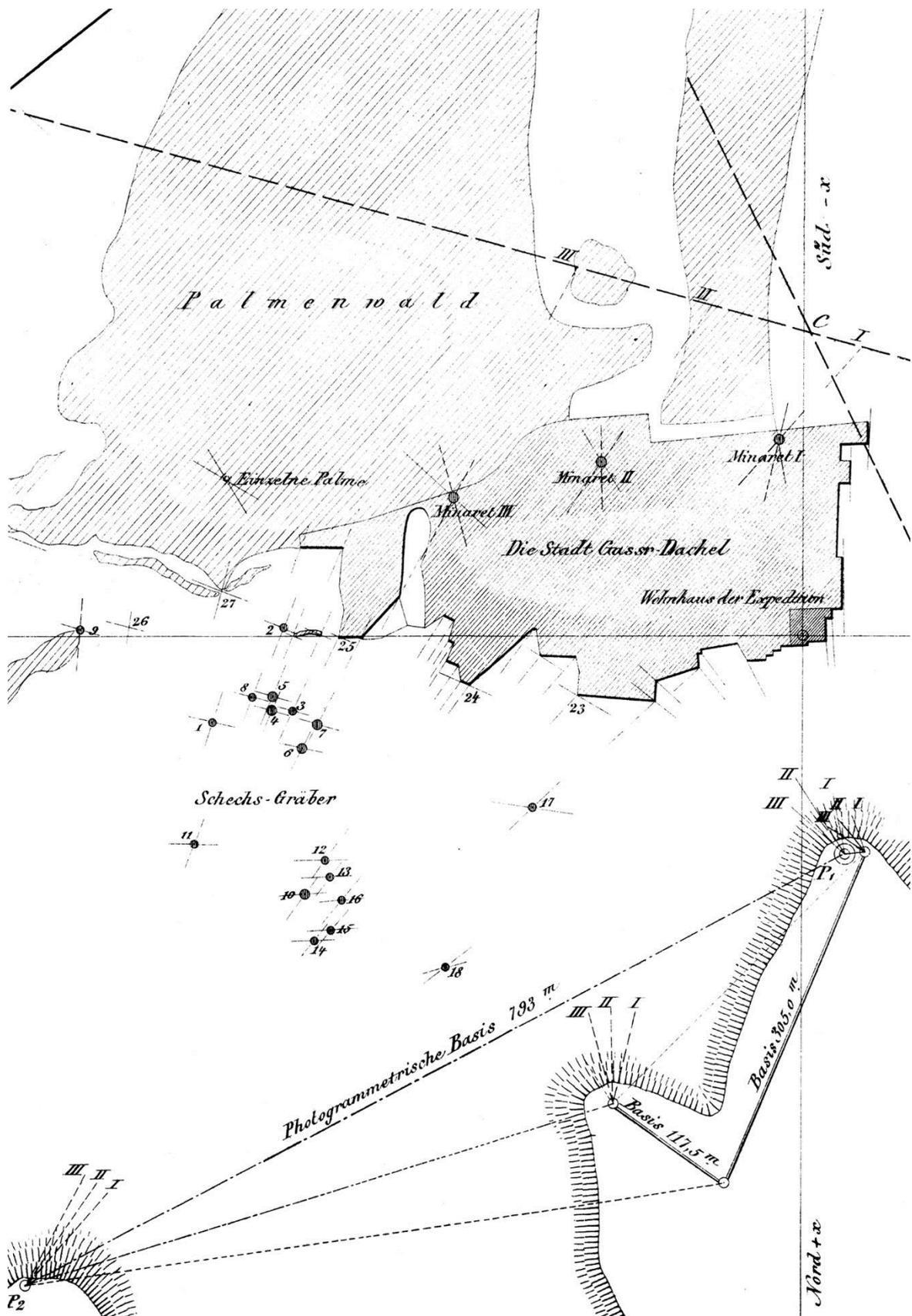


Abb. 1: Ausschnitt aus dem »Plan der Oasenstadt Gassr-Dachel ...«, Maßstab 1 : 5 000, von W. Jordan

3. Meßtischphotogrammetrie bei Expeditionen nach Spitzbergen

Kaum bekannt ist die Anwendung der Photogrammetrie bei Forschungsreisen nach Spitzbergen.

Bereits 1882 und 1896 führten die schwedischen Geologen G. De Geer und A. G. Nathorst meßtischphotogrammetrische Aufnahmen an einer Reihe von Gletschern Spitzbergens aus. Davon entstanden Kartierungen in den Maßstäben 1:20 000, 1:50 000 und 1:100 000 [Doležal, 1903; De Geer, 1913].

Während der Andréaschen Polarexpedition von 1896 nutzten E. Ekholm und N. Strindberg für topographische Aufnahmen teilweise die Meßtischphotogrammetrie. Es entstand die »Karta öfver Amsterdamön ...«, Maßstab 1:40 000, sowie eine Karte von Virgo's Harbour, Maßstab 1:20 000 [Strindberg, 1897].

Auch bei der schwedischen Arktisexpedition von 1898 unter der Leitung von A. G. Nathorst wurden topographische Aufnahmen mit klassischen Methoden durchgeführt; in einigen Bereichen setzte A. Hamberg dabei die Meßtischphotogrammetrie ein [Nathorst, 1899; Hamberg, 1905].

Kartographische Resultate dieser topographischen Aufnahmen während der Arktisexpedition von 1898 waren:

- »Karte der Baie Recherche und van Keulen Bay auf Spitzbergen«, Maßstab 1:100 000
- »Karte von Kung Karl's Land«, Maßstab 1:100 000
- »Karte von Beereneiland«, Maßstab 1:100 000.

Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt aus der »Karte der Baie Recherche und van Keulen Bay auf Spitzbergen« im Maßstab 1:100 000.

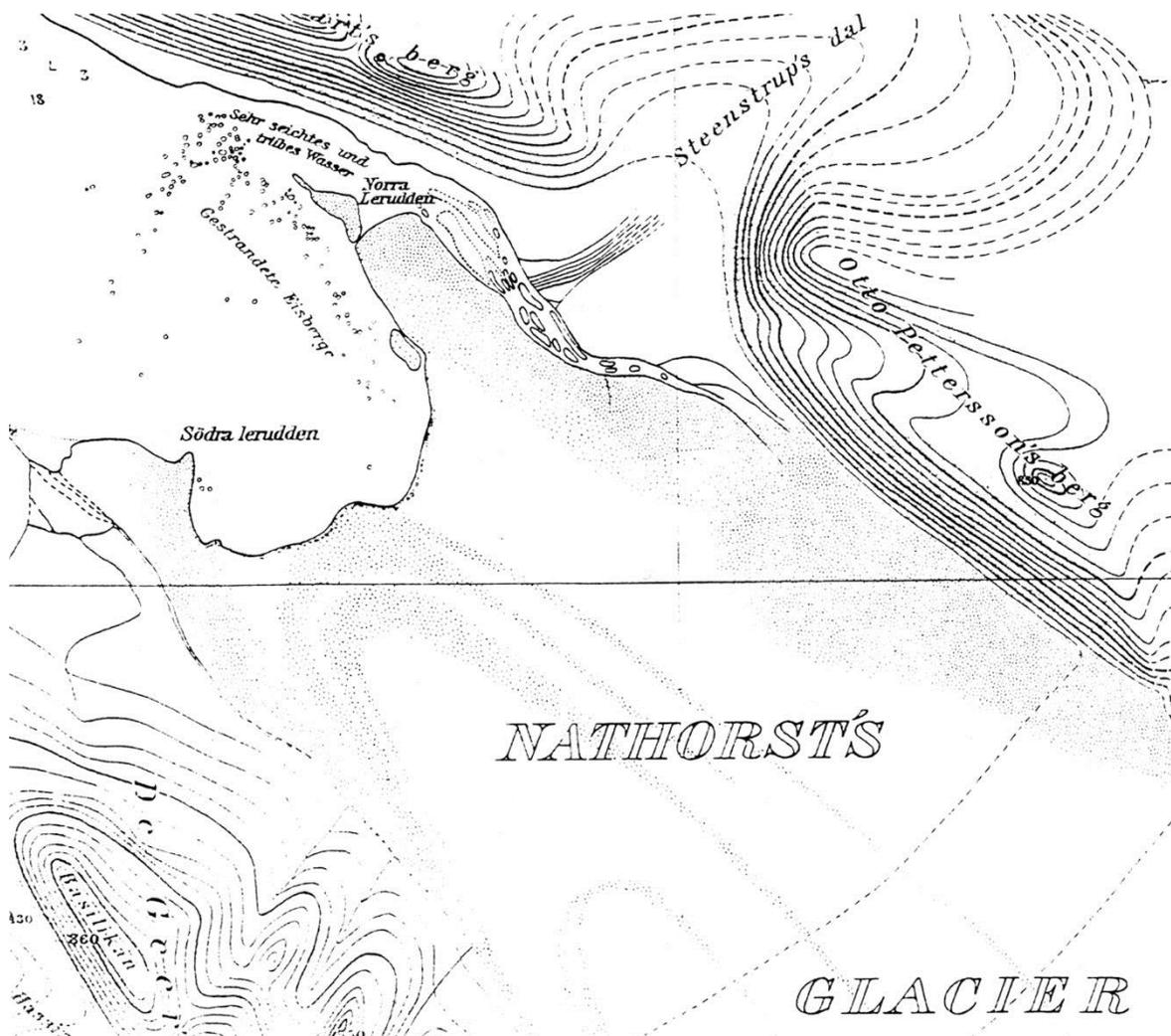


Abb. 2: Ausschnitt aus der »Karte der Baie Recherche und van Keulen Bay auf Spitzbergen« im Maßstab 1:100 000. Photogrammetrisch aufgenommen von A. Hamberg

In den Jahren 1899, 1900 und 1909 erfolgten anläßlich der russisch-schwedischen Meridianbogen-Expeditionen weitere photogrammetrische Aufnahmen durch N. C. Ringertz und G. De Geer. So bearbeitete N. C. Ringertz 1899 die Karte »North-west Island 1 : 50 000« [Doležal, 1903] und De Geer eine Karte des Gänsegletschers im Maßstab 1 : 50 000. Am Gänsegletscher wurden später mehrfach Wiederholungsmessungen ausgeführt.

In Nordwest-Spitzbergen führte G. Isachsen in den Jahren 1906/07 umfangreiche meßtischphotogrammetrische Arbeiten. Ergebnis waren Karten im Maßstab 1 : 100 000 [Doležal, 1903].

4. Gletscheraufnahmen in den Ostalpen mittels Meßtischphotogrammetrie

Ab 1880 erfolgten in der Annahme eines Minimalstandes der Alpengletscher in den Ostalpen großmaßstäbige Gletscherkartierungen zu gletscherkundlichen Zwecken [Brunner, 1988a]. Die klassische Meßtischaufnahme, aber auch die damals sehr moderne Tachymetrie erwiesen sich für diese Aufgabe wenig geeignet.

So setzte S. Finsterwalder in den Sommern 1888/89 die Meßtischphotogrammetrie (Einschneidephotogrammetrie) bei der Aufnahme des Vernagt- und Guslarferners (Ötztaler Alpen, Tirol) ein. Damit war erstmals die Kartierung eines Gesamtgletschers im großen Maßstab 1 : 10 000 möglich. Dabei wurden auf 45 Standpunkten 110 Meßbilder belichtet. Ergebnis dieser Anwendung der Photogrammetrie war die Karte »Der Vernagt-Ferner im Jahre 1889«, Maßstab 1 : 10 000.

Zur Herstellung der Karte waren 1 350 Punkte zu konstruieren und ihre Höhe zu berechnen. Hierzu mußten insgesamt 5 400 Bildkoordinatenmessungen ausgeführt werden [Finsterwalder, 1896 und 1897]. Die Genauigkeit dieser meßtischphotogrammetrischen Aufnahme untersuchten Brunner [1988b] und Pillewizer [1989]. Dabei wurde die Genauigkeit der graphischen Lagebestimmung (graphisches Einschneiden) σ_p und jene der rechnerischen Höhenbestimmung σ_h wie folgt ermittelt [Brunner, 1988b]:

$$\sigma_p = \pm 3.8 \text{ m}$$

$$\sigma_h = \pm 1.8 \text{ m}$$

Beachtlich genaue Werte also.

Von den ersten Gletscherkartierungen in Spitzbergen durch De Geer und Nathorst (siehe Kap. 3) wußte Finsterwalder offensichtlich nichts.

Dieser frühen meßtischphotogrammetrischen Aufnahme eines Alpengletschers folgte im Jahre 1892 die Kartierung des Obersulzbachferners (Venediger Gruppe) im Maßstab 1 : 10 000 durch G. Kerschensteiner und des Alpeiner Gletschers (Stubaier Alpen), Maßstab 1 : 7 500, durch H. Heß.

Gleichfalls im Jahre 1892 setzte das Topographische Bureau des Bayerischen Generalstabes mit Unterstützung von S. Finsterwalder die Meßtischphotogrammetrie – neben traditionellen Methoden – zu Aufnahmen der Felspartien des Zugspitzplatts ein; hierbei wurden ca. 500 Punkte photogrammetrisch bestimmt. Diese Arbeiten erfolgten im Rahmen der topographischen Neuaufnahme Bayerns [Jäger, 1892 und 1893]. Dabei entstand auch die Karte »Zugspitze 1 : 10 000«. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt dieser Karte.

Diese und weitere Aufnahmen von Ostalpengletschern durch Meßtischphotogrammetrie sind in Tabelle 1 aufgelistet; die Karten haben in der Regel ebenfalls den großen Maßstab 1 : 10 000.

Tabelle 1: Aufnahmen von Ostalpengletschern durch Meßtischphotogrammetrie

1888/89:	Vernagt- und Guslarferner (s. o.)
1892:	Obersulzbachferner (s. o.)
1892:	Alpeiner Ferner (s. o.)
1893:	hochgelegene Teile des Hochjochferners (Ötztaler Alpen) durch H. Heß
1894:	Hintereisferner (Ötztaler Alpen) durch A. Blümcke und H. Heß
1895:	Nachmessung der Zungen von Vernagt- und Guslarferner durch H. Heß und A. Blümcke
1900:	Karlseisfeld (Dachsteingruppe) durch A. von Hübl
1904:	Obersulzbachgletscher durch E. Rudel als Wiederholungsmessung
1906:	Suldenferner (Ortlergruppe) durch S. Finsterwalder und M. Lagally; hier wurde versuchsweise auch die »Parallaxenphotogrammetrie« angewendet.
1907:	Teile des Hochjochferners durch O. v. Gruber als Wiederholungsmessung
1909:	Alpeiner Ferner durch M. Lagally als Wiederholungsmessung.

Von diesen Aufnahmen wurden Karten, zumeist im Maßstab 1 : 10 000, abgeleitet.



Abb. 3: Karte »Zugspitze 1 : 10 000«. Aufgenommen vom Topographischen Bureau des Bayerischen Generalstabes

Zur Aufnahme des Karlseisfeldes (heute: Hallstätter Gletscher) ließ A. von Hübl, der nachmalige Leiter des Militärgeographischen Instituts in Wien, Militärkolonnen über den Gletscher marschieren, um gut identifizierbare Punkte zu erhalten. Kontrastarme Photographien stören bei der Einschnidephotogrammetrie noch mehr als bei der Stereophotogrammetrie.

Einen Gletscher enthält auch eine interessante außeralpine Kartierung mittels Meßtischphotogrammetrie: Der österreichische Forschungsreisende A. Penther kartierte 1902 die Gebirgslandschaft von Erdschias-Dagh in der Türkei mit dieser frühen photogrammetrischen Methode. Aus knapp 300 Meßbildern kartierte der Kartograph Tsamler den Inhalt der »Karte des Erdschias-Gebietes« im Maßstab 1 : 80 000 [Penther, 1905].

5. Parallaxenphotogrammetrie zur punktweisen Kartierung von Hochgebirgsaufnahmen

Mit dem von Pulfrich entwickelten und erstmals 1901 gebauten Stereokomparator war durch die so mögliche Parallaxenmessung die Stereophotogrammetrie, zunächst als Parallaxenphotogrammetrie, geboren. Allerdings war zur Kartenherstellung damit lediglich eine punktweise Kartierung möglich.

Zu Gletschervermessungen in den Alpen wurde die Parallaxenphotogrammetrie mit anschließender punktweiser Kartierung schon sehr bald eingesetzt; so zunächst 1906 versuchsweise am Suldenferner [Finsterwalder, 1906; Finsterwalder und Lagally, 1913].

1909 benutzt A. von Hübl diese Methode bei der Aufnahme des Goldberggletschers in der Rauris (Glockner Gruppe). Es wurden hierzu neun Standlinie beobachtet; am Stereokomparator waren 1 200 Bildpunkte zu messen [Hübl, 1912].

Eine Aufnahme sowohl mittels Meßtisch- als auch mit Parallaxenphotogrammetrie – sowie mit klassischen Methoden – führte F. Scheck im Jahre 1908 im Zahmen Kaiser aus. Ergebnis waren eine Karte des Plateaus des Zahmen Kaisers im Maßstab 1 : 2 500 [Distel und Scheck, 1911] und eine Karte des gesamten Zahmen Kaisers im Maßstab 1 : 10 000 [Scheck, 1912]. Die topographischen Arbeiten von Scheck im Kaisergebirge wurden später bei der Herstellung der Alpenvereinskarte des Kaisergebirges, Maßstab 1 : 25 000, verwendet.

Im außeralpinen Bereich ist die Aufnahme von Gletschern im Kaukasus durch L. Distel und H.

Burmester im Jahre 1911 zu vermerken. Die Stände des Schchedülgletschers, des Asaugletschers und des südlichen Adürgletschers wurden dabei in Karten mit dem Maßstab 1 : 20 000 festgehalten [Burmester, 1913].

6. Erste stereophotogrammetrische Auswertungen von Aufnahmen im Hochgebirge

Bereits 1912 benutzte O. von Gruber den Stereoaufnahmen von Orel/Zeiss zur Auswertung einer terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme des Vernagtferners.

Erst 1920, also nach dem Krieg, erfolgten weitere terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen von Ostalpengletschern, welche am Stereoaufnahmen ausgewertet wurden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Karten von Gletschern, die auf terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen beruhen

Karte »Der Hintereisferner im Jahre 1920«, Maßstab 1 : 10 000. Bearbeitet von H. Heß und G. Schatz [Heß, 1923].

Karte »Der Talschluß des Schlegeisgrunds im Zillertal 1921«, Maßstab 1 : 10 000. Bearbeitet von S. Finsterwalder und J. Sartorius [Finsterwalder, 1923].

Karte »Der Talschluß des Kaunertals in den Ötztaler Alpen mit dem Gepatsch- und Weißseeferner« vom Jahre 1922, Maßstab 1 : 20 000. Bearbeitet von Sebastian, Ulrich und Richard Finsterwalder [Finsterwalder, 1928].

Ebenfalls nach dem Krieg konnten die photogrammetrischen Aufnahmen der Pamir-Expedition des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins vom Jahre 1913 durch O. von Gruber am Stereoaufnahmen ausgewertet werden. Einige Bereiche mußten jedoch durch Ergänzungsstrukturen mittels Meßtischphotogrammetrie kartiert werden [Gruber, 1923].

7. Photogrammetrie in den deutschen Kolonien in Afrika

Die vermessungstechnischen und kartographischen Arbeiten in den ehemaligen deutschen Kolonien in Afrika sind heute wenig bekannt, verdienen

aber Beachtung, so insbesondere auch die ersten Anwendungen photogrammetrischer Methoden. Die Kartierungsarbeiten dienten dabei der Dokumentation von Expeditionen, aber auch zur Herstellung amtlicher Kolonialkartenwerke auf der Grundlage von Forschungsreisen [Brunner, 1990].

Erste Anwendungen der Photogrammetrie in Form der Meßtischphotogrammetrie wurden bereits 1903 in West-Usumbara in Deutsch-Ostafrika versucht, allerdings mit wenig befriedigenden Ergebnissen [Techmer, 1904]. Hierbei wurde ein 12 km langer, 400 m hoher, meist kahler Hang aufgenommen. Das Gebiet beinhaltete auch Felsflächen und war nur vereinzelt mit hohem Steppengras bewachsen. Die Kartierung erfolgte im Maßstab 1 : 25 000 und wurde später in eine Karte von West-Usumbara 1 : 100 000 eingebracht. Techmer [1904] führt Probleme bei der Punktidentifizierung auf und gibt eine Genauigkeit der rechnerischen Höhenbestimmung von ± 3.5 m an.

Die Oberflächenformen in Afrika – mit den vorwiegend flachen Decken und fehlenden alpinen Gebirgen – waren aber insgesamt wenig für den Einsatz der Verfahren der terrestrischen Photogrammetrie geeignet.

Erfolgreicher als die Arbeiten Techmers in West-Usumbara verliefen topographischen Kartierungen mittels terrestrischer Photogrammetrie deshalb im Gebirgsland von Ruanda ab [Weiß, 1910].

So setzte der Topograph M. Weiß während der Zentralafrika-Expedition des Herzogs Adolf Friedrich zu Mecklenburg in den Jahren 1907 und 1908 die Parallaxenphotogrammetrie im Kirunga-Vulkangebiet in Deutsch-Ostafrika ein. Die insgesamt 170 Stereopaare wurden am Komparator ausgewertet. Die so gewonnenen Kartierungen dienten unter anderem auch der Bearbeitung der beiden Kartenblätter »Das Vulkangebiet von Deutsch-Ostafrika«, Maßstab 1 : 100 000 [Weiß, 1919; Obst, 1921].

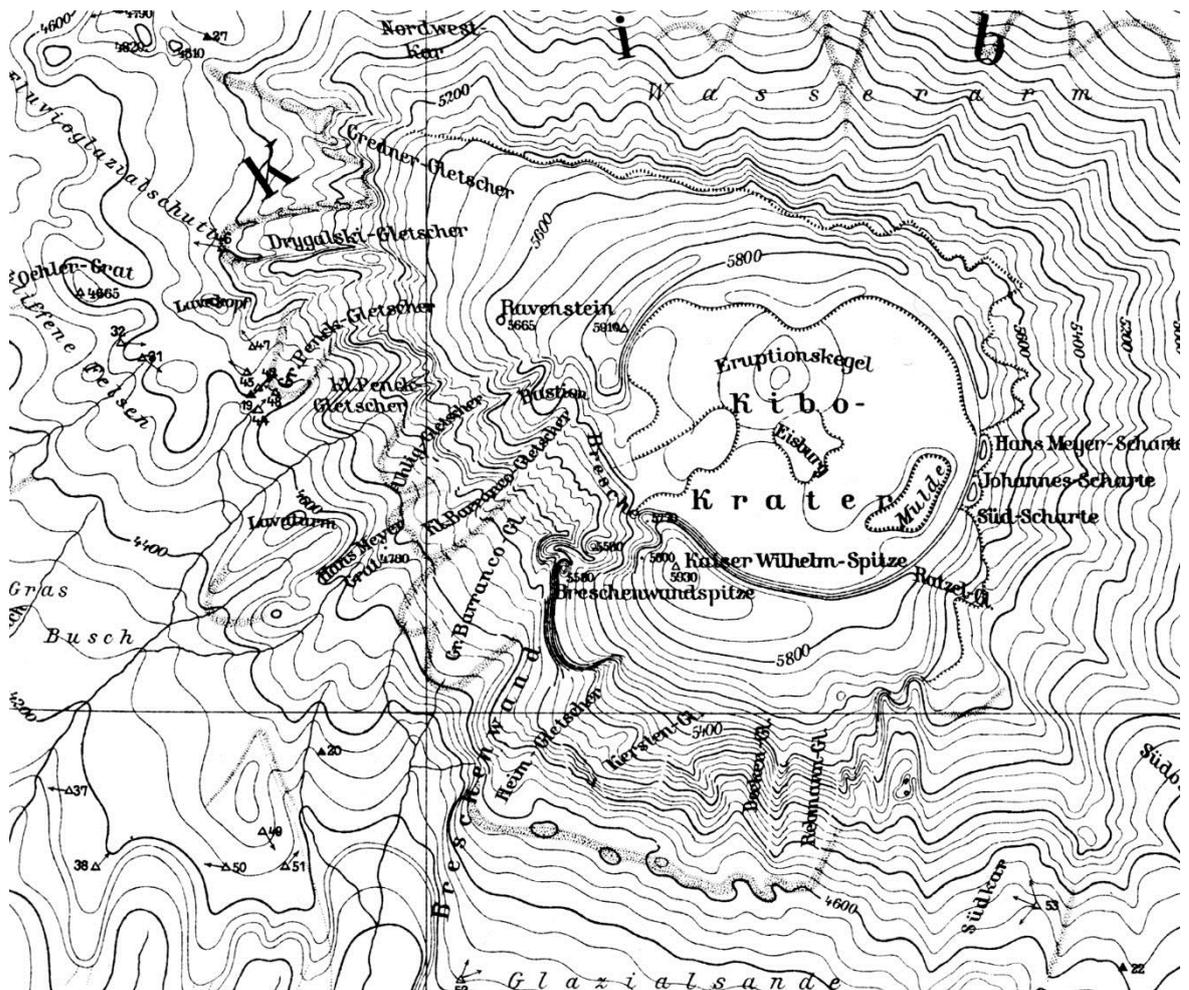


Abb. 4: »Karte der Hochregion des Kilimandscharo-Gebirges« im Maßstab 1 : 50 000 von F. Klute und E. Oehler

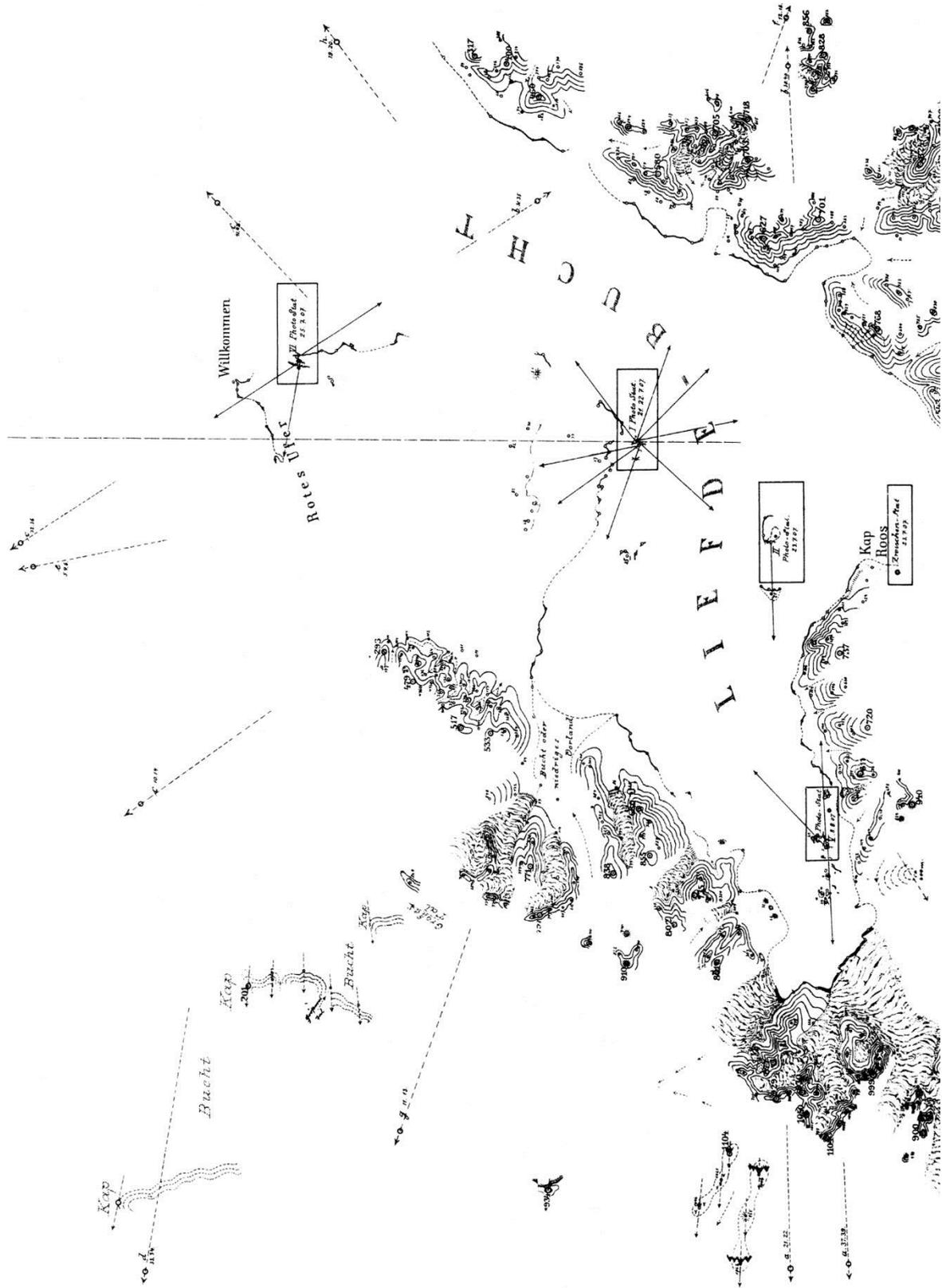


Abb. 5: Auswertung der photogrammetrischen Aufnahme der Liefde-Bucht auf Spitzbergen 1907 (verkleinert)

Spätere stereophotogrammetrische Aufnahmen von M. Weiß im Bergland von Urundi wurden bereits am Stereoautographen der Preußischen Landesaufnahme ausgewertet.

In Deutsch-Südwestafrika nutzte man die terrestrische Photogrammetrie zur Erstellung einiger Aufnahmeblätter im Maßstab 1:100 000 für das amtliche Kolonialkartenwerk für Deutsch-Südwestafrika im Maßstab 1:400 000.

Auch Anwendungen zu Forschungszwecken gab es: So kartierten F. Klute und E. Oehler den Kilimandscharo – damals der höchste deutsche Berg – mit Hilfe der terrestrischen Stereophotogrammetrie. Die Auswertung erfolgte am Stereokomparator. Die »Karte der Hochregion des Kilimandscharo-Gebirges« im Maßstab 1:50 000 erschien erst 1921 [Klute, 1921; Brunner, 1990]. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt der sehr modern wirkenden Karte.

Im benachbarten (britischen) Uganda führte der Österreicher R. Kmunko bereits 1912 eine parallaxenphotogrammetrische Aufnahme des Mount Elgus aus [Kmunko, 1913 a und b]. Ergebnis war die »Karte des Kraters von Mount Elgus in Uganda«, Maßstab 1:40 000.

Eine späte Anwendung der Meßtischphotogrammetrie besorgte R. Maack in Südwestafrika. Während dreier Forschungsreisen in den Jahren 1916 bis 1919 – Deutsch-Südwestafrika war bereits an Großbritannien übergeben – nahm er im Namib-Randgebirge den Brandberg, Teile der Tsondab-Wüste und des Randgebirges von Ababes auf. Aus diesen Aufnahmen leitete der Kartograph Hofmann zwei Karten im Maßstab 1:100 000 ab. Auf den Maßstab 1:200 000 reduzierte Karten liegen Maack [1923 und 1924] bei.

8. Stereophotogrammetrische Aufnahmen in Spitzbergen

Der umfangreichen Anwendung der Meßtischphotogrammetrie bei Forschungsreisen in Spitzbergen (Kap. 3) schloß sich sehr bald auch die terrestrische Photogrammetrie an:

Während einer Spitzbergen-Expedition im Jahre 1907 hatten die Offiziere der Topographischen Abteilung des (preußischen) Großen Generalstabes F.-K. von Bock und G. Poninski die Möglichkeit, stereophotogrammetrische Aufnahmen durchzuführen [Bock, 1908]. Die Aufnahme erfolgte innerhalb weniger Tage in der Liefde Bucht in Nordwest-Spitzbergen.

Die Ausmessung der Bilder am Stereokomparator und die Konstruktion einer Karte im Maßstab 1:100 000 besorgte der Topograph P. Seliger der Preußischen Landesaufnahme [Seliger, 1911].

Abb. 5 zeigt in einem (verkleinerten) Ausschnitt Höhenlinien (Äquidistanz 100 m) als Ergebnis der photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung, Abb. 6 den identischen Ausschnitt der endgültigen Karte »Die Liefde-Bucht«, Maßstab 1:200 000. Die ergänzte Topographie (Küstenlinien, Schraffen) entstammt flüchtigen Aufnahmen vom Schiff aus.

Stereophotogrammetrische Aufnahmen auf Spitzbergen und Auswertungen am Stereoautographen erfolgten in der Zwischenkriegszeit und auch noch nach dem Zweiten Weltkrieg und sind vor allem mit dem Namen W. Pillewizer verknüpft [Pillewizer, 1939 und 1968].

9. Schluß

In der Zwischenkriegszeit konnte die terrestrische Photogrammetrie bei einer Reihe beachtenswerter außeralpiner Expeditionen ihre herausragende Bedeutung zur Kartierung von Hochgebirgen unter Expeditionsbedingungen zeigen. Es sei nur auf die Alpenvereins-Expedition in den Alai Pamir, in die Cordillera Real (Peru) sowie auf die deutschen Himalaya-Expeditionen hingewiesen.

In den Kulturländern wurde die Luftbildphotogrammetrie in dieser Zeit zum wichtigsten Zweig der Photogrammetrie und sie fand zunehmend in der amtlichen Landesaufnahme Anwendung. Die Bedeutung der terrestrischen Photogrammetrie in der Topographie nahm rapide ab, aber bis in die siebziger Jahre wurde sie noch bei Expeditionen und zu gletscherkundlichen Zwecken in den Ostalpen eingesetzt.

Literatur

Albertz, J. [1986]: Franz Stolze und die Photogrammetrie. Zum 75. Todestag des Berliner Privatgelehrten. – In: Albertz, J., List, F. K. und Schultz, G. (Hrsg.): Ingenieurphotogrammetrie, Fernerkundung für Ökologie und Entwicklungshilfe. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 12.-15. Mai 1985, Berlin. Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main, S. 29-47

- Bernhard, J. [1970]:* Die Photogrammetrie im Dienste der Landesaufnahme. – In: Die amtliche Kartographie Österreichs. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, S. 97-112
- Bock, F.-K. von [1908]:* Versuch photogrammetrischer Küstenaufnahmen gelegentlich einer Spitzbergen-Expedition im Sommer 1907. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, Band 43, Berlin, S. 599-604
- Brunner, K. [1988a]:* Exakte großmaßstäbige Karten von Alpengletschern – Ein Säkulum ihrer Bearbeitung. Petermanns Geographische Mitteilungen, 132. Jahrgang, Heft 2, Gotha, S. 129-140
- Brunner, K. [1988b]:* Die Meßtischphotogrammetrie als Methode der topographischen Geländeaufnahme des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Bildmessung und Luftbildwesen, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 56. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 98-108
- Brunner, K. [1990]:* Karten Ostafrikas um die Jahrhundertwende. Ein Beitrag zur Kolonialkartographie. – In: *Lindgren, U. (Hrsg.):* Kartographie und Staat. Interdisziplinäre Beiträge zur Kartographiegeschichte. Institut für Geschichte und Naturwissenschaften, München, S. 47-53
- Burmester, H. [1913]:* Recent-glaciale Untersuchungen von photogrammetrischen Aufnahmen im Baksanquellgebiet im Kaukasus. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 8, Berlin, S. 1-41
- De Geer, G. [1913]:* The North Coast of Spitzbergen, Western Part. Ymer, Band 33, Heft 3, Stockholm, S. 231-277
- Distel, L., Scheck, F. [1911]:* Das Plateau des Zahnen Kaisers, Kartographisch-morphologische Studie. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München, Band V, Heft 2, München, S. 97-165
- Doležal, E. [1903]:* Photogrammetrische Arbeiten in Schweden. Zeitschrift für Vermessungswesen, 32. Jahrgang, Heft 18, Stuttgart, S. 273-282
- Finsterwalder, S. [1896]:* Zur photogrammetrischen Praxis. Zeitschrift für Vermessungswesen, 25. Jahrgang, Stuttgart, S. 225-240
- Finsterwalder, S. [1897]:* Der Vernagtferner, seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, I. Band, 1. Heft, Graz, IV, 112 S.
- Finsterwalder, S. [1906]:* Die Neuvermessung des Suldenferners im August 1906. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 1, Berlin, S. 302-305
- Finsterwalder, S. [1923]:* Der Schlegeisgrund im Zillertal in Tirol. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 13, Berlin, S. 1-7
- Finsterwalder, S. [1928]:* Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 16, Berlin, S. 20-41
- Finsterwalder, S., Lagally, M. [1913]:* Die Neuvermessung des Suldenferners 1906 und Veränderungen seither. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 7, Berlin, S. 145-182
- Gruber, O. von [1923]:* Topographische Ergebnisse der Pamir-Expedition des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins 1913. Internationales Archiv für Photogrammetrie, 6. Band, Wien, S. 156-181
- Hamberg, A. [1905]:* Astronomische, photogrammetrische und erdmagnetische Arbeiten der von A. G. Nathorst geleiteten schwedischen Polar-expedition 1898. Kungliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar, Band 39, No. 6, Uppsala/Stockholm, S. 1-40
- Heß, H. [1923]:* Der Hintereisferner 1893 bis 1922. Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimas, Band 13, Berlin, S. 145-203
- Hübl, A. Freiherr von [1900]:* Die photogrammetrische Terrainaufnahme. Mitteilungen des k.k. Militär-Geographischen Instituts, Band XIX, 1899, Wien, S. 78-144
- Hübl, A. Freiherr von [1901]:* Karlseisfeld-Forschungen der k.k. Geographischen Gesellschaft, 1. Teil: Topographische Aufnahme des Karlseisfeldes in den Jahren 1899-1900. Abhandlungen der k.k. Geographischen Gesellschaft in Wien, 3. Band, Nr. 1, Wien, 25 S.
- Hübl, A. Freiherr von [1903]:* Die Stereophotogrammetrie. Mitteilungen des k.k. Militär-Geographischen Instituts, Band XXII, 1902, Wien, S. 139-154
- Hübl, A. Freiherr von [1912]:* Die stereophotogrammetrische Aufnahme des Goldberggletschers im August des Jahres 1909. Denkschriften der k.k. Akademie der Wissenschaften, Mathematische Classe, 87. Band, Wien, S. 153-160

- Jäger, O. [1892]:* Topographische Aufnahme im Gebirge. Bayerisches Industrie- und Gewerbe-Blatt, Literarisch-artistische Anstalt, München, 23 S.
- Jäger, O. [1893]:* Zwei Sommer im Wettersteingebirge. Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Band 24, S. 321
- Jordan, W. [1876]:* Über die Verwertung der Photographie zu geometrischen Aufnahmen (Photogrammetrie). Zeitschrift für Vermessungswesen, 5. Jahrgang, Heft 1, Stuttgart, S. 1-17
- Klute, F. [1921]:* Die stereophotogrammetrische Aufnahme der Hochregionen des Kilimandscharo. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, Band 56, Berlin, S. 144-151
- Kmunke, R. [1913a]:* Meine Forschungsreise nach Uganda. Petermanns Mitteilungen aus Justus Perthes geographischer Anstalt, 59. Jahrgang, II. Halbband, Gotha, S. 75-77
- Kmunke, R. [1913b]:* Quer durch Uganda. Eine Forschungsreise in Zentralafrika 1911/1912. Verlag Dietrich Reimer, Berlin, XIII, 188 S.
- Maack, R. [1923]:* Der Brandberg. Ein Beitrag zur Landeskunde von Südwestafrika. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, Band 58, Berlin, S. 1-14
- Maack, R. [1924]:* Die Tsondale-Wüste und das Randgebirge von Ababes in Südwestafrika. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, Band 59, Berlin, S. 13-29
- Meydenbauer, A. [1978]:* 120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland: das Tagebuch von Albrecht Meydenbauer, dem Nestor des Meßbild-Verfahrens. Veröffentlicht aus Anlaß des Jubiläums 1958/1978. Bearbeitet von A. Grimm. Oldenbourg, München/VDI-Verlag, Düsseldorf, 72 S.
- Nathorst, A. G. [1899]:* The Swedish Arctic Expedition of 1898. The Geographical Journal, Vol. XIV, London, S. 51-76 und S. 155-176
- Obst, E. [1921]:* Die deutsche Kolonialkartographie. – In: *Präsent, H. (Hrsg.):* Beiträge zur deutschen Kartographie. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, S. 98-118
- Paganini, L. P., Schepp, A. [1891]:* Die Photogrammetrie in Italien. Zeitschrift für Vermessungswesen, 20. Jahrgang, Stuttgart, Heft 3, S. 65-83 und Heft 6, S. 328-339
- Paganini, L. P., Schepp, A. [1891]:* Die Photogrammetrie in Italien. Zeitschrift für Vermessungswesen, 21. Jahrgang, Heft 3, Stuttgart, S. 65-85
- Penther, A. [1905]:* Eine Reise in das Gebiet des Erdschias-Dagh (Kleinasien) 1902. Abhandlungen der k.k. Geographischen Gesellschaft in Wien, 6. Band, Nr. 1, Wien, S. 1-46
- Pillewizer, W. [1939]:* Die kartographischen und gletscherkundlichen Ergebnisse der Deutschen Spitzbergen-Expedition 1938. Ergänzungsheft Nr. 238 zu Petermanns Geographischen Mitteilungen, Justus Perthes, Gotha, 46 S.
- Pillewizer, W. [1968]:* Die Herstellung von Gletscherkarten mittels terrestrischer Photogrammetrie. Vermessungstechnik, 16. Jahrgang, Heft 9, Berlin, S. 238-331
- Pillewizer, W. [1989]:* 100 Jahre Vernagtferner-Karte. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Kartographie, Berichte und Informationen Nr. 9, Wien, 19 S.
- Scheck, F. [1912]:* Einfache und stereoskopische Bildmessung im reinen Felsgebiet. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München, Band VII, Heft 2, München, S. 145-210
- Seliger, P. [1911]:* Die stereoskopische Messmethode in der Praxis. 1. Teil: Einführung in die Topographie, Einführung in die Bildmessung, Normal-Stereogramm. Verlag Jul. Springer, Berlin, XI, 227 S.
- Strindberg, N. [1897]:* Karta öfver Amsterdamön med omgifningar. Ymer, Heft 1, Stockholm, S. 13-16
- Techmer, F. [1904]:* Photogrammetrische Aufnahme in West-Usumbara, Deutsch-Ostafrika. Mittheilungen von Forschungsreisenden und Gelehrten aus den Deutschen Schutzgebieten, 17. Band, Heft 4/5, Berlin, S. 99-106
- Weiß, M. [1910]:* Meine Arbeiten in Inner-Afrika mit dem Phototheodoliten. Verhandlungen des Deutschen Kolonialkongresses 1910 zu Berlin am 6., 7. und 8.X.1910. Verlag Dietrich Reimer, Berlin, S. 52-58
- Weiß, M. [1913]:* Die geschichtliche Entwicklung der Photogrammetrie und die Begründung ihrer Verwendbarkeit für Meß- und Konstruktionszwecke. Verlag Strecker & Schröder, Stuttgart, VII, 94 S.

GIS-Technologie und Vermessungswesen¹

Zusammenfassung

Die stark wachsende Zahl der Einsatzgebiete und die rasante Weiterentwicklung der GIS-Technologie machen es erforderlich, Begriffe zu definieren und Normen zu vereinbaren. Es wird ein hierarchischer Begriffsaufbau vorgeschlagen, der es ermöglicht, alle Spezialsysteme einem der Grundtypen zuzuordnen, nämlich Land-, Topographischen und Netz-Informationssystem.

Die Vermessungsverwaltungen, die Berufsverbände und die Hochschulen müssen sich der Herausforderung der GIS-Technologie stellen. Strukturänderungen, neue Prioritäten und eine zukunftsgerichtete Berufspolitik sind dringend erforderlich, damit die Chance, eine Schlüsselrolle auf dem GIS-Gebiet zu gewinnen, nicht verspielt wird.

Summary

The rapidly growing number of applications and the fast development of GIS-technology require clear terms and standards. A hierarchical structure of terms is proposed enabling the attribution of all application GIS to one of three basic types, namely land-, topographic- or network-information systems.

Surveying agencies, professional societies and universities have to meet the challenge of GIS-technology. Changes of organizational structures and of priorities, and a progressive policy are required to take advantage of the opportunity to gain a key position in the GIS field.

Einleitung

Die elektronische Datenverarbeitung (EDV) hat dank ihrer enormen Leistungsfähigkeit in nahezu

allen Bereichen von Wissenschaft und Technik Anwendung gefunden. Dabei sind völlig neue Arbeitstechniken und eine Reihe neuer Arbeitsgebiete entstanden. Es ist zur Zeit noch nicht abzusehen, wo und wann diese Entwicklung an eine Grenze stoßen wird und welche Veränderungen unseres privaten und beruflichen Umfeldes noch zu erwarten sind.

Ein besonders tiefgreifender Wandel ist in Berufsfeldern zu beobachten, in denen Karten und Pläne traditionell eine große Rolle spielen. Neben allen Zweigen der Geowissenschaften sind davon Ingenieure, Planer, Biologen und manche andere betroffen. Der Einzug der EDV begann hier vergleichsweise spät, da die digitale Verarbeitung von Karteninhalten in raumbezogenen Informationssystemen schnelle Rechner, große Datenspeicher und mächtige Programmsysteme erfordert. Diese Voraussetzungen waren praktisch erst Mitte der achtziger Jahre gegeben. Heute kann man in diesen Bereichen noch moderne digitale und klassische manuelle Arbeitstechniken nebeneinander beobachten und zahlreiche Kritiker antreffen, die die Effizienz der digitalen Technik für zweifelhaft halten. Zweifellos sind aber digitale raumbezogene Informationssysteme die Innovation des Jahrzehnts und sie werden die Arbeitsweisen aller Kartenhersteller und -nutzer von Grund auf ändern.

Erste Überlegungen, Versuche und Konzepte zur automatisierten Durchführung von manuellen Arbeiten mit Karten und Plänen hat es auf mehreren Gebieten etwa gleichzeitig gegeben. Dies hat zu parallelen Entwicklungen im Vermessungswesen, in der Geographie und im Bereich Zeichnen und Konstruieren des Ingenieurwesens geführt. Die Folge sind inkompatible Datenmodelle, mehrdeutige Begriffe und unklare Zuständigkeiten. Für eine im Entstehen begriffene Technologie ist dies ganz normal; es darf aber nicht der Endzustand sein. Zur Zeit wird daher in vielen Ländern und auch multinational in der EG intensiv an Normen gearbeitet, um die Begriffe zu vereinheitlichen und die Daten zwischen Systemen austauschbar zu machen. Die Amerikaner, die die gesamte Entwicklung angeführt haben, haben ihre Normung weitgehend abgeschlossen. Seit 1992 gibt es den Spatial Data Transfer Standard (FIPS 173) als Ergebnis zehnjähriger Beratungen.

¹ Dieser Beitrag entstand im Juli 1993. Der Autor ist nicht ohne Hoffnung, daß bis zur Drucklegung der Festschrift deutliche Fortschritte zu verzeichnen sein werden. Diese deuten sich bereits heute an, und zwar sowohl hinsichtlich der allgemeinen Einschätzung der Bedeutung der GIS-Technologie als auch hinsichtlich der Bereitschaft im Vermessungswesen, sich für dieses Gebiet zuständig zu fühlen.

Versuch einer Begriffserklärung

Wie schon ein kurzer Blick in die umfangreiche Literatur über raumbezogene Informationssysteme zeigt, gibt es eine verwirrende Vielfalt von Bezeichnungen für diese Systeme, die meist als Abkürzungen auftreten und verschiedene Bedeutungen haben können. Als wichtigste Beispiele seien aufgelistet:

RIS	raumbezogenes Informationssystem
GIS	Geo-Informationssystem oder geographisches Informationssystem
LIS	Kandinformationssystem
UIS	Umweltinformationssystem
KIS	kommunales Informationssystem oder Kanalinformationssystem

Ferner findet man ALK, ATKIS, BIS, CORINE, GEOGIS, GRUBIS, HIS, IPS, MERKIS, MIS, NIS, STABIS, TOPIS, UMPLIS und sicher noch weitere.

Um etwas Ordnung in diese Vielfalt der Begriffe bringen zu können, benötigt man zunächst klare Definitionen. In enger Anlehnung an *Vossen [1987]* ist in der Informatik *ein (rechnergestütztes) Informationssystem ein System, das Informationen über eine bestimmte Anwendung bzw. Außenwelt-Situation speichern und verwalten kann sowie das Arbeiten mit diesen Informationen nach bestimmten Gesichtspunkten bzw. mit verschiedenen Zielsetzungen gestattet. Das bedeutet, daß es möglich sein muß, Daten zu erfassen und zu verändern, Informationen direkt zu entnehmen und neue oder weitergehende Informationen aus den vorhandenen abzuleiten, d. h. Auswertungen vorzunehmen, Statistiken, Prognosen oder Berichte zu erstellen oder auch Entscheidungsprozesse zu unterstützen bzw. zu erleichtern.*

Aus der großen Zahl der Informationssysteme (IS), die in Wirtschaft und Verwaltung existieren, wie zum Beispiel Management-IS, Betriebsmittel-IS, Flugbuchungs-IS, Einwohner-IS, seien jene, bei denen die Ortsinformation wichtig ist und zu Auswertungen benutzt werden kann, als raumbezogene Informationssystem (RIS) bezeichnet. Die Definition eines RIS kann *Bill und Fritsch [1991]* entnommen werden, wobei lediglich der Begriff Geo-IS durch RIS ersetzt wurde.

Ein raumbezogenes Informationssystem (RIS) ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfaßt und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden.

Die RIS im Sinne dieser Definition, die es im Maschinenbau und im Bauwesen als CAD-Systeme, in der industriellen Fertigung als CIM- oder CAM-Systeme sowie in der Mikroskopie und der Tomographie gibt, sollen hier nicht weiter interessieren. Im folgenden werden nur die RIS in Betracht gezogen, bei denen die Erde einschließlich ihrer Atmosphäre der Raum, auf den sich die Ortsangaben beziehen. Diese Systeme sollen als Geo-Informationssysteme² (GIS) bezeichnet werden. Die Definition eines GIS deckt sich damit bis auf die Einschränkung hinsichtlich des Raumbezuges mit der RIS-Definition. Es ist zu beachten, daß der Raumbezug außer durch Koordinaten auch durch andere Ortsangaben wie Adresse, Kilometrierung, Bezirk oder Verwaltungseinheit möglich ist. Als graphische Darstellungen können in diesen Fällen topologische Netzdarstellungen und die bekannten statistischen Balken- oder Kreisdiagramme benutzt werden.

Die GIS treten in drei Grundtypen auf, die sich wesentlich in Inhalt, Struktur und Anwendungsbereich unterscheiden. Diese sind die Landinformationssysteme (LIS), die topographischen Informationssysteme (TIS) und die Netzinformationssysteme (NIS).

Ein *Landinformationssystem (LIS)* kann als rechnergestütztes Mehrzweckkataster betrachtet werden. Die Datenbank enthält im geometrischen Teil den Inhalt der Flurkarten mit der für den Eigentumsnachweis erforderlichen Genauigkeit. Der alphanumerische Teil besteht aus Angaben zu den Grundstücken und den Eigentümern. Die amtliche Datenbasis ist in Deutschland durch ALK³ und ALB⁴ gegeben. LIS finden außer in der Katasterverwaltung überall dort Anwendung, wo es auf parzellenscharfe Darstellung ankommt. Beispiele sind kommunale IS, Bodennutzungs-IS, Forstmanagement-IS und Leitungs-IS.

Topographische Informationssysteme (TIS) werden auf der Basis topographischer und kleinmaßstäbiger Karten aufgebaut. Die amtliche Datenbasis wird zur Zeit mit dem Vorhaben ATKIS⁵ auf drei Maßstabebenen erstellt, und zwar in Anlehnung an die TK 25, die TÜK 200 und die IWK 1000. Sie wird im wesentlichen topographische Informationen enthalten. Die Zahl der Anwendungsgebiete für

² Manche Autoren, insbesondere aus dem Bereich der Geographie, bevorzugen dafür die Bezeichnung geographische Informationssysteme.

³ ALK Automatisierte Liegenschaftskarte

⁴ ALB Automatisiertes Liegenschaftsbuch

⁵ ATKIS Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem

TIS ist nahezu unübersehbar. Schwerpunkte bilden der Bereich der Geowissenschaften, der Umweltbereich und der Planungsbereich.

Netzinformationssysteme (NIS) dienen der Dokumentation, der Planung und dem Management von Netzen. Die Anwendungsbreite reicht von der städtischen Kanalisation über die lokalen und regionalen Netze der Energieversorger bis zu landesweiten Telekommunikationsnetzen. Als Datenbasis kommen Auszüge aus ALK und ATKIS in Frage. Teilweise werden aber auch davon unabhängige

Grunddaten benutzt, die auf Kilometrierung und Topologie aufbauen.

Fachinformationssysteme (FIS) sind für einen bestimmten Zweck oder einen bestimmten Anwendungsbereich aufgebaute IS, deren Grunddaten typischerweise aus ALK oder ATKIS stammen (sollten). Diese Grunddaten bilden zusammen mit den Fachdaten und eventuell einer Wissensbasis die Datenbasis. Die Funktionalität der FIS kann sehr unterschiedlich sein und von einfachen Verschneidungsoperationen bis zu wissensbasierten Entschei-

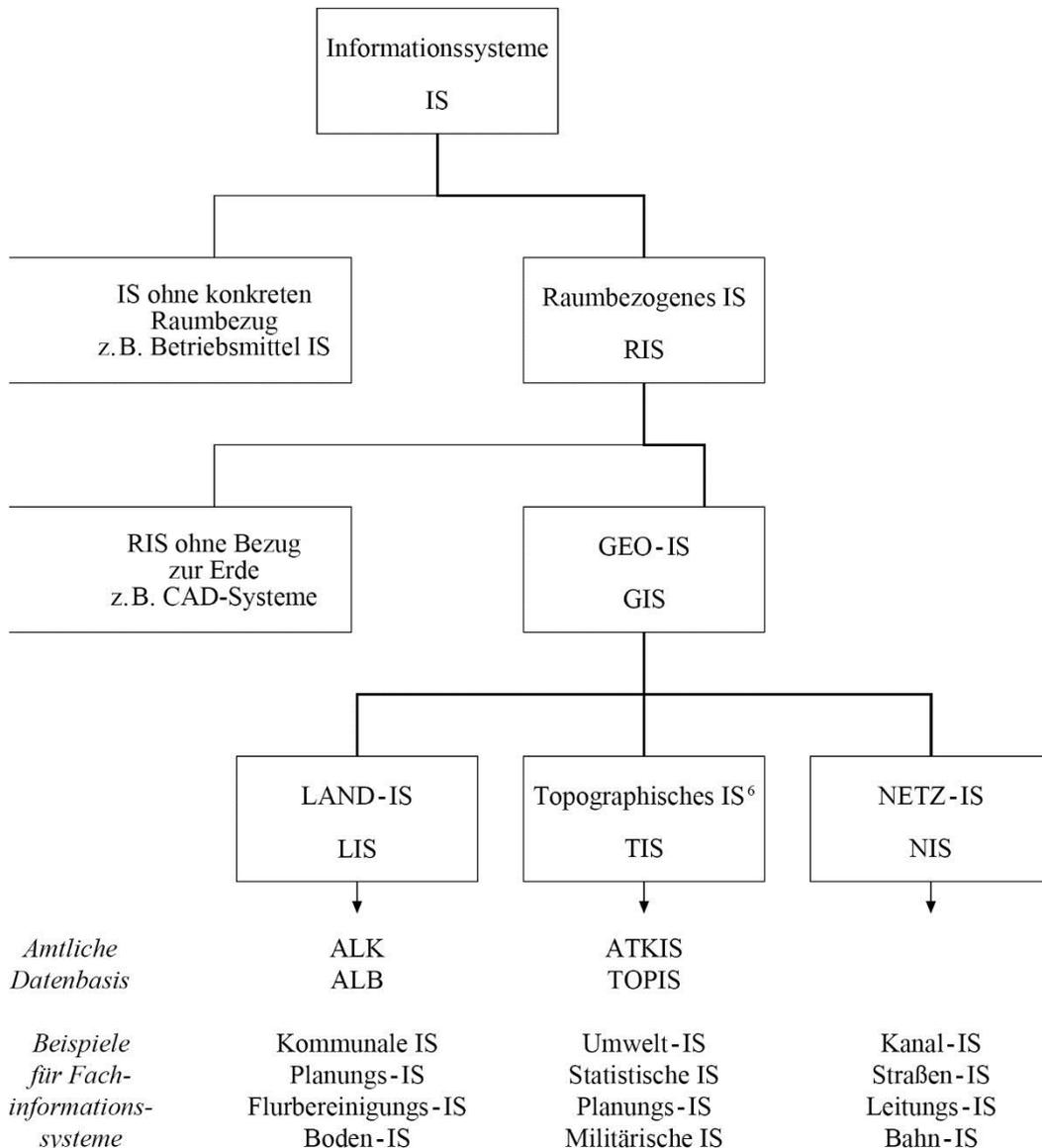


Abb.: Begriffsdefinitionen und Anwendungsbeispiele für Geo-Informationssysteme (GIS)

⁶ Die Bezeichnung TIS für diese Klasse von GIS ist etwas ungewohnt. Viele Anwender wählen hier den Namen GIS im Sinne von Geographisches IS. Trotzdem ist TIS ein geeigneter Name, wenn man den Bezug zu den topographischen Karten in den Vordergrund stellt.

dungsprozessen reichen. In Abhängigkeit von Auflösung, Anwendungsbereich und Funktionalität kann jedes FIS als Ausprägung eines der drei Grundtypen von GIS aufgefaßt werden.

Die Abbildung gibt den vorgeschlagenen hierarchischen Begriffsaufbau wieder. Er ermöglicht es, jedes Fachinformationssystem einem der drei Grundtypen LIS, TIS oder NIS zuzuordnen.

Die Rolle des Vermessungswesens

Zu den Aufgaben der Vermessungsverwaltungen gehört es, Daten über Grund und Boden und über die Topographie flächendeckend zu erfassen und zur Verfügung zu stellen. Man hat sich schon sehr früh mit der Automatisierung der dazu nötigen Arbeiten beschäftigt und bereits Anfang der siebziger Jahre Konzepte für die Liegenschaftskarte (ALK) und das Liegenschaftsbuch (ALB) verabschiedet. Zehn Jahre später wurden die ATKIS-Entwicklungen begonnen. Die Datenerfassung für diese Vorhaben konnte jedoch erst viel später in Angriff genommen werden, da zunächst umfangreiche Softwareentwicklungen, hohe Rechnerinvestitionen und intensive Personalschulungen durchgeführt werden mußten. Ob noch in diesem Jahrzehnt die amtlichen Datenbestände der Vermessungsverwaltungen flächendeckend digital zur Verfügung stehen werden, ist sehr fraglich.

Ebenfalls in den siebziger Jahren haben zahlreiche Fachverwaltungen erkannt, daß ihnen GIS die Erfüllung der Aufgaben sehr erleichtern können. Sie haben daher Konzepte für Fachinformationssysteme entwickelt und sofort die Realisierung begonnen. Da noch keine amtlichen Basisdaten verfügbar waren, sind die topographischen Karten im benötigten Umfang digitalisiert worden. So sind zahlreiche Datenbestände entstanden, die unterschiedlich genau sind, verschiedene Struktur haben und eine spezielle Informationsauswahl darstellen. Ein Datenaustausch zwischen den Systemen ist in der Regel nicht möglich. Die Laufendhaltung ist ein ungelöstes Problem. Die Zukunft dieser Fachinformationssysteme erscheint höchst zweifelhaft. *Waters [1993]* bemerkt zu der Situation in Großbritannien, die sich offensichtlich nicht von der in Deutschland unterscheidet: »*Of course there are many applications of GIS that do not require particular surveying expertise, but there is many a system or dataset in use which would have benefited from a surveyors influence!*«

Es bleibt abzuwarten, ob es dem Vermessungswesen gelingt, die Kompetenz für die Versorgung mit digitalen Basisdaten zu gewinnen. Drei Ge-

sichtspunkte lassen dies eher fraglich erscheinen:

- (1) Die Vermessungsverwaltungen sind nach wie vor nicht in der Lage, die zum Aufbau von FIS erforderlichen Grunddaten zur Verfügung zu stellen. Sie müssen daher von den Interessenten anderweitig beschafft oder selbst erfaßt werden. Dieser Zustand ist besonders in der jetzigen Phase der rasant wachsenden Anzahl von GIS-Anwendungen sehr nachteilig.
- (2) Die amtlichen Datenmodelle, die angebotenen Übergabeformate und die Erfassungsstrategie der Vermessungsverwaltungen vermitteln in weiten Teilen den Eindruck, daß trotz aller fachübergreifender Abstimmungen primär der Eigenbedarf an Daten gedeckt werden soll. Das Eingehen auf die Erfordernisse potentieller Nutzer, die Flexibilität bei der Bereitstellung von Grunddaten und die Erkenntnis, daß die Daten einen enormen Wirtschaftsfaktor darstellen, der ein professionelles Marketing erfordert, sind in vielen Verwaltungen unterentwickelt.
- (3) Die Berufsorganisationen haben sich hinsichtlich der GIS-Technologie bisher entschieden zu passiv verhalten, obwohl Vermessungsingenieure in besonderem Maße die Kompetenz für das Managen von raumbezogenen Daten haben. Hier ist ein expandierendes Berufsfeld neu entstanden, das attraktiv und zukunftsreich ist. Wenn es nicht Einsteigern aus anderen Berufsgruppen überlassen werden soll, müssen sich die Berufsverbände offensiv und konzentriert dieses Bereiches annehmen und damit in der Öffentlichkeit präsent sein. Die Bildung eines Arbeitskreises oder die gelegentliche Organisation eines Seminars sind zu wenig.

Wenn sich die Haltung der Verantwortlichen nicht grundlegend ändert, besteht für das Vermessungswesen nur dann eine – allerdings realistische – Chance, in der digitalen Welt dieselbe Rolle zu spielen, die es als traditioneller Kartenlieferant inne hatte, wenn die Nutzer von auf Dauer angelegten Fachinformationssystemen Probleme mit ihren Daten bekommen. Diese Probleme werden auftreten, sobald Daten fortgeführt, erneuert, integriert oder ausgetauscht werden müssen. Dann wird man wahrscheinlich erkennen, daß die mit hohen Kosten aufgebauten Datenbestände bald zu Datenfriedhöfen werden und daß ein Neubeginn mit den amtlichen Basisdaten unausweichlich ist.

Hochschulen und GIS

Die Entwicklung der GIS-Technologie erfolgte nahezu vollständig in Wirtschaft und Verwaltung.

Insbesondere die deutschen Hochschulen befanden sich in einer Beobachterposition und stehen jetzt vor der Situation, daß sie, um der Bedeutung dieses neuen Gebietes gerecht zu werden, einen Technologietransfer in die Hochschulen bewerkstelligen müssen. Eine nennenswerte Forschungsförderung mit öffentlichen Mitteln ist bisher, sei es aus Mangel an geeigneten Forschungsanträgen, sei es aus fehlender Einsicht der Gutachter oder Förderorganisationen, nicht zustande gekommen.

Eine völlig andere Wissenschaftspolitik wurde in den USA und in England betrieben. In Amerika wurde nach einer Ausschreibung im Jahre 1988 das *National Center for Geographic Information and Analysis* gegründet und mit reichlich Forschungsmitteln ausgestattet. Dieses Zentrum hat drei Stützpunkte, nämlich die *University of California at Santa Barbara*, die *State University of New York at Buffalo* und *The University of Maine*, in denen Geodäten und Geographen in der Grundlagenforschung und bei der Entwicklung von Ausbildungsprogrammen zusammenarbeiten. In Großbritannien wurde eine näher an der Praxis orientierte Forschung durch die Bildung und Finanzierung der *Regional Research Laboratory Initiative* mit acht Stützpunkten ins Leben gerufen. Den Anstoß dazu gab der »Chorley Report« [Chorley, 1987], der Abschlußbericht eines von der Regierung eingesetzten Komitees zur Untersuchung der Handhabung geographischer Informationen, in dem die GIS-Technologie als »*the biggest step forward in the handling of Geographic Information since the invention of the map*« bezeichnet wird. In diesen beiden Ländern ist die GIS-Technologie seit über fünf Jahren an den Universitäten in Lehre und Forschung fest verankert.

Es wird an deutschen Hochschulen schwer werden, den eingetretenen Rückstand aufzuholen. Es scheint aber, daß die Bedeutung der GIS-Technologie inzwischen erkannt worden ist. Vereinzelt taucht dieses Fachgebiet bei Lehrstuhlbezeichnungen mit auf, und die Curricula enthalten erste Vorlesungen über GIS. Die Zuwendung zur Geo-Informatik muß aber noch ganz erheblich gesteigert werden, wenn mehr als provinzielle Forschung und oberflächliche Lehre entstehen sollen. Ein großes Hindernis sind die festgefügteten Strukturen, die die Aufnahme neuer Wissenschaftsgebiete sehr erschweren. So wird seit langem diskutiert, wie das Fachgebiet korrekt zu benennen ist und ob es in den Zuständigkeitsbereich der Kartographie, der Photogrammetrie oder doch eher der (Landes) Vermessung fällt. Obwohl alles dafür spricht, das Fach Geo-Informatik als selbständiges Grundlagen- und Querschnittsfach einzurichten, das eigenständige

Beiträge zur GIS-Forschung und zu einem zeitgemäßen Curriculum für das Studium des Vermessungsingenieurs zu leisten hat, wird man sich zunächst mit einer Fächerkombination als zweitbesten Lösung zufrieden geben müssen.

Ein Blick über den Zaun zur Geographie zeigt übrigens, daß die Situation dort sehr ähnlich ist.

Ausblick und Schlußfolgerungen

Die neunziger Jahre sind das Jahrzehnt, in dem die GIS-Technologie auf breiter Front ihren Durchbruch erzielen wird. Der Bedarf an Fachinformationssystemen wird noch erheblich steigen und die Firmen werden durch intelligente Software den Einstieg bedeutend erleichtern. Das Vermessungswesen muß diese Situation als Herausforderung begreifen und die Chance nutzen, eine Schlüsselposition in der neuen Technologie zu gewinnen. Dazu müssen die Vermessungsverwaltungen die amtlichen Basisdaten mit erster Priorität den Nutzerwünschen entsprechend erfassen und vermarkten. Die Hochschulen müssen die Geoinformatik wesentlich stärker in das Studium integrieren und für qualifizierten Nachwuchs sorgen, der dringend benötigt wird. Die Forschung über Grundlagen und Anwendungen der GIS-Technologie muß an den Universitäten initiiert bzw. wesentlich gesteigert werden, denn nur so kann eine angemessene und dauerhafte Etablierung des Faches als Teil des Vermessungswesens erreicht werden. Und schließlich müssen die Berufsverbände durch ihre Politik klar machen, daß das Vermessungswesen eine tragende Rolle in der GIS-Technologie übernehmen will.

Literatur

Bill, R., Fritsch, D. [1991]: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1 – Hardware, Software und Daten. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 414 S.

Chorley, R. R. E. (Ed.) [1987]: Handling Geographic Information. Report to the Secretary of State for the Environment of the Committee of Enquiry into the Handling of Geographic Information. Department of the Environment, London, 208 S.

Vossen, G. [1987]: Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbank-Management-Systeme. Addison-Wesley Publication Company, Bonn, 464 S.

Waters, R. [1993]: Surveyors and GIS. Mapping
Awareness and GIS in Europe, Vol. 7, No. 6,
Oxford, S. 44-45

Deformation Monitoring and Analysis - Some Recent Developments

Summary

Over the past 15 years a significant progress has been made in the development of new methods and techniques for monitoring, analysis, and interpretation of deformations in engineering and geoscience projects within the activity of the FIG Working Group 6C. The developed methods are applicable to any type of deformation measurements whether dealt with by geodesists, photogrammetrists, geophysicists or by structural, geotechnical, and rock mechanics engineers. A truly interdisciplinary effort is needed in exchanging information on the new developments and in the optimal use of the new methods and techniques.

Zusammenfassung

In den letzten 15 Jahren wurden im Tätigkeitsbereich der FIG Arbeitsgruppe 6C signifikante Fortschritte bei der Entwicklung neuer Methoden und Techniken für die Überwachung, Analyse und Interpretation von Deformationen in Ingenieur- und geowissenschaftlichen Projekten gemacht. Die entwickelten Verfahren sind für alle Arten von Deformationsmessungen anwendbar, ob sie nun von Geodäten, Photogrammetern, Geophysikern oder Ingenieuren des Bauwesens, der Geotechnik und der Felsmechanik behandelt werden. Interdisziplinäre Bemühungen sind notwendig, um Informationen über die neuen Entwicklungen auszutauschen und die modernen Methoden und Techniken optimal anzuwenden.

Introduction

Safety, economical design of man-made structures, efficient functioning and fitting of structural elements, environmental protection, and development of mitigative measures in case of natural disasters (land slides, earthquakes, liquefaction of earth, dams, etc.) require good understanding of causative effects and mechanism of deformations which can be achieved only through proper monitoring and analysis of deformable objects. Develop-

ment of new methods and techniques for monitoring and analysis of deformations and development of methods for the optimal modelling and prediction of deformation are subjects of intensive multi-disciplinary studies of many professional groups which, besides survey engineers, photogrammetrists, and geodesists, include structural, mining, geotechnical, and mechanical engineers, as well as geophysicists and geologists.

Within the most active international organizations which are involved in deformation studies one should list:

- Working Group 6C (Deformation Measurements) of the International Federation of Surveyors (FIG),
- International Association of Geodesy (IAG) with the very active Commission on Recent Crustal Movements which frequently organizes international and regional symposia concerning geodynamics, tectonic plate movements, and regional deformation,
- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) within the activity of Commission 5 on Close-Range Techniques and Machine Vision,
- International Society for Mine Surveying (ISM) with their very active Commission 4 on Ground Subsidence and Surface Protection in mining areas,
- International Society for Rock Mechanics (ISRM) with their overall interest in rock stability and ground control,
- International Commission on Large Dams (ICOLD),
- International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering,
- International Association of Hydrological Sciences (IAHS) which organizes international symposia (e.g. Venice 1984, Houston 1991) on ground subsidence due to the withdrawal of underground liquids (water, oil, etc.).

Most of the activities and studies of the various organizations focus, of course, on direct applications to their particular deformation problems.

Although the accuracy and sensitivity criteria for determination of deformation may considerably differ between various applications, the basic principles of the design of the monitoring schemes and their geometrical analysis remain the same. For example, a study on the stability of magnets in an atomic accelerator may require determination of relative displacements with an accuracy of 0.05 mm while a ground subsidence study due to, for instance, oil withdrawal may require only 10 mm. In both cases, however, one may show that the same basic methodology in designing and analysis of the deformation measurements, may be utilized. This fact has not yet been fully understood by most of the above listed international research groups. Due to a general lack of communication and work coordination, the studies of various groups overlap resulting in a duplication of efforts in »discovering« methods and techniques which have already been well known to other study groups.

The FIG Study Group 6C has been one of the most, if not the most, active international groups dealing with practically all aspects of deformation monitoring and analysis. Since 1975, the FIG Study Group 6C has organized six international symposia with the last symposium held in Banff, Canada, in May 1993. In 1978, an »ad hoc« Committee on Deformation Analysis was formed to deal with and clarify various approaches and schools of thinking regarding the geometrical analysis of deformation surveys including the identification of unstable reference points. The work of the »ad hoc« committee has been summarized in four progress reports [Chrzanowski *et al.*, 1981; Heck *et al.*, 1982; Chrzanowski and Secord, 1983; Chrzanowski and Chen, 1986] and in the final report [Chrzanowski and Chen, 1990] presented at the XIXth FIG Congress in Helsinki in 1990.

During the XIXth FIG Congress, those interested in the work of the Study Group 6C met to discuss the status and plans for the future activities of the Group. The discussion focused on the problem of the interdisciplinary approach to integrated monitoring and analysis of deformations concluding among others, that:

- (1) General procedures for the geometrical analysis (in space and time domains) of integrated monitoring surveys (including the identification of unstable reference points) have been established and agreed upon by all participating researchers with some small differences between various approaches still remaining but leading to practically the same results.

- (2) The procedures developed within FIG should be made known to the general surveying community and to other professionals interested in the deformation analysis through interdisciplinary symposia, courses, and publications.
- (3) Contacts and exchange of views with specialists from other professions such as geotechnical and structural engineering, soil and rock mechanics, geophysics, and engineering geology, should be intensified by inviting them to the symposia and workshops organized by FIG.
- (4) Surveying engineers and scientists, in order to successfully compete with other professionals involved in deformation monitoring and analyses, should get acquainted with the physical modelling and deformation interpretation methods as well as with geotechnical and structural monitoring techniques.

Following the recommendation listed as item (2) above, this presentation reviews some of the methods and concepts developed within the activity of the FIG Study Group 6C dealing with the three major components of deformation studies:

- (a) optimal design of integrated deformation monitoring surveys,
- (b) monitoring techniques, and
- (c) integrated analysis, modelling, and prediction of deformations.

Since the author has been the chairman of the FIG Working Group 6C, the presented review is emphasizing the recent developments accomplished within the activity of FIG with a focus on the contributions made at the University of New Brunswick in Canada where Professor Dorrer spent several years as a faculty member about 20 years ago.

Optimal Design of Monitoring Schemes

Design of Positioning versus Monitoring Surveys

Optimum design of geodetic positioning networks has been a subject of intensive investigations and publications by many authors over the past two decades. Most results have been summarized by Grafarend and Sanso [1985]. The optimization of geodetic networks takes the optimal *accuracy, reliability, and economy* of the survey scheme as the design criteria. Design of deformation monitoring schemes is more complex and

differs in many respects from the design of the positioning networks. The design is aimed at obtaining optimum values of deformation parameters rather than of coordinates of the monitoring stations using various types (geodetic and non-geodetic) observables with allowable configuration defects. Therefore, the *sensitivity* of the monitoring scheme to detect deformations must be added to the design criteria [Zang and Li, 1990]. However, the sensitivity criterion requires that the deformation model must be well defined at the stage of the design of the monitoring survey. This is, generally, not the case in practice because the behavior of the monitored object usually does not follow exactly the prediction model. There may be a choice between several possible models at the stage of the analysis and interpretation of the measurements. Therefore, one would like to design a monitoring scheme with which one could efficiently separate several possible models at the stage of the geometrical analysis. This problem has recently been solved [Chen and Tang, 1992] by introducing a concept of *separability* of deformation models.

When designing a monitoring network one has to remember that the purpose of the monitoring survey is:

- (1) to check whether the behavior of the investigated object and its environment follows the predicted pattern so that any unpredicted deformations could be detected at an early stage, and
- (2) in the case of any abnormal behavior, to give an account, as accurately as possible, of the actual deformation status which could be used for the determination of the causative effects which trigger the deformation.

In the first case, the design of the monitoring scheme must include stations at the points where maximum deformation have been predicted plus a few observables at the points which, depending on previous experience, could signal any potential unpredictable behavior, particularly at the interface between the monitored structure and the surrounding material. The amount of the expected deformations may be predicted using either deterministic modelling (using, for instance, the finite or boundary element methods), or empirical (statistical) prediction models [Chen and Chrzanowski, 1986].

The accuracy (at the 95% probability level) of the measurements of the predicted deformations should be at least equal to one third of the predicted value for the given span of time between the repeated measurements. However, once any abnormal deformations are noticed, additional observables have to be added at the locations which would be

indicated by the preliminary analysis of the monitoring surveys as being the most sensitive for the identification of causative effects. In this case there is no limit, other than economic, for the maximum accuracy required. The higher the accuracy of the measurements, the easier it will be to determine the mechanism of the unpredicted deformations. Thus, the monitoring schemes may require frequent updating and upgrading of the initial design over the duration of the monitoring project.

In order to avoid disappointment and to increase the reliability of the monitoring surveys, a properly designed monitoring scheme should have a sufficient redundancy of measurements using different measuring techniques and such geometry of the scheme that self-checking, through geometrical closures of loops of measurements, would be possible. One should stress that the *poorly designed monitoring survey is a waste of effort and money* and may lead to a dangerous misinterpretation.

Computer Simulation versus Analytical Design Methods

There are practically two distinct design methods:

- analytical and
- computer simulation (»trial and error«).

Both methods usually involve an iteration process. The difference between them is that the former does not require human intervention and provides, mathematically, the optimum results, while the computer simulation method (CSM) provides acceptable results but they are not necessarily optimal. The CSM requires the experience of the designer but it can solve all the design problems while the analytical methods have been limited to some particular solutions only.

Recently, a CSM has been developed at UNB [Tang et al., 1990] which does not require any human intervention during a fully automatic computational process from the moment of inputting the initial data through the iterative step-by-step upgrading of the design to the final design output. The development of analytical methods has been, however, the main focus of research. The existing methods have been limited to separate solutions of the first and second order design problems having still difficulties in designing integrated (geodetic and geotechnical observables) monitoring schemes. The formulation of a proper mathematical model for the optimal design of monitoring surveys, aiming at the detection of deformation parameters (geometrical and physical)

rather than purely positioning parameters, was initially proposed by *Niemeier and Rohde [1982]* and subsequently by *Chen [1983]*. In the following years, although the underlying theory for the design of geodetic networks has been developed quite extensively, its full power of practical applications has not been demonstrated in any real-life examples. An efficient algorithm has not existed until very recently. The major problem in this area was the inability of solving non-linear matrix equations involved in the network design.

Over the last three years, a unified mathematical modelling and methodology have been developed by *Kuang [1991]* at UNB which allows for a fully analytical, multi-objective optimal design (optimal accuracy, optimal sensitivity, optimal reliability, and optimal economy) of integrated deformation monitoring schemes with geodetic and geotechnical instrumentation. The method allows for a simultaneous solution of the first and second order (configuration and weight) designs.

The Taylor series linearization technique, widely used for non-linear scalar functions, is employed in the Multi-Objective Method to linearize the non-linear matrix equations involved in the design of the monitoring schemes. The measures of accuracy, sensitivity, reliability, and economy, which represent the quality of a deformation monitoring scheme, can be represented in the form of non-linear functions of the network configuration matrix and weight matrix. These non-linear functions are then approximated by the linear form of its corresponding Taylor series, expanded with respect to the coordinates of the surveyed points and observational weights.

The methodology allows for solving the conventional different orders (First Order, Second Order, Third Order, and Combined First Order + Second Order) of design problem by allowing for either separate or simultaneous analytical optimization of the geometrical configuration and weights of heterogeneous observables of a monitoring scheme. More details with practical examples can be found in *Kuang [1991]* and *Kuang et al. [1991]*.

Monitoring Techniques - A General Review

Basically, two types of measuring techniques and instrumentation are being used in monitoring deformations:

- (1) geodetic surveys (terrestrial, photogrammetric, and satellite techniques), and

- (2) geotechnical and structural measurements of local deformations using tiltmeters, strainmeters, extensometers, plumb-lines, etc.

In addition to the geometrical parameters, the monitoring scheme includes measurements of temperature, water pressure, in-situ stresses, and other parameters depending on the type of the monitored object. But, these will not be discussed in this paper.

Each type of measurement has its own advantages and drawbacks as discussed in *Chrzanowski [1986]*. Geodetic surveys have traditionally been used mainly for determining the absolute displacements of selected points with respect to some reference points which are assumed to be stable. Geotechnical measurements have traditionally been used mainly for relative measurements within the deformable object and its surroundings. One should point out that, with the technological progress of the last few years, the distinction between the use of geodetic and geotechnical measurements is purely artificial. For example, inverted plumb-lines and borehole extensometers, if anchored deeply enough in bedrock below the deformation zone, may serve better than geodetic surveys for determining the absolute displacements of the object points. Geodetic surveys with optical and electro-magnetic instruments (including the satellite techniques) are always contaminated by atmospheric (tropospheric and ionospheric) refraction which limits their positioning accuracy to about ± 1 ppm to ± 2 ppm (at the one sigma level) of the distance. So, for instance, with the average distance between the object and reference points of 500 m, the absolute displacements of the object points cannot be determined with an accuracy better than about ± 2 mm at the 95% probability level. In many cases this accuracy is not adequate. On the other hand, precision electro-optical geodetic instruments for distance measurements, such as Kern ME 5000 or Tellurometer MA 200 models with their accuracies of ± 0.3 mm over short distances, may serve as extensometers in relative deformation surveys. Similarly, geodetic leveling, with an achievable accuracy of better than ± 0.1 mm over distances of 20 m may provide better accuracy for the tilt determination (equivalent to ± 1 second of arc) than any local measurements with electronic tiltmeters. New developments in three-dimensional coordinating systems with electronic theodolites may provide relative positioning in almost real time to an accuracy of ± 0.05 mm over distances of several metres. The same applies to new developments in photogrammetric measurements with the solid state cameras (CCD

sensors). The satellite Global Positioning System, which, if properly handled, offers a few millimetres accuracy in differential positioning over several kilometres, is replacing the conventional terrestrial surveys in many deformation studies [Chrzanowski *et al.*, 1989].

Thus, from the point of view of the achievable instrumental accuracy, the distinction between geodetic and geotechnical techniques does not apply any more. With the recent technological developments in both geodetic and geotechnical instrumentation, at a cost one may achieve almost any practically needed, instrumental resolution and precision, full automation, and virtually real-time data processing. Remotely controlled telemetric data acquisition systems, working continuously for several months without recharging the batteries in temperatures down to -40°C , are available and their cost is reasonable. Thus, the array of different types of instruments available for deformation studies has significantly broaden within the last few years. This creates a new challenge for the designers of the monitoring surveys: what instruments to choose, where to locate them, and how to combine them into *one integrated monitoring scheme in which the geodetic and geotechnical/structural measurements would optimally complement each other*.

As far as the actual accuracy of deformation surveys is concerned, the main limiting factors are not the instrument precision but the environmental influences and ignorance of the users, namely:

- the aforementioned atmospheric refraction,
- thermal influences, affecting the mechanical, electronic, and optical components of the instruments (in any type of instrumentation) as well as the stability of surveys stations,
- local instability of the observation stations (improper monumentation of survey stations and improper installation of the in-situ instrumentation),
- lack of or improper calibration of the instruments,
- lack of understanding by the users of the sources of errors and of the proper use of the instruments.

The problem of calibration is very often underestimated in practice not only by the users but also by the manufacturers. In long-term measurements, the instrument repeatability (precision) may be affected by aging of the electronic and mechanical components resulting in a drift of the instrument readout. Of particular concern are geotechnical

instruments for which the users, in general, do not have sufficient facilities and adequate knowledge for their calibration. The permanently installed instruments are very often left in-situ for several years without checking the quality of their performance.

Integrated Analysis of Deformation Surveys

Concept of the Integrated Analysis

Even the most precise monitoring surveys will not fully serve their purpose if they are not properly evaluated and utilized in a global integrated analysis as a cooperative interdisciplinary effort. The analysis of deformation surveys includes [Chen and Chrzanowski, 1986]:

- geometrical analysis which describes the geometrical status of the deformable body, its change in shape and dimensions, as well as rigid body movements (translations and rotations) of the whole deformable body with respect to a stable reference frame or of a block of the body with respect to other blocks, and
- physical interpretation which consists of:
 - (a) a statistical (empirical) method, which analyzes through a regression analysis the correlations between observed deformations and observed loads (external and internal causes producing the deformation), and
 - (b) a deterministic method, which utilizes information on the loads, properties of the materials, and physical laws governing the stress-strain relationship which describes the state of internal stresses and the relationship between the causative effects (loads) and deformations.

Once the load-deformation relationship is established, the results of the physical interpretation may be used for a development of prediction models. Through a comparison of predicted deformation with the results of the geometrical analysis of the actual deformations, a better understanding of the mechanism of the deformations is achieved. On the other hand, the prediction models supply information on the expected deformation, facilitating the design of the monitoring scheme as well as the selection of the deformation model in the geometrical analysis. Figure 1 shows an idealized flowchart of the *integrated deformation analysis* [Chrzanowski *et al.*, 1991]. Thus, the expression *integrated analysis* means a determination of the deformation by combining all types of measurements, even if scattered in time and space, in the simultaneous geometrical analysis of the deforma-

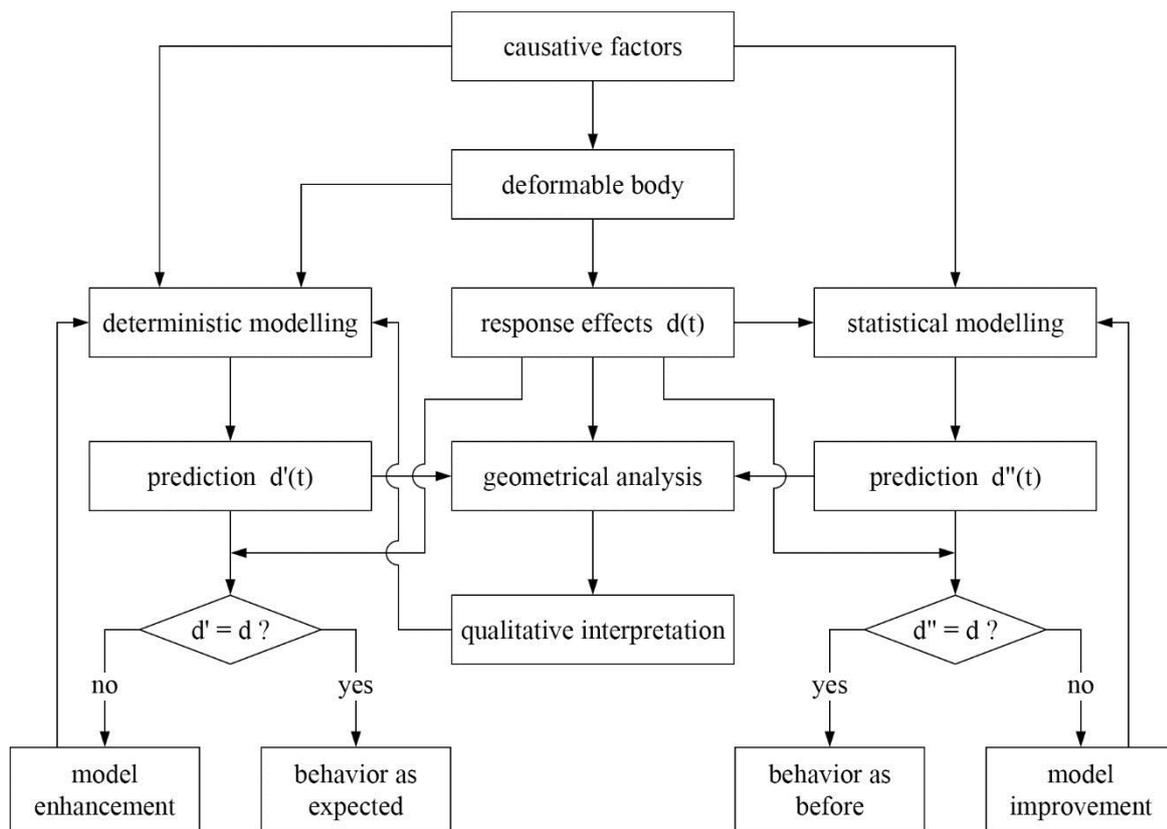


Figure 1

tion and comparing it with the prediction model. If the differences are statistically significant, the explanation is sought and the prediction model is iteratively adjusted. Recently, a concept of a global integration has been developed at UNB [Chrzanowski *et al.*, 1990] in which all three – the geometrical analysis of deformation and both methods of the physical interpretation – are combined for the final interpretation.

As far as the deterministic modelling of deformations is concerned, the finite element, boundary element, and finite differences numerical methods, which were domains of mechanical, civil, and rock mechanics engineers, become tools of surveying engineers. A powerful software FEMMA [Szostak-Chrzanowski and Chrzanowski, 1991] for 2-D and 3-D finite elements elastic, visco-elastic, and heat transfer analyses of deformations has been developed at UNB and is being applied in various fields of engineering and geosciences.

Identification of Unstable Reference Points

In most deformation studies, the information on absolute movements of object points with respect

to some stable reference points is crucial. One problem which is frequently encountered in practice in the reference networks is the instability of the reference points. This may be caused either by wrong monumentation of the survey markers or by the points being located still too close to the deformation zone (wrong assumption of the designer about the stability of the surrounding area). Any unstable reference points must be identified first before the absolute displacements of the object points are calculated. Over the past two decades, a few methods for the successful identification of unstable points have been put forward [Chrzanowski and Chen, 1986; Chrzanowski and Chen, 1990]. One of them, developed at UNB [Chen, 1983; Chen *et al.*, 1990] is based on an iterative weighted transformation of the displacements and their variance-covariance matrix until all the components of the displacement vectors satisfy the condition: $\sum |d_i| = \text{minimum}$. In each solution, the weights are iteratively changed to be $p_i = 1/d_i$. After the last iteration, the displacement vectors that exceed their error ellipses at 95% probability identify the unstable reference points. The reference network, as a rule, should consist of at least six points, otherwise, identification of the unstable points may be difficult or even impossible.

UNB Generalized Method of Deformation Analysis

In order to be able to utilize any type of geodetic and geotechnical observations in a simultaneous deformation analysis, a so-called UNB Generalized Method of the geometrical analysis has been developed [Chen, 1983; Chrzanowski et al., 1986b]. The method is applicable to geometrical analysis both in space and time, including the aforementioned detection of unstable reference points, the determination of the change in shape and dimensions of the monitored object, as well as absolute and relative rigid body motions.

The change in shape and dimensions of a 3-D deformable body is fully described if 6 strain components (3 normal and 3 shearing strains) and 3 differential rotations at every point of the body are determined. These deformation parameters can be calculated from well-known strain-displacement relations if a displacement function representing the deformation of the object is known. Since, in practice, deformation surveys involve only discrete points, the displacement function must be approximated through some selected deformation model which fits the observed changes in coordinates (displacements), or any other type of observables, in the statistically best way. The displacement function,

$$\mathbf{d}(x,y,z,t) = [u(x,y,z,t), v(x,y,z,t), w(x,y,z,t)]^T \quad [1]$$

with u , v , and w being components in x -, y -, and z -directions, respectively, may be determined, for example, through a polynomial approximation of the displacement field.

The displacement function can be written in matrix form as:

$$\mathbf{d}(x,y,z,t) = \mathbf{B}(x,y,z,t) \mathbf{c} \quad [2]$$

where $\mathbf{B}(x,y,z,t)$ is the deformation matrix with its elements being some selected base functions, and \mathbf{c} is the vector of unknown coefficients.

Usually, the actual deformation model is a combination of the above simple models or, if more complicated, it is expressed by non-linear displacement functions, which require fitting of higher-order polynomials or other suitable functions. If time dependent deformation parameters are sought, then the above deformation models will contain time variables.

A vector $\Delta \mathbf{I}$ of changes in any type of observations, for instance, changes in tilts, in distances, or

in coordinates derived from geodetic surveys, can always be expressed in terms of the displacement function. For example, the relationship between a displacement function (components u, v, w) and a change ds in the distance observed between two points I and J in two monitoring campaigns may be written as [Chrzanowski et al., 1986a]:

$$ds_{ij} = \frac{x_j - x_i}{s} \cdot u_j + \frac{y_j - y_i}{s} \cdot v_j - \frac{x_j - x_i}{s} \cdot u_i - \frac{y_j - y_i}{s} \cdot v_i \quad [3]$$

For a horizontal tiltmeter, the change $d\tau$ of tilt between two survey campaigns may be expressed in terms of the displacement function (component w) as:

$$d\tau = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \sin \alpha + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \cos \alpha \quad [4]$$

where α is the orientation angle of the tiltmeter.

The functional relationship for any other types of observables and displacement functions are given in Chen [1983], Chrzanowski et al. [1986a] and Chrzanowski et al. [1986b]. In matrix form, the relationship is written as:

$$\Delta \mathbf{I} = \mathbf{A} \mathbf{B}_{\Delta} \mathbf{c} \quad [5]$$

where \mathbf{A} is the transformation matrix relating the observations to the displacements of points at which the observations are made, and \mathbf{B}_{Δ} is constructed from the above matrix $\mathbf{B}(x,y,z,t)$ and related to the points included in the observables.

If redundant observations are made, the elements of the vector \mathbf{c} and their variances and covariances are determined through the least-squares approximation, and their statistical significance can be calculated. One tries to find the simplest possible displacement function that would fit to the observations in the statistically best way.

The search for the »best« deformation model (displacement function) is based on either a priori knowledge of the expected deformations (for instance from a finite element analysis) or a qualitative analysis of the deformation trend deduced from all the observations taken together. In the case of the observables being the relative displacements obtained from geodetic surveys, the iterative weighted transformation (see above) of the displacements gives the best picture of the actual deformation trend helping in the spatial trend analysis. In the case of a long series of observations taken over a prolonged period of time, plotting of individual observables versus time helps to establish the deformation trend and the deformation model in the time domain.

The results of the geometrical analysis serve as an input into the physical interpretation by comparing them, for instance, with the results of the deterministic modelling (Fig. 1). Examples are given, among others, in *Chrzanowski et al. [1990]*, *Leal et al. [1992]*, and *Chrzanowski et al. [1991]*.

Conclusions

- (1) All the major problems in the design and geometrical analysis (in space and time domains) of integrated monitoring surveys (including the identification of unstable reference points) have been solved.
- (2) The developed concept of the integrated monitoring surveys (integration of geodetic, photogrammetric, and geotechnical/structural measurements) has been implemented in practical applications.
- (3) The concept of the fully integrated analysis (integration of geometrical and physical analysis) has been elaborated and general methodology for its implementation has been developed. Further work is still needed in this interdisciplinary research.
- (4) Surveying engineers, photogrammetrists, and geodesists, in order to successfully compete with other professionals involved in deformation monitoring and analyses, should get acquainted with the physical modelling and deformation interpretation methods as well as with geotechnical and structural monitoring techniques.
- (5) Contacts and exchange of views with specialists from other professions such as geotechnical and structural engineering, soil and rock mechanics, geophysics, and engineering geology, should be intensified by inviting them to the symposia and workshops organized by the member organizations of the IUSM.
- (6) IUSM should establish a committee with representatives from all the member associations to coordinate studies on deformation monitoring and analysis in order to avoid unnecessary duplication of efforts.

References

- Chen, Y. Q. [1983]:* Analysis of Deformation Surveys – A Generalized Method. Technical Report No. 94. University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., Canada
- Chen, Y. Q., Chrzanowski, A. [1986]:* An overview of the physical interpretation of deformation measurements. Proceedings of the Deformation Measurements Workshop, MIT, Oct. 31 - Nov. 1, 1986, pp. 207-220
- Chen, Y. Q., Chrzanowski, A., Secord, J. M. [1990]:* A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys. CISM Journal ACSGC, Vol. 44, No. 2, Ottawa, pp. 39-46
- Chen, Y. Q., Tang, C. [1992]:* Application of Separability Criterion in Design of Deformation Monitoring Networks. Proceedings of the 6th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Hannover, 24-28 February, 1992, in press
- Chrzanowski, A. [1986]:* Geotechnical and other non-geodetic methods in deformation measurements. Proceedings of the Deformation Measurements Workshop, MIT, Oct. 31 - Nov. 1, 1986, pp. 112-153
- Chrzanowski, A. and Members of FIG Ad Hoc Committee [1981]:* A Comparison of Different Approaches into the Analysis of Deformation Measurements. Proceedings of the XVIth FIG Congress, Montreux, Switzerland, 1981, Paper No. 602.3, Montreux
- Chrzanowski, A., Secord, J. M. [1983]:* Report of the Ad Hoc Committee on the Analysis of Deformation Surveys. Proceedings of the XVIIth FIG Congress, Sofia, 1983, Paper No. 605.2, Sofia
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q. [1986]:* Report of the ad hoc Committee on the Analysis of Deformation Surveys. Proceedings of the XVIIIth International FIG Congress, Toronto, 1-11 June, 1986, Paper No. 608.1, Toronto
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Romero, P., Secord, J. M. [1986a]:* Integration of geodetic and geotechnical deformation surveys in the geosciences. Tectonophysics, Vol. 130, Amsterdam, pp. 369-383
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Secord, J. M. [1986b]:* Geometrical analysis of deformation surveys. Proceedings of the Deformation Measurements Workshop, MIT, Oct. 31 - Nov. 1, 1986, pp. 170-206
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Leeman, R., Leal, J. [1989]:* Integration of the Global Posi-

- tioning System with Geodetic Levelling Surveys in Ground Subsidence Studies. CISM Journal ACSGC, Vol. 43, No. 4, Ottawa, pp. 377-386
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q. [1990]:* Deformation Monitoring, Analysis and Prediction – Status Report. Proceedings of the XIXth International FIG Congress, Helsinki, 10-19 June, 1990, Paper No. 604.1, Vol. 6, Helsinki, pp. 83-97
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Szostak-Chrzanowski, A., Secord, J. M. [1990]:* Combination of geometrical analysis with physical interpretation for the enhancement of deformation modelling. Proceedings of the XIXth International FIG Congress, Helsinki, 10-19 June, 1990, Paper No. 612.3, Vol. 6, Helsinki, pp. 326-341
- Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Secord, J. M., Szostak-Chrzanowski, A. [1991]:* Problems and solutions in the integrated monitoring and analysis of dam deformations. CISM Journal ACSGC, Vol. 45, No. 4, Ottawa, pp. 547-560
- Grafarend, E. W., Sanso, F. [1985]:* Optimization and Design of Geodetic Networks. Springer-Verlag, Berlin/New York, 606 p.
- Heck, B., Kok, J. J., Welsch, W., Chrzanowski, A., Chen, Y. Q., Secord, J. M. [1982]:* Report of the FIG Working Group on the Analysis of Deformation Measurements. – In: *Joó, I., Detreköi, A. (Eds.):* Proceedings of the Third International FIG Symposium on Deformation Measurements by Geodetic Methods, Budapest, 25-27 August, 1982. Publishing House of the Hungarian Academy of Science, Budapest, pp. 373-415
- Kuang, S. L. [1991]:* Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes. Technical Report No. 157. University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., Canada
- Kuang, S. L., Chrzanowski, A., Chen, Y. Q. [1991]:* A unified mathematical modelling for the optimal design of monitoring networks. Manuscripta Geodaetica, Vol. 16, No. 6, Berlin, pp. 376-383
- Leal, J., Murria, J., Chrzanowski, A., Secord, J. M. [1992]:* Monitoring Horizontal Movements in the Costa Oriental Protection Dykes in Venezuela. Proceedings of the 6th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Hannover, 24-28 February, 1992, in press
- Niemeier, W., Rohde, G. [1982]:* On the optimization of levelling nets with respect to the determination of crust movements. – In: *Sigl, R. (Hrsg.):* Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and Computations of the International Association of Geodesy, Munich, Aug. 31 to Sept. 5, 1981. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 285, Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, pp. 148-160
- Szostak-Chrzanowski, A., Chrzanowski, A. [1991]:* Modeling and Prediction of Ground Subsidence using a Iterative Finite-Element Method. Proceedings of the 4th International Symposium on Land Subsidence, Houston, Texas, 12-17 May, 1991. IAHS Publications, No. 200, International Association of Hydrological Sciences, Gent/Brügge, pp. 173-180
- Tang, C., Chen, Y. Q., Chrzanowski, A. [1990]:* Optimum Design of GPS Networks for Monitoring Vertical Movements. Proceedings of the 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS (GPS '90), Ottawa, September 3-7, 1990. Canadian Institute of Surveying and Mapping, Ottawa, pp. 898-907
- Zhang, Z., Li, X. [1990]:* A New Optimization Method for Monitoring Networks Based on the Sensitivity Criterion. Zeitschrift für Vermessungswesen, 115. Jahrgang, Heft 6, Stuttgart, pp. 247-255

Pseudo-Stereo Mapping

Summary

A so called pseudo-stereo technique for soft copy mapping was developed for the extraction of planimetric information from digital images in a geographic information system workstation, without the need for stereo viewing or a digital elevation model. Digitization is performed monoscopically on the display screen of the workstation in one of the images of a stereo pair. Corresponding points in the second image are located by image matching techniques. The object space coordinates are then computed by space intersection. This mapping technique was successfully implemented and tested.

Zusammenfassung

Eine sogenannte Pseudo-Stereo-Technik für die digitale Kartenherstellung wurde entwickelt, um Grundrißinformationen aus digitalen Bildern in einer GIS Workstation zu extrahieren, ohne stereoskopische Betrachtung oder ein Digitales Höhenmodell zu benötigen. Dabei wird die Digitalisierung monoskopisch am Monitor der Workstation in einem der Bilder eines Stereopaars durchgeführt. Korrespondierende Punkte im zweiten Bild werden Bildzuordnung lokalisiert. 3 D Objektkoordinaten werden dann durch räumliches Vorwärtseinschneiden berechnet. Diese Kartierungstechnik wurde erfolgreich implementiert und getestet.

1. Introduction

Soft copy, digital photogrammetry is revolutionizing map compilation. The production of general purpose basic maps, such as the federal, provincial or municipal Map series, will probably remain in the hands of professional mapping organizations in the foreseeable future. Natural resource inventory maps, thematic maps, mspecial purpose maps and alike can now be produced by professionals and technologists in various disciplines who are also the users of these products. With the help of mapping software, these individuals can extract, in a computer graphics workstation, from digital images the information they need. Extensive

knowledge in photogrammetry and cartography is no longer necessary. This desk top mapping is analogous to desk top publishing which is now widely applied.

The first all-digital photogrammetric restitution instruments appeared in the 1980s, and several models were exhibited at the 1992 ISPRS Congress. Currently, the high performance models are rather expensive and are affordable only by large organizations. There are also some problems to overcome before the all-digital photogrammetric workstations replace the existing analogue and analytical plotters. More powerful processors, larger and faster memories, higher resolution display screens and the development of an all-digital imaging sensor with a performance comparable to an aerial mapping camera are needed. Electronic technology is advancing at a rapid pace, however, and it will not take all-digital photogrammetric systems thirty years to come to age, as was the case for the analytical plotter. In the meantime, attention should be focused on the so called secondary mapping operations like, resource inventory, thematic, customized mapping and map updating. Existing technology can serve these application well, in a cost effective manner.

Secondary mapping is performed under different conditions and requirements than primary basic mapping in the following respects:

- Planimetric information extraction is the main goal.
- Map accuracy standards are less stringent than in primary mapping.
- Secondary mapping implies that a primary digital base map already exists which can provide a dense network of reference features for the restitution of images.
- Resolution of digital images used in most secondary mapping applications need not be as high as for primary mapping.

The requirements which a secondary soft copy mapping facility must fulfill can be summarized as follows:

- All operational procedures must be easily understood and able to be followed by users without photogrammetric or cartographic skills.

- Image restitution must be based on sufficiently rigorous mathematical models to assure that the map accuracy standards and specification are met.
- Means must be provided for the easy integration of the mapping output with existing data bases.

2. Pseudo-Stereo Image Restitution

2.1 The Technique

Monoscopic measurement and digitization in images displayed on the screen of a cartographic workstation forms the basis of this mapping technique. A significant element of this scheme is its implementation in a geographic information system (GIS). Thus, information stored in the GIS can serve as ancillary data to support the mapping operation, while the newly acquired information can readily be merged with existing files.

Image monoplottting is the simplest scheme which can be offered to non-photogrammetrists. In the past, single image photogrammetry has been used routinely for transferring details from photographs onto maps in instruments built on the camera lucida principle. The residual effects of tilt, relief displacement and other geometric anomalies inherent in photographs are, however, limiting factors in the application of these devices. Possible means to alleviate these problems in soft copy photogrammetry are to perform the digitization in a digital orthoimage or by numerical rectification and the correction of relief displacements based on a digital elevation model (DEM). Pseudo-stereo mapping is design for the case when no DEM is available, the digital image provides stereoscopic coverage, but the workstation is not equipped for stereo viewing.

2.2 The Procedure

The pseudo-stereo mapping technique has been implemented in a GIS which is capable of handling digital images in raster form as well as digital map graphics in vector form [Derenyi, 1991]. The main steps, are as follows [Chen, 1993]:

1. The exterior orientation parameters of both images are determined by space resection. Image coordinates of the ground control points (GCPs), needed for this purpose, can be measured monoscopically on the display screen. When a digital map of the area is available in the GIS, the GCPs can be acquired in a double window display of the image and the map. An alternate step is to acquire the orientation parameters from some other sources such as aerotriangulation.

2. The planimetric features to be mapped are digitized in Photo 1 on the screen. This is achieved by free hand cursor control using a mouse. Zooming, planning and real time image enhancement facilities assist in this operation.
3. Corresponding image points are located in Photo 2 by image matching. This operation is performed in batch mode after a group of points has been digitized.
4. The object space coordinates of the digitized points are computed by space intersection and stored in a new map file or added to an existing file. This step is also a batch operation.

2.3 Image Matching

The key issue in pseudo-stereo mapping is to locate the corresponding point in the second image of the stereo-pair by image matching. There are several techniques available to perform this task, which fall into two categories: area-based and feature-based matching. The least squares area-based image matching (LSM) technique has been selected for this development. LSM derives a shaping function from one image window to another by minimizing the grey level value differences between the two matching windows. Briefly, this is done by forming an observation equation for each pixel being matched at a particular position of the target array in the search area. Each observation equation compares the grey level values of the pixels being matched to estimate geometric and radiometric differences between the two images [Rosenholm, 1986].

LSM has several advantages:

- High precision can be obtained. Precision of up to 0.05 pixels has been reported in the literature.
- The geometric and radiometric differences between two images can be modeled.
- The solution is highly redundant, even for small window size, which provides a strong least squares solution.
- The information obtained at one matching position can be used as a guide for the next iteration, which avoids a systematic search. LSM is therefore computationally efficient and is suitable for a real time solution.

LSM also has certain problems:

- The algorithm is developed by the use of Taylor's expansion to linearize the observation equations, removes the non-linear higher order terms from the solution process. Therefore, a good

initial approximation is needed for the matching position.

- Multi-solution (non-unique solution) may happen in areas where repetitive patterns and high frequency texture exist.

In the development of the pseudo-stereo mapping technique these problems have been overcome by predicting a close matching position and by using the epipolar geometry as a constraint [Chen, 1993].

3. Performance Test

3.1 Test Material and Method

The pseudo-stereo mapping technique was tested on a stereo pair of black-and-white photographs, covering the City of Fredericton and vicinity. These were taken in 1983, at a scale of 1 : 35 000, with a wide angle camera. The downtown area, which spreads along the south shore of the St. John River, is essentially flat at an elevation near sea level. From there the terrain has a steady incline and reaches an elevation of 130 m at the city limit.

Digital images were generated by scanning the paper prints in a Hewlett-Packard ScanJet Plus document scanner. The contrast and brightness parameters of the scanner were adjusted before scanning to equalize the mean grey level values in the two images. Considering the limited disk space available in the computer, the scanning resolution was restricted to 300 dots-per-inch (dps) or 118 dots-per-cm, which resulted in a pixel size of 85 μm in the image and 3.0 m on the ground. The radiometric resolution was set to 256 grey levels.

GCPs for the determination of the exterior orientation elements were obtained from 1 : 1 200 scale maps. The contour interval is 1.0 m overall, but in areas where the elevation is below 15 m, the interval is 0.5 m

A total of 120 different types of feature points were digitized on the screen in Photo 1. These features were residential streets, buildings, a bridge, railway and a sports field. The ground coordinates of each were then computed using the correlation and the space intersection software, and compared with the coordinates measured on the 1 : 1 200 scale maps [Chen, 1993].

3.2 Test Results and Discussion

The results of the test are summarized in Table 1. The RMSEs are the root mean square errors of the differences between the planimetric coordinates obtained by the pseudo-stereo mapping technique and those measured in the 1 : 1 200 scale maps. The notation »% < 1.5 m, etc.« means the percentage of the check points with differences smaller than 1.5 m, etc.. The photographs for this test were taken from a block flown for 1 : 10 000 scale mapping. Therefore the assessment of the results is based on the degree of compliance with the map accuracy standards applicable at that scale.

The accuracy specification for the »Urban and Resource Digital Map Base« in the »Land and Water Information Standards Manual« states (NBGIC, 1991):

»Ninety percent (90%) of all "well defined features" must fall within the positional accuracy ... [2.5 m]. Well-defined features are those whose positional accuracy is not adversely affected by

Table 1: Results of the Pseudo-Stereo Mapping Experiment

Feature	No. points	Mean [m]	RMSE [m]	% < 1.5 m	% < 2.5 m	% < 5.0 m
Residential streets	62	1.41	1.60	58.1	88.7	100
Buildings	32	1.63	1.85	50.0	87.5	100
Bridge	6	1.15	1.20	83.3	100.0	100
Railway	9	1.18	1.35	77.8	88.9	100
Sports field	11	1.47	1.72	72.7	72.7	100
All	120	1.44	1.65	60.0	87.5	100

vegetative cover. Accuracy of the digital data (point, line, area) can be defined as the difference between the position of the associated data in the digital file and the real position of the represented features on the earth.»

Although this requirement is rather strict, 87% of the well defined feature points satisfied it. This is only 3% below the 90% tolerance. For graphical map production, the generally accepted tolerance in North America is 0.5 mm at publication scale, at the 90% confidence level. This corresponds to 5.0 m for the 1:10 000 scale. All points were within this tolerance.

The following points should be considered to put the results in proper perspective:

1. The pixel size of the digitization was 3.0 m on the ground which is larger than the 2.5 m tolerance set by the map accuracy standards.
2. The stage plate of the scanner used was 8.5 x 14 inches, which is narrower than the size of the photographs. Thus, two of the primary corner fiducial marks and one of the secondary marks along the edges of the photographs were missed. This introduced an uncertainty in the interior orientation.
3. The particular scanner employed is only suitable for digitizing opaque photographic prints. The poor dimensional stability of paper is of course a source of significant distortion.
4. Because of storage limitations in the computer, only the overlapping areas of the photographs were kept on file and used for selecting GCPs. Therefore, the geometry of the bundle of rays in the space resection was not the most favourable.
5. The 1:1200 scale maps used for comparison were accepted as error free.

Under the above circumstances the test results can be accepted as a proof of the feasibility of the pseudo-stereo mapping technique developed. Further tests are of course needed to fully validate and improve this technique.

4. Conclusions

The pseudo-stereo mapping technique is applicable when no DEM is available, or when the DEM is out of date and the relief displacement is too

significant to be ignored. This technique has been successfully implemented in a GIS as proven by the outcome of an experiment. The ability to perform soft copy mapping in a GIS has the advantage that both the image and the map resides and is manipulated in the same workstation.

It is true that the results of the test do not entirely satisfy the map accuracy standards set for the digital base map production. Firstly, the experiment was conducted under less than ideal conditions for precision mapping, as explained earlier. Secondly, the objective of this development was to provide tools for secondary thematic mapping, performed by non-photogrammetrists, when accuracy requirements are not stringent. Thirdly, simplicity and low-cost were also objectives. This explains the reason for omitting the need for stereo vision and the use of an inexpensive document scanner and paper prints. Corrections could be included to reduce the various distortions encountered but this would complicate the procedure and may prove to be beyond the comprehension of non-photogrammetrists. The most feasible way of improving the accuracy would be to digitize the diapositives in a larger, more precise scanner, at a higher density.

Acknowledgement

The author wishes to thank Ying Chen for her contribution in the development of the software.

References

- Chen, Y. [1993]:* Development of Pseudo-Stereo Method for Digital Map Revision. M. Sc. E. thesis, University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., Canada, 97 p.
- Derenyi, E. [1991]:* Design and Development of a Heterogeneous GIS. CISM Journal ACSGC, Vol. 45, No. 4, Ottawa, pp. 561-567
- Rosenholm, D. [1986]:* Accuracy Improvements in Digital Matching. Photogrammetric Reports, Vol. 52, No. 2, The Royal Institute of Technology, Department of Photogrammetry, Stockholm

Photogrammetry's Role in the Digital Era

Summary

It is anticipated that it will take a few more years for film-based aerial photographs to be replaced by airborne scanner imagery. Digital photogrammetric workstations are especially suited to the processing of raster images and automated measurements. A very important feature is automated image matching which leads to the automated production of DEM, orthophoto, superimposition of extracted features and photographic and graphic by-products. The output of the digital photogrammetric system can be well-integrated in GIS/LIS and CAD. In order to make it less expensive, the price of the hardware has to be reduced. Checking and verifying results has to remain the task of professional photogrammetrists.

Zusammenfassung

Es ist zu erwarten, daß es noch einige Jahre dauern wird, Luftbilder auf Film durch im Flugzeug gewonnene Scannerbilder zu ersetzen. Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen sind für die Verarbeitung von Rasterbildern und automatische Messungen besonders geeignet. Wichtiger Bestandteil ist die automatische Bildzuordnung, die die automatische Herstellung von Digitalen Höhenmodellen, Orthophotos, die Superimposition von extrahierten Merkmalen sowie graphische und photographische Nebenprodukte ermöglicht. Die von einem digitalen photogrammetrischen System produzierten Daten lassen sich gut in GIS/LIS und CAD integrieren. Um ein solches System weniger kostspielig zu machen, müssen die Hardwarekosten verringert werden. Überprüfung und Bestätigung der Ergebnisse müssen Aufgabe professioneller Photogrammeter bleiben.

1. Photographs versus Scanner Imagery

Until now the best possible medium to store image data has been the photograph. Its acquisition

is easy, storage and reproduction problems have been solved a long time ago. The data contents of a photograph, taken with modern aerial cameras, are at present superior to any image acquired by sensor arrays. Looking at the photographic image, either from the viewpoint of geometric accuracy, or radiometric fidelity, it is favourable, compared with the image registered by CCD cameras. Storing a considerable amount of photographic information in hard copy form is still the easiest solution.

If everything is ideal with the smooth, continuous tone photograph, why should we worry and make great efforts to change over to digital products? The historical development of photogrammetry answers this question: In 1972, a revolutionary change in approach took place with the first ERTS-1 satellite's images being published and exhibited at the 12th Congress of ISP in Ottawa, Canada. The above-mentioned first »Landsat« satellite has provided contiguous and repetitive coverage of the earth's surface, using MSS (Multi-spectral Scanner) images, which were registered simultaneously through a single optical system [Doyle, 1972]. The video data, gathered by MSS, were transmitted to reception-stations, either directly in real time, or via a videotape recorder, when under favourable conditions for the transmission.

Since 1972 satellite images in raster form have been much improved. Ground resolution of 30 m was attained by the Thematic Mapper and recently 10 m resolution was reached by the French SPOT satellite.

Prior to 1972 the imaging information taken by satellites was in photographic form, having the advantages and shortcomings of pictures taken by aerial cameras. Even after 1972, for a certain period of time, the satellite images were transformed to hard copy to facilitate interpretation.

Today, satellite images are processed in digital form, using picture elements (pixels) as units. For further processing precise photogrammetric algorithms are used. The state of the art today is, that images in digital form are better suited for automation than well-established continuous tone photographs, which are still processed, in most cases, by human operators.

2. Raster Images

The parameters of raster technology, using scanned photographs, are based on photo-coordinates in the frame of the fiducial plate coordinate system. The line coordinates of the pixels are counted from the beginning of each row of the raster. Each consecutive row is perpendicularly displaced, in relation to the direction of the previous one. By processing raster images, a transformation is carried out from raster to vector data. Consequently the coordinates of each pixel are computed in the fiducial system. Each pixel has three values attached: x and y coordinates in the fiducial framework and the third is its value in the grey scale. Mostly 8-bit grey shade values are captured by the sensors and transmitted. Hence, the grey scale contains 256 values, starting from zero (white) and ending with 255 (black).

Sensor technology in its present state cannot offer the same resolution and accuracy that aerial photographs do. For this reason mapping in large scale by digital photogrammetry still utilizes aerial photographs, although in their scanned form. Today, the resolution of an aerial photograph approaches 100 line-pairs per millimeter, which means that, in the signal pattern, each line and each space is 5 μm wide. The standard size of such a photograph being 230 mm x 230 mm, each line and each column contains 46 000 pixels, totaling 2.116×10^6 pixels. Provided that 8-bit grey values are registered for each pixel, 2.1 Gb is required to store the pixel information of one photograph in computer memory.

In order to reduce the required computer memory, the pixel size chosen for scanning is seldom less than 20 μm . Even so, 11 500 pixels appear in each line and column, given a total memory requirement of 130 Mb. From the simple calculation shown above, the conclusion can be drawn that scanning photographic images to a relatively high resolution is a long and costly process.

The density of information content of the processed image depends on the type of terrain to be mapped. I.e. built up areas need much higher resolution than forest reserves. It is the human operator's task to select the scanning parameters, among them the resolution which serves his purpose. Modern digital software makes image compression and decompressing possible, according to terrain type. Recent advances in computer-technology have facilitated the very fast display and processing of image data, bringing real-time photogrammetry within our reach [Dowman, 1990].

3. Terrain Mapping with Automatic Features

3.1 The First Step in Automation: Image Matching

In 1964, Wild exhibited the Stereomat at the 10th Congress of ISP in Lisbon, Portugal. The Stereomat had a few automated features, among them relative orientation and automated contour plotting in real time. The Wild analogue B 8 plotter served as basic instrument, fitted with correlators by Hobrough, and successful image correlation of the stereopair was achieved, without operator-assistance.

The quality of such a system may be judged by the criteria of: accuracy of automatic readings, speed of measurement, reliability of operation in different types of terrain, etc.. This case fell well short of the above criteria, but it constituted a first step which pointed the way to further developments.

Since 1964, many correlators have been built and their techniques described in professional literature. The trend of the eighties is that images in pixel form are to be preferred for image matching. Different image processing methods use matching procedures which are superior to their predecessors; »image pyramid«, edge matching techniques have to be mentioned [Greenfeld and Schenk, 1989].

Although the human operator did not become superfluous, many visual tasks can be carried out today, quite successfully, by computerized image matching techniques. A good example is the Digital Workstation of Helava, in which not only well-defined points can be read automatically, like targeted ground control points, but, using the texture of the image, tie points for aerial triangulation can also be chosen automatically by correlation. It has been proved that the sensitivity of the correlator surpasses that of the eye.

3.2 Digital Elevation Model Production

In the seventies stereo-orthophotographs were developed and their use studied at the National Research Council of Canada. The stereomate was also produced. From an orthophoto and its stereomate, as both were rectified photographs, terrain height values were derived by reading x-parallax and computations.

In the digital domain, height measurements are carried out automatically in a similar procedure. As a precondition, pixels are resampled in epipolar

rays, adjusted to control of ground and aerial triangulation points. Next, differential x-parallax is derived automatically at every pixel. This measurement is carried out by image matching procedures. In certain percentage of pixels the measured x-parallaxes are not accepted by the built-in statistical tests. Then the results are carefully edited and terrain heights of the Digital Elevation Model (DEM) are computed.

In systems which rely on human operators for the checking procedure, stereoscopic vision is applied. The DEM is superimposed on the stereoscopic model and reviewed. The superimposition has different forms, like pointwise, in profiles, or in contour form. Thanks to the stereoscopic view, doubtful elevation values are easily detected and edited. Among such features, which have been given elevation values but do not constitute part of the ground surface, are buildings, trees and other features, to be defined interactively and their height values to be deleted from the DEM. Water editing can be done automatically, using the average grey scale value of pixels covering the water, for example a lake area.

The tendency today is to develop software to such a degree that the human operator becomes redundant. This goal is still to be attained in DEM measurements. Although automatic DEM production is a very efficient method, careful verification of results and their editing remains very important [Miller and Devenecia, 1990]. We are used to DEMs read by human operators, who, worried by discontinuities and break-lines of the terrain, add special points to the regular grid in areas where sudden changes in the topography are evident. The speed of the automatic reading process makes the free selection of the grid intervals possible, together with a significant reduction of their values. In such case the landforms are relatively well expressed by the dense regular grid.

All is well when image matching is carried out properly with adequate safe guards. The visual checking procedure is important, but does not have to be stereoscopic. Other techniques are also helpful. Hidden faults in heights can be discovered by inspection of interpolated contour lines which were derived from the DEM readings. Missing height values and faulty readings are indicated by the confused appearance of the interpolated contours.

Automatic DEM generation saves much time and reduces costs considerably. The efficiency of the method depends on saving interaction by the human operator, or even making this task redundant. Automatic validation, involving 20 iterations

and error statistics, was in the order of 1 minute, against one hour by an operator [Rauhala et al., 1989].

3.3 Orthophoto Generation and Mosaicking

Those who have had the experience of producing orthophotos by analogue instrumentation, will be much more satisfied with the orthophoto generation from digital images. From rectified and pixel-wise resampled images only the relief-distortion has to be removed during the orthophoto generation process. This is done by relying on DEM data, acquired from any available source. During the removal of x-parallax, the grey value of each pixel is also improved. Whenever an incompatible grey value is encountered, a new, improved value is calculated, by interpolation from the surrounding pixels. Orthophoto generation does not have to be verified stereoscopically. Superimposing the orthophoto on GIS created maps gives a good indication for quality control.

The »Mosaic« procedure creates an image-map made up from a few orthophoto images which have unrecognizable boundaries along their connections. Interactive corrections, both geometric and radiometric, are applied, in order to match the boundaries of the neighbouring images [Bähr, 1989].

3.4 Radiometric Processing

In the automation of image interpretation grey shades play an important role. Images in pixel form have the advantages that two or more boundary values can be merged. In this way the interpreter is able to deal with more extended areas, showing the same land cover. Similarly, radiometric processing can enhance certain grey shades, assisting the interpreter in making selected features visible. Semi-automatic methods of processing have been developed in Remote Sensing which facilitate the extraction of semantic information [Miller et al., 1992].

In images manipulation operator-selectable individual filters, tonal look-up tables, histogram equalization, brightness and contrast control are put into operation, in order to achieve the desired effects.

3.5 Automated Measuring Processes and their Efficiency

Automatic DEM extraction is an exceptionally powerful tool of digital workstations. Each second

from 6 up to 100 points can be measured, using the automatic image correlator. Operator-controlled analytical plotters remain far behind this output; 1 000 to 1 500 points are measured only in an hour's operation. Orthophoto production by an analogue orthoprojector needs about 1 hour for scanning and developing one photograph. In the automated digital process an orthophoto is produced in about a quarter of an hour, on average. Poor quality photographs, on the one hand, and very little contrast of the terrain, on the other hand, may cause cross-correlation problems, which the automated workstation cannot cope with [Boniface, 1992].

In feature extraction in a workstation the only advantage of the digital method, compared with AP performance, is that height setting automatically conforms to the heights interpolated from the DEM. The operator's task is thus simplified, his sole concern being to follow a planimetric line. In the analytical plotter, however, the operator is compelled to keep the floating mark in three dimensions.

Feature extraction is an operator controlled procedure in all cases; therefore, we cannot count on significant gains in performance of the digital method compared with the analytical measuring process.

3.6 Superimposition

For plotting extracted features in lines, point symbols and areas, the superimposition which appears in colour in the stereo viewing system, is a software feature of the digital system. Its implementation in an analytical plotter would entail the use of expensive hardware. Superimposition contributes much to the overall efficiency of feature extraction, because it happens in real time and on the same screen on which the operator's attention is focused.

3.7 Photographic and Graphic By-products

Besides the orthophoto and the mosaic, additional graphic products can be generated from digital pixels:

- a. Hill shading, superimposed on orthophoto.
- b. Perspective views with either individually different, or gradually changing viewing angles.
- c. Viewshed from a certain point of view with occluded areas blackened.

4. Digital Photogrammetric Systems in GIS/LIS, CAD and GPS Environment

In topographic and cadastral mapping with cartographic, or geographic processing, a system is needed for handling spatial data. The available systems today are: Geographic and Land Information System (GIS/LIS) and Computer Aided Design (CAD). In these systems, either 2D, or spatial data is arranged in topologically consistent data bases [Dowman *et al.*, 1992].

Photogrammetry serves today as the main data-gathering technique. The above mentioned systems process the imported data for optimized applications. Digital photogrammetry is the newest branch on the photogrammetric tree, consequently it has a growing importance in its connection with GIS/LIS. A digital workstation's output is directly compatible with GIS features, when imported through a matching interface.

Digitally generated orthophotos, imported to GIS, complement the geocoded features with a separate layer of image attributes. In a number of countries orthophoto-mosaic quadrangles constitute an important part of the mapping program. Here it has to be emphasized that conventional analogue orthophotos do not fit into a GIS system.

Introducing a rectified digital image into the database of GIS can be instrumental in detecting changes in the mapped features. It can also serve for the verification and checking of completeness of the data contents of the digital database.

Organizations, which possess a GIS system, can complement its hardware with the digital photogrammetric workstation's software. In this set-up DEM generation and orthophoto production is possible, although without stereoscopic verification. This is the low end of the digital photogrammetric process. Inherently, it's reliability is limited.

Data, processed by GIS, superimposed on the stereo model of a digital workstation, can assist the human operator to update GIS data. Superimposition works in both directions [Bonjour and Newby, 1990].

Accurately determined ground control points constitute the basis of the geocoded information in the digital mapping process. This control is either surveyed in the field, or obtained from aerial triangulation. The most modern and efficient operation to acquire control is through GPS, with an accuracy in the centimeter range.

The integration of kinematic GPS with the aerial camera [Dorrer and Schwiertz, 1990] yields local coordinates of the antenna centres and indirectly of the camera's perspective centre during the flight. Together with additional ground control points, the GPS camera station coordinates serve for a combined adjustment of aerial triangulation blocks.

Ackermann [1992] suggested a certain configuration of additional height control, or alternatively cross-strips in a block of triangulation, in order to meet all accuracy demands of photogrammetric mapping.

Lately, after customized improvements in their GPS hard- and software, the U.S. Coast and Geodetic Survey made a few experimental block adjustments in which the camera stations' coordinates were the only control. These blocks, from large scale photographs, gave comparable results in their accuracy, whether additional ground control points were used, or not.

Digital photogrammetry is easily integrated with GPS. Aerial triangulation starts with automated reading of tie points in the digital workstation.

5. Cost Considerations

The following have to be taken into account when calculating the cost of a new technology:

- a. Price of the acquisition of the whole system.
- b. Installation, training and implementation costs.
- c. Complementing costs, which are accrued, when traditionally required standard products cannot be produced in the new system.
- d. Benefits which cause a reduction of costs. Saving in the cost of operations at production level, compared with previously obsolete techniques.

In our case, for large scale photogrammetric mapping, another factor has also to be considered. There is a small probability only, that the standard aerial camera will be replaced by airborne imaging digital systems during this century.

This state of the art means that, at least until the late nineties, the necessary digital image will be produced by scanning aerial photographs. Consequently, the price of the scanner has also to be taken into account. At the present a scanner costs from US \$ 50 000 to US \$ 100 000. Such a scanner can serve 5-6 digital workstations. The price of a digital workstation depends whether it is stereoscopic, or a monoscopic one. The cost of a stereoscopic workstation is about twice that of a

monoscopic one. This large difference in price is due to the hard- and software costs of the image processor. The price of a stereoscopic workstation varies from US \$ 60 000 to US \$ 130 000, depending whether standard off the shelf components are used, or alternative special products are required.

On acquiring a digital workstation, it has to be assured that future up-date of high-tech parts does not necessitate meaningful changes in the user's software.

In choosing a digital system, the most important consideration should be its software efficiency and completeness. Completeness means: The feasibility of processing digitized aerial photographs, SPOT and Landsat imagery, extraction of terrain data, generation of photographic products, and finally, checking and verification of all data. Efficiency can be expressed by the productivity in a time-unit. An important factor is the system's rating in user-friendliness. A complete software system-program costs from US \$ 40 000 to US \$ 70 000.

Compatible hardware, of quality and reliability roughly comparable with that offered in bundled systems, is advantageous pricewise. A user, who has the background in computer technology, image processing and programming, can save a considerable part of the cost, by ordering unbundled systems with complete user's software. Of course, it is a calculated risk. It cannot be guaranteed that by plugging in, the system becomes instantaneously fully-functional. Efforts have to be made to attain this goal.

A digital orthophoto system, equipped with an input scanner and also with an output film writer, costs the equivalent of an optical-mechanical orthophoto system. It can be concluded that a complete digital workstation with all its production capabilities is the best buy in its domain.

6. Conclusions with a Word of Caution

Digital photogrammetry is here to stay. It represents information processing in real time. Perhaps as many, as a hundred man-years have already been spent on programming the different phases of production. Complete software packages are not machine-made, therefore expensive. Cost saving can be expected from further development of hardware. Photogrammetric mapping should be made easier by automation which is inherent in these

systems. Nevertheless a real break-through in feature extraction is not in the offing.

Stereoscopic view and image matching by human operators can often be dispensed with. Automated checking procedures are now operational in DEM production. As is happens in computerized techniques the world over, the algorithms are available, and system operation does not depend on special know-how. Hence, photogrammetric mapping is being done by non-photogrammetrists.

Here comes the word of caution: systems of all kinds must be operated according to strict rules. Without the know-how, proper attention cannot be paid to the rules. For this reason there is the danger of faulty products being made and distributed without raising even a trace of suspicion.

References

- Ackermann, F. [1992]:* Prospects of Kinematic GPS for Aerial Triangulation. The ITC Journal 1992-4, Enschede, pp. 326-338
- Bähr, H. P. [1989]:* Das Digitale Orthophoto und seine Möglichkeiten. 42. Photogrammetrische Woche Stuttgart 1989, Schriftenreihe Institut für Photogrammetrie Universität Stuttgart, Heft 13, S. 243-260
- Boniface, P. R. J. [1992]:* PRFSM – Softcopy Production of Orthophotos and DEM. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, Falls Church, VA., pp. 91-94
- Bonjour, J. D., Newby, P. R. T. [1990]:* Architecture and Components of Photogrammetric Workstations. Photogrammetric Record, Vol. 13, No. 75, London, pp. 389-405
- Dorrer, E., Schwiertz, Ch. [1990]:* Kinematic GPS and Aerial Triangulation – A Comparative Study. Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium »Progress in Data Analysis«, 20-25 May, 1990, Wuhan, China. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part 3/2, Wuhan, pp. 107-131
- Dowman, I. J. [1990]:* Digital Plotters: Current Status and Future Developments. Photogrammetric Record, Vol. 13, No. 75, London, pp. 331-345
- Dowman, I. J., Ebner, H., Heipke, Ch. [1992]:* Overview of European Development in Digital Photogrammetric Workstations. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, Falls Church, VA., pp. 51-56
- Doyle, F. J. [1972]:* Imaging Sensors for Space Vehicles. Invited paper, ISPRS-Commission I, 12th Congress of Photogrammetry, July 1972, Ottawa, Canada, 28 p.
- Greenfeld, J. S., Schenk, A. F. [1989]:* Experiments with Edge-Based Stereo Matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 12, Falls Church, VA., pp. 1771-1777
- Miller, S., Devenecia, K. [1990]:* Automatic Elevation Extraction and the Digital Photogrammetric Workstation. Helava Associates Inc., San Diego, CA., 9 p.
- Miller, S., Helava, U. V., Devenecia H. K. [1992]:* Softcopy Photogrammetric Workstations. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, Falls Church, VA., pp. 77-83
- Rauhala, U. A., Davis, D., Baker, K. [1989]:* Automated DTM Validation and Progressive Sampling Algorithm of Finite Element Array Relaxation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 4, Falls Church, VA., pp. 449-465

Wolfgang Faig

Computer Assisted Photogrammetric Measurements: Developments at the University of New Brunswick

Es ist eine ehrenvolle Aufgabe, für die Festschrift zum 60. Geburtstag von Herrn Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer einen kleinen Beitrag liefern zu dürfen. Nach Herrn Prof. Konecny, welcher wohl die ersten Kontakte aufgenommen hatte, war ich wahrscheinlich der nächste, der daran beteiligt war, für Egon eine Brücke über den Atlantik von Bayern nach Neu Braunschweig in Kanada zu schlagen. Als Egon ernsthaft erwog, eine Professur an der University of New Brunswick (U.N.B.) anzunehmen, war ich – nach einem über zweijährigen Studienaufenthalt an der U.N.B. – gerade als Doktorand in Stuttgart. Er hat mich und meine Familie dort besucht, um uns über die U.N.B. und Fredericton auszufragen.

Anscheinend war er mit den Auskünften zufrieden und wurde Photogrammetrieprofessor an der U.N.B.. Damals hatte ich natürlich nicht die geringste Ahnung, daß wir später als Kollegen zusammenarbeiten würden, denn auch ich bin schließlich an der U.N.B. gelandet. Da ich die langen, harten Winter vielleicht etwas besser ertrage, bin ich immer noch hier.

Während unserer gemeinsamen Zeit in Kanada haben wir an verschiedenen Forschungs- und Lehrprojekten zusammengearbeitet. Ich denke gerne an diese Epoche zurück und – indem ich mich mit einem Thema befasse, für das Egon Dorrer die Fundamente gelegt hat – möchte ich ihm ganz herzlich zum Geburtstag gratulieren. Mögen die nächsten sechzig Jahre für ihn genauso produktiv werden wie die vergangenen.

Der Sprung von Bayern nach Neu Braunschweig – oder von Deutschland nach Kanada – brachte eine sprachliche Umstellung von deutsch auf englisch mit sich. In diesem Sinne und besonders auch für Prof. Dorrers kanadische Kollegen werde ich jetzt diese Sprachänderung nachvollziehen und über die Entwicklungen an der U.N.B. in rechnergestützter photogrammetrischer Auswertung in Englisch berichten.

Summary

This paper describes the developments at UNB in computer assisted photogrammetric measurements. Starting with Dr. Dorrer's research in the areas of instrument performance testing and hybrid systems, it then focuses on recent work dealing with software optimization for a photogrammetric workstation and its integration into a GIS, as well as with a simple enlarger digitizer based measuring system and subsequent automation using digital image correlation.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit den Entwicklungen in der rechnergestützten photogrammetrischen Auswertung an der U.N.B.. Nach Erwähnung von Prof. Dorrers Forschungsarbeiten in den Bereichen Instrumentenuntersuchung und Hybridsysteme wird auf neuere Arbeiten näher eingegangen. Diese beschäftigen sich mit Softwareopti-

mierung für eine photogrammetrische Workstation und deren Integrierung in ein Geo-Informationssystem sowie mit einem einfachen Auswertesystem, das auf der Digitalisierung vergrößerter Photos beruht, und dessen nachfolgende Automatisierung mittels digitaler Bildkorrelation.

Introduction

In the late 1960's, photogrammetry entered a period of rapid change. Not long before that time, photogrammetry was referred to as the science without mathematics. Analogue methods and plotters provided the means and instruments for converting photographic information into cartographic and positioning data.

However, with the increasing power and speed of digital computers, numerical photogrammetry became feasible. The focus of photogrammetric research and practice started to shift from analogue to analytical methods – a trend that is still continuing today.

Prof. Dorrer arrived at the University of New Brunswick as resident photogrammetrist at a time when these developments gained momentum. He not only adapted to the changing situation, but showed foresight and leadership in laying the foundations upon which photogrammetrists at the university continue to build.

The Dorrer Years

With numerical processing, the accuracy and performance of the instrumentation used to extract information from the photographs represents a critical limitation to the quality of the evaluation. It is therefore not surprising that one of Prof. Dorrer's research thrusts at UNB was in the area of performance evaluation and testing of photogrammetric equipment. He greatly expanded the knowledge in this area, developed theoretical concepts and practical procedures which form the basis for the evaluation of a variety of instrument performance- and maintenance tests [Dorrer, 1971]. His comprehensive lecture notes on this subject [Dorrer, 1973] remain one of the key reference works.

Of even greater significance are his developments in computer supported photogrammetric evaluation. While UNB had been fortunate in obtaining one of the first Analytical Plotters, the analog to digital conversion of conventional plotters in form of hybrid arrangements was the prevailing trend in photogrammetric practice. Fundamental developments in this area have established Prof. Dorrer's leadership [Dorrer, 1970; Dorrer and Kurz, 1973] and initiated a course of research endeavours at UNB which continues to this day.

His prominence and expertise received well developed recognition when experts on the subject from all over the world came to UNB after the 1972 ISP Congress to participate in Prof. Dorrer's Symposium on Man-Machine Interface.

Recent Developments

Prof. Dorrer's departure from UNB resulted in a shift in emphasis from measuring instrumentation and its interaction with computers to evaluation procedures and methods (aerotriangulation, digital mapping) in the one hand, and different systems for data capture (non-metric cameras, remote sensing) on the other.

Other than the prototype design and construction of an inexpensive analytical plotter of second order accuracy by Prof. Masry, not much research was done along the lines of Prof. Dorrer's work. Routine maintenance and the fitting of encoders to analogue plotters to facilitate direct input into digital mapping [Masry, 1973] and geographic information systems was about the extent of such endeavours.

This changed a few years ago, when developments in Geographic Information Systems, and Remote Sensing generated renewed interest in the analogue/digital interface as represented by measuring instruments and their performance. Facilitated by the purchase of a modern analytical plotter but also stimulated by the need to make photogrammetry accessible to users without photogrammetric instruments, research on computer assisted photogrammetric measurements gained renewed prominence.

This is illustrated with two examples, one for high precision, the other for low precision work:

Software optimization for, and integration of an analytical plotter into a GIS

Olaleye [1992] investigated and developed an optimum software configuration for an analytical photogrammetric workstation, namely the Department's Kern DSR-11. He then integrated it into the CARIS GIS [Universal Systems Ltd., 1990] for direct real time operation.

Using the R-space and C-space concepts, simplified vector oriented algorithms were developed for implementing the software tools for the workstation. Different software designs for the basic operational tasks, namely mensuration, triangulation, stereo model definition and -restoration, and digitizing were implemented and tested. A mathematical optimization was formulated and carried out using a set of constraint functions in terms of automation content, speed of operation, cost, and achievable accuracy of the derived vector data. These investigations showed that the optimum workstation software design depends on project requirements, such as speed of operation, degree of automation and operator involvement, as well as the accuracy of the derived spatial information. If minimum project time, minimum operator participation, and high spatial fidelity of the vector data are jointly critical, the optimum software architecture is a comparator based design, which includes bundle triangulation, and a stereo model definition unit employing automated relative and absolute orientation computations for model restoration.

The necessity to minimize the data acquisition cost by eliminating expensive intermediate data transfer – often with conversion from one format to another – requires direct integration of the photogrammetric workstation into a GIS. This integration of the DSR-11 workstation into the CARIS GIS for real time operational communication was achieved through the CARIS server interface and the mailbox technology in the VAX VMI environment. This method allows many programs to operate in parallel and to synchronously share data [Faig and Olaleye, 1992].

Low Cost Photogrammetric System

A low cost photogrammetric system for accident evaluation was developed consisting of a data acquisition subsystem (non-metric stereocamera) and a photogrammetric mensuration subsystem plus the evaluation software for use on an IBM PC [Faig et al., 1992]. Inexpensive off the shelf components and fool proof operation by non-photogrammetrists were fundamental requirements, while the accuracy demands were somewhat relaxed.

In the context of this paper, the mensuration subsystem is presented as the low precision example. It is based on the enlarger-digitizer approach [Faig et al., 1990] where the limited resolution of a commercial digitizing tablet (a Summa Sketch II) is improved by using enlarged photographs for digitization.

For this particular project, colour slides were projected onto the digitizing tablet with the slide projector providing the desired enlargement. A driver was written for the Summa Sketch tablet digitizer which was interfaced with an IBM PC compatible computer. This software driver was built into the evaluation software package which includes four stages, namely image coordinate digitization, projective transformation (because of non parallelity of image- and digitizing planes), space intersection, and deformation evaluation. Since a stereo camera was used for data acquisition, relative and absolute orientations were known. The mensuration unit can easily be operated by non-photogrammetrists without stereo viewing. The only manual operation consists of pointing, while everything else is software driven and automated.

This system has been successfully implemented. Further research work resulted in a fully automated approach where the photographs are scanned, thus providing a matrix of pixels with different grey values for digital evaluation [Faig and Shih, 1992], and graph based feature matching is utilized for image correlation [Hellwich and Faig, 1992].

Concluding Remarks

Computer assisted photogrammetric measurements have gained tremendous popularity and acceptance since progressive photogrammetrists like Prof. Dorrer have taken the initial steps some twenty years ago. In fact, they have reached a sophistication, yet simplicity in use, which opens the field of photogrammetry to the general public – an exciting prospect!

References

- Dorrer, E. [1970]: Stereoplotter and Desk Computer in Open-loop System. Papers from the 1970 ASP Symposium on Computational Photogrammetry, January, 7-9, 1970, Alexandria, VA., U.S.A., American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA.
- Dorrer, E. [1971]: Computer Simulation of Analogue Stereoplotters. Proceedings of the 37th Annual Meeting of ASPRS, 1971, Washington D.C., U.S.A., American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp. 650-667
- Dorrer, E. [1973]: Testing and Calibration of Photogrammetric Instruments. Lecture Notes No. 29, University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., Canada
- Dorrer, E., Kurz, B. [1973]: Stereoplotter Interfaced with a Calculator. Photogrammetric Engineering, Vol. 39, No. 10, Falls Church, VA., pp. 1065-1076
- Faig, W., Shih, T. Y., Gang, D. [1990]: The Enlarger-Digitizer Approach: Accuracy and Reliability. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 39, No. 10, Falls Church, VA., p. 243
- Faig, W., Olaleye, J. [1992]: Integration of the Kern DSR-11 Analytical Plotter into a GIS. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission II, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B2, Washington D.C.
- Faig, W., Shih, T. Y. [1992]: A Digital Extension of the Automobile Collision Investigation Photogrammetric System. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission V, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Re-

ote Sensing, Vol. 29, Part B5, Washington D.C.

Faig, W., Wilson, F. R., Shih, T. Y. [1992]: Photogrammetry: A Practical Tool for Car Collision Investigation. CISM Journal ACSGC, Vol. 46, No. 1, Ottawa

Hellwich, O., Faig, W. [1992]: Graph Based Matching of Stereo Image Features. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission III, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B3, Washington D.C.

Masry, S. E. [1973]: Digitizing and Editing under Computer Control. Photogrammetric Record, Vol. 7, No. 42, London

Olaleye, J. [1992]: Optimum Software Architecture for an Analytical Photogrammetric Workstation and its Integration into a Spatial Information Environment. Ph. D. dissertation. Technical Report No. 162, University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., Canada

Universal Systems Inc. [1990]: CARIS Documentation: Introduction to CARED – User's Guide. USL Document No. CAREDINT – JAN 90 – VMS, Fredericton, N.B., Canada

Der räumliche Rückwärtsschnitt nach Konturlinien des Geländes

Zusammenfassung

Es wird eine geschlossene Lösung für den räumlichen Rückwärtsschnitt nach Konturlinien des Geländes vorgestellt. Die für die Lösung notwendige Anzahl von Konturlinienpunkten wird für den allgemeinen Fall, sowie für einige Sonderfälle angegeben.

Summary

A closed mathematical solution is given for the task of resection in space, using outlines of the terrain as control information. Calculation formulas are derived and the necessary number of points on the outlines is discussed for some configurations.

1. Einführung

Die Benutzung der Geländefläche in Form eines digitalen Geländemodells als Paßinformation bei photogrammetrischen Aufgabenstellungen wurde in letzter Zeit bereits öfters, besonders ausführlich aber in *Strunz [1992]* behandelt. Danach ist die Einpassung auf eine Fläche möglich und unter bestimmten Voraussetzungen auch wirkungsvoll für ein Bildpaar im Zuge der absoluten Orientierung oder für einen Bildverband im Rahmen der Aerotriangulation.

Die Einpassung eines Einzelbildes auf eine Fläche (Gelände) in Form des räumlichen Rückwärtsschnittes ist im allgemeinen ohne zusätzliche Paßinformationen nicht möglich. Ein Ausnahmefall ist jedoch dann gegeben, wenn, vom Aufnahmeort aus gesehen, Konturlinien des Geländes aufscheinen, d. h. Konturlinien sich in der Aufnahme abbilden. Das ist der Fall, wenn im Bezug zum Aufnahmeort sichtbare Räume vorhanden sind.

Konturlinien sind bekanntlich dadurch definiert, daß sie die von einem Standpunkt aus sichtbaren Teile des Geländes von den nicht sichtbaren trennen. Sie haben zusätzlich die Eigenschaft, daß der Sehstrahl dort das Gelände berührt. Das Auftreten

von Konturlinien ist weitgehend auf gebirgiges Gelände beschränkt. Sie kommen vereinzelt in stark geöffneten Luftaufnahmen (Überweitwinkelaufnahmen), sehr häufig jedoch in terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen vor.

In *Finsterwalder [1991]* wurde bereits die Möglichkeit angedeutet, den räumlichen Rückwärtsschnitt nach Konturlinien auszuführen. Im folgenden Beitrag soll diese Aufgabe eingehender behandelt werden, wobei direkte rechnerische Lösungen aufgezeigt und für verschiedene Sonderfälle die Minimalkonfigurationen angegeben werden.

2. Berechnungsverfahren und Minimalkonfigurationen

Zur Ableitung der Bestimmungsgleichungen soll die Geländefläche in der Form $z = f(x, y)$ gegeben sein; x_0, y_0, z_0 seien die gesuchten Koordinaten des Aufnahmeortes und x_i, y_i, z_i die Koordinaten von Geländepunkten auf den Konturlinien. Da die Konturlinien von der Lage des Aufnahmeortes und der Aufnahmerichtung abhängig sind, gelten die Koordinaten x_i, y_i ebenfalls als unbekannt, während die z -Koordinate durch die Geländefunktion $z_i = f(x_i, y_i)$ festgelegt wird.

Zur Bestimmung der Unbekannten x_0, y_0, z_0, x_i, y_i benutzt man zum einen die Bedingung, daß die Winkel zwischen den Strahlen des Aufnahmebündels bekannt sind (innere Orientierung der Aufnahme), und zum anderen die Tatsache, daß die Aufnahmestrahlen zu Konturlinien verlaufen, d. h. daß die die Geländefläche tangieren. Die erste Bedingung läßt sich, wie in *Finsterwalder [1991]* gezeigt wurde, recht einfach über den Kosinussatz im Dreieck OP_iP_{i+1} (Abb. 1) herleiten. Die zweite Bedingung besteht darin, daß der Aufnahmestrahle OP_i senkrecht auf der Flächennormalen im Konturlinienpunkt P_i stehen muß (im folgenden kurz als »Senkrechtbedingung« bezeichnet).

Für die Winkelbedingung gilt nach dem Kosinussatz:

$$(P_iP_{i+1})^2 - (OP_i)^2 - (OP_{i+1})^2 = 2 \cdot (OP_i) \cdot (OP_{i+1}) \cdot \cos \delta_i$$

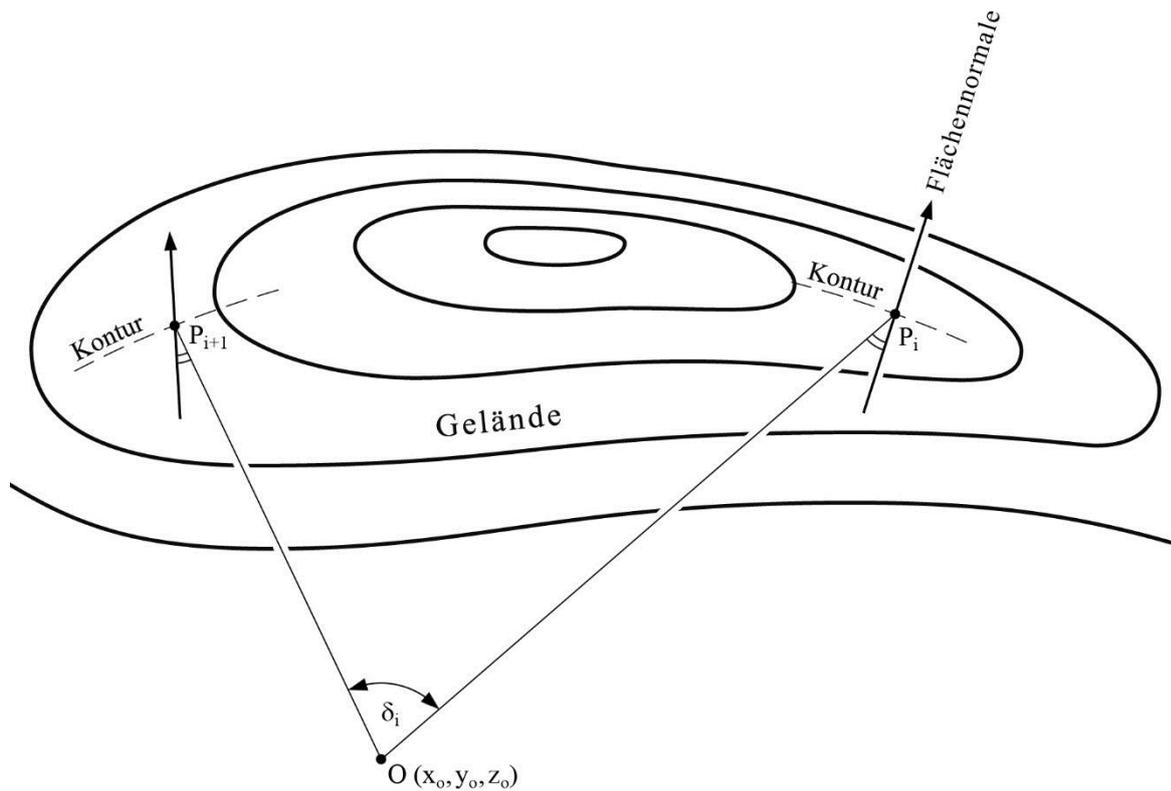


Abbildung 1

Berechnet man die Dreiecksseiten nach dem räumlichen Pythagorassatz aus Koordinatendifferenzen, so erhält man gemäß *Finsterwalder [1991]* die erste Bedingungsgleichung zu:

$$\begin{aligned} & (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2 - \\ & - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 - \\ & - (x_{i+1} - x_0)^2 - (y_{i+1} - y_0)^2 - (z_{i+1} - z_0)^2 = \\ & = 2 \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \cdot \\ & \cdot \sqrt{(x_{i+1} - x_0)^2 + (y_{i+1} - y_0)^2 + (z_{i+1} - z_0)^2} \cdot \\ & \cdot \cos \delta_i \end{aligned} \quad [1]$$

Für die Formulierung der zweiten Bedingung benötigt man die Gleichung der Geraden OP_i , welche lautet:

$$\frac{x - x_i}{x_0 - x_i} = \frac{y - y_i}{y_0 - y_i} = \frac{z - z_i}{z_0 - z_i}$$

bzw.

$$y = \frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i} \cdot x + \frac{y_i \cdot (x_0 - x_i) - x_i \cdot (y_0 - y_i)}{x_0 - x_i}$$

und

$$z = \frac{z_0 - z_i}{x_0 - x_i} \cdot x + \frac{z_i \cdot (x_0 - x_i) - x_i \cdot (z_0 - z_i)}{x_0 - x_i}$$

Die ebenfalls benötigte Gleichung für die Flächennormale in P_i lautet, wenn $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ deren Richtungskosinusse bedeuten:

$$\frac{x - x_i}{\cos \alpha} = \frac{y - y_i}{\cos \beta} = \frac{z - z_i}{\cos \gamma}$$

bzw.

$$y = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot x + \frac{y_i \cdot \cos \alpha - x_i \cdot \cos \beta}{\cos \alpha}$$

und

$$z = \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \cdot x + \frac{z_i \cdot \cos \alpha - x_i \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha}$$

Aus der Bedingung für das aufeinander Senkrechtstehen der beiden Geraden erhält man nach *Bürklen [1939]*:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot \frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i} + \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \cdot \frac{z_0 - z_i}{x_0 - x_i} + 1 = 0$$

bzw.

$$\cos \beta \cdot (y_0 - y_i) + \cos \gamma \cdot (z_0 - z_i) + \cos \alpha \cdot (x_0 - x_i) = 0 \quad [2]$$

Die beiden Bestimmungsgleichungen [1] und [2] enthalten als Unbekannte die Raumkoordinaten des Aufnahmeortes x_0, y_0, z_0 sowie die Lagekoordinaten der Konturlinienpunkte x_i, y_i ; z_i ist wiederum eine Funktion der Lagekoordinaten x_i, y_i ; ebenso hängen die Richtungskosinusse $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ über die Funktion $z_i = f(x_i, y_i)$ bzw. über die Ableitungen dieser Funktion von den Lagekoordinaten x_i, y_i ab.

Die Bestimmungsgleichungen für die Unbekannten sind nichtlineare Gleichungen und als solche nicht unmittelbar auflösbar. Bei Kenntnis von Näherungswerten für die Unbekannten kann in einem ersten Lösungsschritt die Gelände­fläche durch ihre Tangentialebene ersetzt werden. Dadurch wird die Gleichung [2] zwar linear, die Gleichung [1] hat aber immer noch den Grad vier, so daß hier zur Linearisierung eine Taylorentwicklung notwendig ist.

Minimalkonfigurationen

Es soll im folgenden untersucht werden, wieviele Konturlinienpunkte mindestens benötigt werden, um die gestellte Aufgabe, nämlich die Bestimmung des Aufnahmeortes, lösen zu können.

In den Bestimmungsgleichungen [1] und [2] treten als Unbekannte auf: die drei Raumkoordinaten des Aufnahmeortes und pro Konturlinienpunkt zwei Lagekoordinaten, also insgesamt $3 + 2i$ Unbekannte. An Bestimmungsgleichungen zur Berechnung dieser Unbekannten sind pro Konturlinienpunkt eine Senkrechtbedingung verfügbar sowie die Winkelbedingungen, deren Zahl noch zu bestimmen ist: da zwei Strahlen einen Winkel einschließen und die Angliederung jedes weiteren Strahles zwei zusätzliche Winkel erfordert, ergibt sich die Anzahl der Winkelbedingungen zu $1 + 2(i - 2) = 2i - 3$. Fügt man noch die Senkrechtbedingungen hinzu, so lautet die Gesamtzahl der Bedingungen: $2i - 3 + i = 3i - 3$. Die Minimalkonfiguration ergibt sich, wenn die Anzahl der Bedingungsgleichungen identisch mit der Anzahl der Unbekannten ist. Die Zahl der benötigten Konturlinienpunkte ergibt sich somit aus der ganzzahligen Lösung der Gleichung:

$$3i - 3 = 3 + 2i \quad [3]$$

Die Gleichung ist mit $i = 6$ erfüllt, so daß mindestens sechs Konturlinienpunkte benötigt werden. Dieselbe Anzahl von Punkten wird nach *Finstertalder [1991]* auch benötigt, wenn an Stelle von Konturlinien andere Paßlinien treten. Konturlinien können somit äquivalent mit anderen Paßlinien angesehen werden.

Dementsprechend sind auch die Minimalkonfigurationen bei der kombinierten Verwendung von

Konturlinien und Vollpaßlinien [*Finstertalder, 1991*] identisch: bei Benutzung von 1 Paßpunkt werden mindestens 4 Kontur- oder andere Paßlinienpunkte benötigt und bei Verwendung von 2 Vollpaßpunkten 2 Konturlinien- oder andere Paßlinienpunkte.

3. Sonderfälle

Das Auftreten von Konturlinien in Luftaufnahmen ist, wie bereits eingangs erwähnt, verhältnismäßig selten und beschränkt sich auf Überweitwinkel­aufnahmen im Gebirge. Dagegen sind Konturlinien in terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen im Gebirge recht häufig anzutreffen. Die praktische Anwendung des beschriebenen Einpaßverfahrens nach Konturlinien ist deshalb meist auf solche Aufnahmen beschränkt. Die Notwendigkeit, eine Einzelaufnahme einzupassen, ist vor allem beim sog. »Monoplotting« gegeben, insbesondere, wenn für ältere Aufnahme der oft unbekannt Aufnahmeort zu bestimmen ist.

Fall 1: Der Aufnahmeort liegt auf dem Gelände

Damit ist der allgemeine Fall der terrestrischen Photogrammetrie gemeint. (Die Aussage, *der Aufnahmeort liegt auf dem Gelände*, soll natürlich auch dann gelten, wenn die Aufnahme, wie üblich, mit bekannter Höhe über dem Gelände gemacht wird. Als Gelände dient dann im Bereich des Aufnahmeortes die um die Instrumentenhöhe korrigierte Fläche.)

Wenn also der Aufnahmeort auf dem Gelände liegen soll, braucht eine Unbekannte, nämlich die Koordinate z_0 des Aufnahmeortes, weniger bestimmt zu werden. Sie ergibt sich nämlich aus der Beziehung $z_0 = f(x_0, y_0)$.

Für die Berechnung der Unbekannten dienen wieder die Gleichungen [1] und [2]. Da die Anzahl der Unbekannten nun eine kleinere wird, verringert sich auch die Zahl der notwendigen Konturlinienpunkte. Reduziert man auf der rechten Seite von Gleichung [3] die Zahl der Unbekannten um 1, so lautet die Gleichung zur Bestimmung der Minimalkonfiguration:

$$3i - 3 = 2 + 2i \quad [3a]$$

Da die Gleichung durch die Zahl 5 erfüllt ist, genügen nunmehr bereits 5 Konturlinienpunkte zur Bestimmung des Aufnahmeortes.

Wird 1 Vollpaßpunkt verwendet, genügen bereits 3 Konturlinienpunkte. Die Anzahl der Unbekannten beträgt dann 8 (1 Koordinatenpaar für den Aufnahmeort und 3 Koordinatenpaare für die Konturlinienpunkte), ebenso wie die Anzahl der Bestimmungsgleichungen (3 Senkrechtbedingungen bei den Konturlinienpunkten und 5 Winkelbedingungen bei 4 Strahlen).

Werden 2 Vollpaßpunkte verwendet, genügt bereits 1 Konturlinienpunkt. Die Anzahl der Unbekannten beträgt dann 4 (je 2 Lagekoordinaten des Aufnahmeortes und des Konturlinienpunktes), ebenso wie die Anzahl der Bestimmungsgleichungen (1 Senkrechtbedingung und 3 Winkelbedingungen bei insgesamt 3 Strahlen).

Fall 2: Terrestrische Aufnahmen mit vertikaler Bildebene

Da terrestrische Meßaufnahmen meist mit vertikaler Bildebene gemacht werden, ist es angebracht, diesen Fall etwas eingehender zu behandeln. Bei der Ableitung der Bestimmungsgleichungen ergibt sich eine gewisse Vereinfachung dadurch, daß die Winkelbedingung gemäß Gleichung [1] in zwei Bedingungen aufgespaltet werden kann, nämlich in eine Bedingung für die horizontale Komponente $\bar{\delta}$ des Winkels δ und in eine für die vertikale Komponente δ' . Beide Komponenten können den Meßbildern leicht entnommen werden.

Für den Vertikalwinkel lautet die Bedingungsgleichung:

$$\begin{aligned} \tan \delta'_i &= \frac{z_i - z_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}} \\ &= \frac{f(x_i, y_i) - f(x_0, y_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}} \end{aligned}$$

Die Bedingungsgleichungen für den Horizontalwinkel erhält man wieder über den Kosinussatz. Da das zu berechnende Dreieck nunmehr in einer Horizontalebene liegt, ergibt sich eine gegenüber Gleichung [1] etwas einfachere Beziehung:

$$\begin{aligned} (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 - (x_i - x_0)^2 - \\ - (y_i - y_0)^2 - (x_{i+1} - x_0)^2 - (y_{i+1} - y_0)^2 = \\ = 2 \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \cdot \\ \cdot \sqrt{(x_{i+1} - x_0)^2 + (y_{i+1} - y_0)^2} \cdot \cos \bar{\delta} \end{aligned}$$

Die Bedingungsgleichung [2], die das Senkrechtstehen der Aufnahmestrahlen auf den Flächennor-

malen in den Punkten der Konturlinien ausdrückt, bleibt hingegen unverändert.

Die Berechnung der Unbekannten x_0, y_0, x_i, y_i erfordert jedoch auch in diesem Fall eine Linearisierung bei Kenntnis von Näherungswerten. Die Anzahl der notwendigen Konturlinienpunkte ergibt sich wieder durch Gleichsetzen der Anzahl der Bedingungen und der Anzahl der Unbekannten. Die Anzahl der Unbekannten hat sich gegenüber Gleichung [3a] nicht verändert und beträgt $2 + 2i$. Die Anzahl der Vertikalwinkelbedingungen ist i , die der Horizontalwinkelbedingungen $i - 1$, was zusammen $i + i - 1 = 2i - 1$ Winkelbedingungen ergibt. Dazu kommen noch i Senkrechtbedingungen, so daß die Gesamtzahl der Bedingungsgleichungen $3i - 1$ beträgt. Die Mindestanzahl der benötigten Konturlinienpunkte ergibt sich somit aus der Gleichung: $3i - 1 = 2 + 2i$; sie wird durch $i = 3$ erfüllt, was bedeutet, daß zur Festlegung des Standortes drei Konturlinienpunkte genügen.

Verwendet man statt Paßlinien wieder einen Vollpaßpunkt, so reicht bereits ein zusätzlicher Konturlinienpunkt aus. Die Anzahl der Unbekannten beträgt dann nämlich 4 (jeweils 1 Koordinatenpaar für den Aufnahmeort und den Konturlinienpunkt) und ist gleich der Anzahl der Bedingungsgleichungen (2 Vertikalwinkelbedingungen, 1 Horizontalwinkelbedingung und 1 Senkrechtbedingung).

Werden zwei Vollpaßpunkte benutzt, entfallen die Paßlinien. Die Punktbestimmung ist dann bereits mit 2 Höhenwinkeln und 1 Horizontalwinkel möglich [Finsterwalder, 1968].

Schließlich sei als letzter Sonderfall noch erwähnt, daß auch die horizontale Aufnahmeorientierung als bekannt angenommen werden kann. Anstelle von Winkelbedingungen treten dann Richtungsbedingungen für jeden Aufnahmestrahle. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind in Finsterwalder [1992] abgeleitet. Als Minimalkonfiguration benötigt man zur Standortbestimmung für diesen Fall 2 Konturlinienpunkte. Die Anzahl der Unbekannten beträgt nämlich 6 (je 1 Koordinatenpaar für den Aufnahmeort und die 2 Konturlinienpunkte), die der Bestimmungsgleichungen ebenfalls 6 (2 Horizontalrichtungs-, 2 Vertikalwinkelbedingungen, 2 Senkrechtbedingungen).

Wird statt Paßlinien wieder ein Vollpaßpunkt benutzt, ist die Aufgabe der Punktbestimmung mit Hilfe dieses einen Punktes bereits lösbar. Die räumlich orientierte Richtung zum Festpunkt durchsetzt nämlich die Geländefläche in dem gesuchten Punkt.

Literatur

- Bürklen, O. Th. [1939]:* Mathematische Formelsammlung. Sammlung Göschen, Nr. 51, Verlag Walter de Gruyter, Berlin, 3. Auflage, 272 S.
- Finsterwalder, R. [1968]:* Eine Möglichkeit der trigonometrischen Höhenbestimmung. Zeitschrift für Vermessungswesen, 93. Jahrgang, Heft 3, Stuttgart, S. 99-104
- Finsterwalder, R. [1991]:* Zur Verwendung von Paßlinien bei photogrammetrischen Aufgaben. Zeitschrift für Vermessungswesen, 116. Jahrgang, Heft 2, Stuttgart, S. 60-66
- Finsterwalder, R. [1992]:* Zwei Sonderfälle des räumlichen Rückwärtsschnittes nach Paßlinien. Zeitschrift für Vermessungswesen, 117. Jahrgang, Heft 3, Stuttgart, S. 135-138
- Strunz, G. [1992]:* Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen. Doktordissertation. Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, München, 77 S.

Integration von GPS und GIS

Der digitale Datenfluß von der digitalen Felddaufnahme mittels GPS-Satellitenmessungen bis in das Geographische Informationssystem

Zusammenfassung

Herkömmliche terrestrische Methoden zur Erfassung positionsbezogener Daten für Geographische Informationssysteme (GIS) sind sehr zeit- und daher kostenintensiv. Optimale Möglichkeiten für eine effektive Aufnahme von Freilanddaten bieten Positionsbestimmungen mit Hilfe des Global Positioning System (GPS). Das Global Positioning System ist ein Satellitennavigationssystem, das absolute Positionsgenauigkeiten von 100 m mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erlaubt. Differential-GPS (DGPS) dagegen ermöglicht relative Positionsbestimmungen bis zu wenigen Zentimetern bei kinematischen Anwendungen. Die Kombination von GPS und GIS erlaubt einen digitalen Datenfluß von der Feldarbeit bis zur Aufbereitung der Daten. Mittels GPS-Empfänger und geeigneter Datenerfassungssoftware werden linien-, punkt- und flächenförmige Strukturen positionsbezogen und gleichzeitig mit den entsprechend zugeordneten Sachattributen digital erfaßt. In diesem Artikel werden der Aufbau und die Voraussetzungen für einen digitalen GPS/GIS Datenfluß beschrieben. Des Weiteren werden die Eigenschaften der am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Universität der Bundeswehr München entwickelten bedienungsfreundlichen Datenerfassungs- und Auswertesoftware dargestellt. An Hand von Beispielen durchgeführter Testmessungen im Nationalpark Berchtesgaden wird die Funktionalität des gesamten Systems erläutert.

Summary

Traditional terrestrial methods for the recovery of attribute-referred position data for Geographical Information Systems (GIS) are very time-consuming and consequently, expensive. Optimal possibilities for the economical collection of field data are provided by the positioning techniques using the Global Positioning System (GPS). The Global Positioning System is a satellite navigation system which provides absolute positions with an accuracy of 100 m with a confidence level of 95%.

Differential GPS (DGPS) is moreover providing relative positioning in kinematic mode down to the centimeter level. The combination of GPS and GIS is able to offer a complete digital flow from the field to the processing of the data (within the GIS). Using a GPS receiver and a suitable data logging software line, point and areawise structures are gathered (with respect to their positions) together with the corresponding attributes digitally. In this paper prerequisites and the set-up of such a complete digital data flow are described. In addition, the system as it was developed at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy (IAPG) of the University FAF Munich is presented which provides a comfortable, user-friendly menu-driven data logging and analysis software. The functionality of the system is demonstrated using examples of test measurements in the Berchtesgaden National Park of Bavaria.

1. Einführung

Geographische Informationssysteme (GIS) – eine Verknüpfung geographischer Daten mit textlichen Informationen – ermöglichen auf Grund höchst leistungsfähiger Datenbanken, große Mengen von Daten zu verwalten und Beziehungen zwischen verschiedenen kombinierbaren Datentypen herzustellen. Der Aufbau und auch die Weiterführung solcher Datengrundlagen erfordert stets, Daten in der Natur zu erheben und diese weiter zu verarbeiten. Vergleicht man entstehende Kosten bezüglich der Anschaffung von Hardware, Software und Datenmaterial, so liegt der kostenintensivste Faktor eindeutig bei der Erfassung der Daten.

Für die auf geometrischen Zusammenhängen basierenden Daten von Geographischen Informationssystemen werden in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten sachbezogene Merkmale erhoben und diese bestimmten Positionen zugeordnet. Einige dieser Anwendungsgebiete können zum Beispiel sein:

- Aufnahme von geophysikalischen Meßdaten
- Einmessen von Gesteinsproben

- Aufnahme von Hinweistafeln auf Straßen
- Einmessen von Vegetations- und Kulturgrenzen
- Aktualisierung von Waldrändern und Wegen
- Aufnahme von Mülldeponien und wilden Lagerstätten

Bisher gebräuchliche Methoden für die Aufnahme und die weitere digitale Aufbereitung positionsbezogener Freilanddaten sind sehr zeit- und daher kostenintensiv. Auf vorhandenen Karten wird der ungefähre Standort eingezeichnet, die sachbezogenen Merkmale werden aufgeschrieben oder auf Tonbänder gesprochen. Diese im Feld aufgenommenen Daten werden dann im Anschluß mühsam eingetippt und mit den zuvor digitalisierten Karten verknüpft. Ein effektiver Betrieb eines GIS kann nur dann durchgeführt werden, wenn große Datenmengen schnell und ohne großen Personalaufwand erfaßt werden.

Die optimale Lösung hierfür liefert die Kombination von Positionsbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems (GPS) und einer digitalen Attributaufnahme. Kinematische GPS Anwendungen ermöglichen eine kontinuierliche Aufnahme von punkt-, linien- und flächenbezogenen Positionsdaten. Verbindet man diese mit den zugehörigen digital aufbereiteten, sachbezogenen Merkmalen, so erhält man einen digitalen Datenfluß von der Aufnahme bis zur Datenaufbereitung im GIS.

2. Grundlagen von GPS und DGPS

Das NAVSTAR GPS (NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System) ist ein satellitengestütztes Navigationssystem, das für entsprechend ausgerüstete Nutzer genaue dreidimensionale Positions-, Navigations- und Zeitinformationen bereitstellt. Das System ist auf weltweiter Basis kontinuierlich und unabhängig von meteorologischen Bedingungen verfügbar.

Raumsegment

Nach vollem Ausbau wird das System aus 24 Satelliten (21 + 3 Reservesatelliten) in 6 Bahnebenen bestehen, die eine Neigung von 55° zum Äquator aufweisen. Diese Bahnen sind annähernd kreisförmig bei einer nominellen Höhe von ca. 20 200 km, woraus eine Umlaufzeit von 12 Stunden (Sternzeit) resultiert. Als Konsequenz wiederholt sich eine Konstellation jeden Tag, jedoch mit Bezug auf die Weltzeit um 4 Minuten früher.

Satellitensignale

Die Satelliten benutzen zwei Frequenzen im Gigahertzbereich: L1 mit einer Frequenz von 1575.42 MHz und L2 mit 1227.6 MHz. Auf diese Träger werden zwei »Pseudo-random-noise« Codes aufmoduliert: Der Coarse Acquisition (C/A) Code und der Precise (P) Code. Eine C/A Code Modulation erfolgt nur für die L1 Frequenz, während der P Code auf beiden Frequenzen verfügbar ist. Auf diesen Codes basieren der sogenannte Standard Positioning Service (SPS) und der Precise Positioning Service (PPS). Navigations- und Systemdaten (Message) sind ebenfalls in beiden Frequenzen enthalten. Sie werden mit einer Datenrate von 50 Bits pro Sekunde übermittelt. Diese Ephemeridaten, auch als »Broadcast Ephemeris« bezeichnet, werden jede Stunde erneuert.

Meßverfahren

Bei NAVSTAR-GPS handelt es sich um ein Einweg-Meßverfahren, bei dem vier Beobachtungsgrößen unterschieden werden:

- Pseudoentfernungen aus Codemessungen
- Pseudoentfernungsdifferenzen aus integriertem Dopplercount
- Trägerphasen oder Trägerphasendifferenzen

In der Praxis werden in erster Linie Messungen der Codephasen (Laufzeitmessung) und der Trägerphasen genutzt, die beide als Beobachtungen von Pseudoentfernungen betrachtet werden können. Wesentliche Beobachtungsgröße dafür ist die Laufzeit eines Signals von der Satelliten- zur Empfangsantenne, die über die Signalausbreitungsgeschwindigkeit in eine Entfernung umgewandelt wird.

Bei der Laufzeitmessung ρ_j^i wird die den Träger-Signalen aufmodulierte Codeinformation über ein Korrelationsverfahren mit dem identisch im Empfänger generierten Signal verglichen. Die Zeitverschiebung Δt , die zwischen beiden Signalen liegt, ist ein Maß für die Laufzeit des Signals vom Satelliten zum Empfänger. Die der Zeit Δt entsprechende Wegstrecke ist nur näherungsweise gleich dem geometrischen Abstand zwischen Satellit und Empfänger, da die Fehler von Satelliten- und Empfängeruhren in die Größe Δt eingehen. Aus diesem Grund spricht man auch von Pseudoentfernungen oder »pseudorange«. Für die Bestimmung von dreidimensionalen Positionen sind vier Entfernungsmessungen notwendig, da neben den drei Positionskordinaten (X, Y, Z) auch die Differenz zwischen Satellitenuhr und Empfängeruhr zu bestimmen ist.

Als weitere wichtige Beobachtungsgröße sind die Trägerphasen ψ zu nennen. Diese Trägerfrequenzen liegen im L-Band (Mikrowellen) und werden deshalb auch als L1- und L2-Frequenz bezeichnet. Codephasen- und Trägerphasenmessungen führen zu gleichen Beobachtungsgrößen, den Pseudoentfernungen zwischen der Beobachterantenne und einer bestimmten Zahl (meist vier) von Satelliten. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Beobachtungstypen ist die Mehrdeutigkeit N_j^i . Da die Beobachtungsgröße nur die Auflösung innerhalb einer Wellenlänge angibt, müssen die Vielfachen N_j^i durch geeignete Methoden bestimmt werden.

Positionsgenauigkeit

Mittels GPS können Positionen mit einer Genauigkeit von ca. 100 m, aber auch im Zentimeterbereich bestimmt werden. Die erreichbare Genauigkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab, die in drei Hauptgruppen unterteilt werden können:

- Geometrische Satellitenkonfiguration der für die Positionsbestimmung benutzten Satelliten
- Genauigkeit der einzelnen Messungen zum Satelliten
- Künstliche Verschlechterung der Genauigkeit des GPS-Systems durch das Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten von Amerika.

Der Einfluß der Satellitenkonfiguration auf die Positionsgenauigkeit wird durch einen bestimmten Wert, der als Dilution of Precision (DOP) bezeichnet wird, ausgedrückt. Dieser ist auf Grund der sich ständig ändernden Satellitenpositionen zeitlich abhängig und bezieht sich außerdem auf den jeweiligen Beobachtungsort. Der lineare Zusammenhang zwischen Positionsgenauigkeit (σ_{pos}), der geometrischen Konfiguration der Satelliten (DOP) und der einzelnen Laufzeitmessungen (σ_r) wird beschrieben durch

$$\sigma_{\text{pos}} = \text{DOP} * \sigma_r .$$

Daraus ist leicht erkennbar, daß eine schlechte Satellitenkonfiguration, die sich in einem hohen DOP Wert äußert, zu großen Unsicherheiten in der Positionsgenauigkeit führt. Großen Einfluß hat dies bei kinematischen Anwendungen, bei denen Positionen, unabhängig voneinander, jeweils jede Epoche bestimmt werden.

Die genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren bezüglich der Messungen zu den Satelliten, auch als »user equivalent range error« bezeichnet, ergeben sich aus der Kombination einzelner unterschiedlicher Fehlereinflüsse:

- Laufzeitfehler auf Grund der Ausbreitung des Satellitensignals durch die verschiedenen Schichten

der Erdatmosphäre (Ionosphäre, Troposphäre)

- Phasenfehler, die durch ein reflektiertes Umwegsignal (Mehrwegausbreitung) erzeugt werden
- Uhrenfehler, insbesondere jene der Empfangseinheiten
- Signalrauschverhältnis der GPS Signale, abhängig von der jeweiligen Beobachtungsgröße (siehe Tab. 1) und von unterschiedlicher Empfängerhardware.

Vom Betreiber des GPS-Systems, dem US-Verteidigungsministerium, werden zwei unterschiedliche Methoden angewandt, um die Genauigkeit des Systems künstlich zu verschlechtern. In Zukunft ist die theoretisch erreichbare C/A-Code Absolutgenauigkeit in Echtzeit von 20-30 m für zivile Anwender nicht mehr erreichbar. Mittels Aktivierung der Selective Availability (S/A) werden die Satellitenuhren manipuliert, wodurch dieser Fehler direkt über die Laufzeitmessung in die Positionsbestimmung transformiert wird. Außerdem werden die Satellitenbahndaten verfälscht und in die Broadcast-Informationen der Satelliten eingespeist. Folge dieser beiden Manipulationen ist, daß sowohl Laufzeit- als auch Phasenmessungen von der Genauigkeitsverschlechterung betroffen sind. Die zweite Methode, Antispoofing (A/S) genannt, basiert auf der Verschlüsselung des präzisen P-Codes und der gleichzeitigen Implementierung des Y-Codes, der in Zukunft nur autorisierten militärischen Nutzern zugänglich sein wird.

Absolute Einzelpunktbestimmungen, die mit allen eben angeführten Fehlereinflüssen behaftet sind, können mit einer Lagegenauigkeit von 100 m (Konfidenzniveau 95 %) angegeben werden.

Dabei bewirken die

- Satellitenuhren ca. 30 m
- Ephemeriden ca. 50 m
- Ionosphäre bis zu 30 m

Positionsgenauigkeit.

Mit Hilfe von Differenzbildung zwischen einer Referenzstation und dem mobilen Nutzer können die genauigkeitsbeeinflussenden Effekte größtenteils minimiert oder sogar eliminiert werden.

So werden bei der Positionsbestimmung zwischen zwei oder mehreren Stationen die Fehlereinflüsse

- der Satellitenuhren auf ca 2 ppm,
- der Ephemeriden auf ca. 2-3 ppm und
- der Ionosphäre bis ca. 3 ppm

herabgesetzt und

– die Empfängeruhrenfehler
größtenteils beseitigt.

Das Meßrauschen der jeweiligen Empfangseinheiten hängt sowohl von den verschiedenen Beobachtungsgrößen, als auch von der Empfängerhardware ab. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beobachtungsgrößen können in Abhängigkeit des Signalrauschverhaltens der Empfangseinheit folgende (theoretische) Positionsgenauigkeiten angegeben werden.

Tab. 1: Fehlerfortpflanzung des Beobachtungsrauschens (Position Dilution of Precision PDOP = 3)

Beobachtung	Rauschen	Positionsfehler
C/A-Code	2 ... 5 m	6 ... 15 m
P-Code	0.05 ... 0.5 m	0.15 ... 1.5 m
Y1-Y2-Code	0.5 ... 2 m	1.5 ... 6 m
Trägerphase	1 mm	3 mm

Da die erreichbare Genauigkeit bei der Positionsbestimmung von den jeweiligen meßbaren Beobachtungsgrößen und deren Güte abhängt, besteht ein enger Zusammenhang zwischen GPS-Empfängerhardware und der erreichbaren Genauigkeit. Das heißt, je höher die Genauigkeitsansprüche sind, desto höher ist der Preis, der für hochpräzise Empfängertechnologie zu bezahlen ist.

Die Genauigkeitsanforderung an Koordinaten für Geographischen Informationssysteme liegt in der Regel im Bereich von 1-5 m, die im kontinuierlichen Aufnahmemodus, sprich mittels kinematischer Verfahren, erreicht werden müssen. Diesen Anforderungen wird man mit Differential-GPS (DGPS) unter Verwendung von »Phasengeglätteten Pseudoranges« gerecht. Während Differenzbildungen von Laufzeitmessungen zu Genauigkeiten von 5-16 m führen (siehe Tab. 1), kann durch Anbringen von Verbesserungen auf Grund von Phasenmessungen an reine Laufzeitmessungen das Meßrauschen der Beobachtungsgrößen und der Effekt der Mehrwegausbreitung vermindert werden und es können so präzisere Positionierungsergebnisse erlangt werden.

3. Digitaler Datenfluß GPS - GIS

Das Konzept eines digitalen Datenflusses, ausgehend von der Erhebung der Freilanddaten bis zur Darstellung dieser Daten im GIS, kann folgendermaßen aufgebaut sein (Abb. 1):

Mit Hilfe eines GPS-Empfängers werden Satellitenrohdaten gemessen und in einem dafür vorgesehenen Datenlogger aufgezeichnet. Gleichzeitig können auf ausgewählten Punkten sachbezogene Attribute eingegeben werden. Die Arbeit erfolgt kontinuierlich mittels kinematischer Positionsbestimmung, d.h. es ist keine Verweildauer auf den Punkten notwendig.

Für Genauigkeitsanforderungen < 100 m muß zusätzlich zu dem GPS-Empfänger im Feld ein zweiter sogenannter Referenzempfänger stationär aufgebaut sein. Mittels geeigneter Software werden die im Feld aufgenommenen GPS-Rohdaten mit jenen der Referenzstation gemeinsam nachbearbeitet. Als Ergebnis erhält man flächen-, linien-, punktbezogene Koordinatendateien und Attributdateien, die online in das GIS gespielt und dort auf Grund gemeinsamer USER ID's (UID) miteinander verknüpft werden.

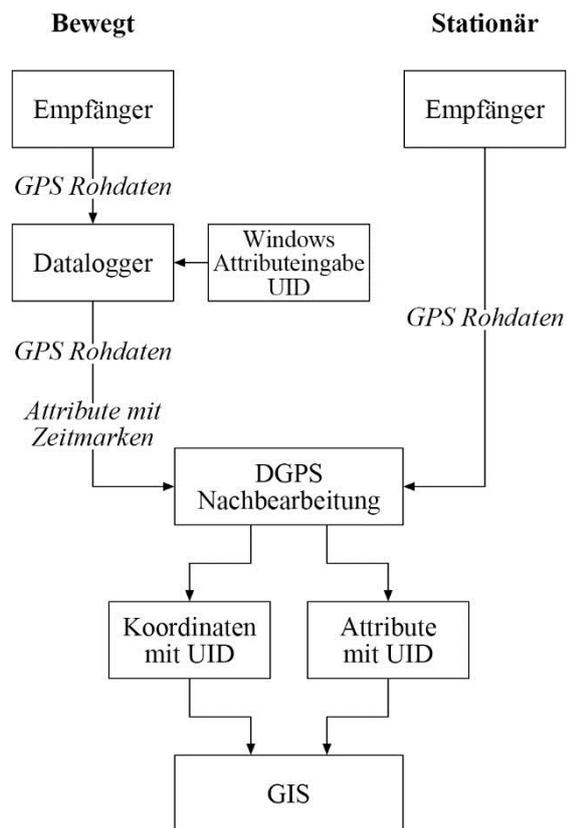


Abb. 1: DGPS/GIS Datenfluß (Post-mission)

Stehen Einrichtungen von Telemetrieanlagen zur Verfügung, so können mittels Datenübertragung von der Referenzstation zu den Feldeinheiten Auswertungen in Echtzeit erfolgen (Abb. 2). Diese Echtzeitpositionen dienen mit Unterstützung von

digitalen Karten zur Orientierungshilfe oder auch zum Aufsuchen bestimmter, positionsbekannter Punkte. Die erhaltenen Koordinaten- und Attributdateien werden ohne Nachbearbeitung im Büro direkt im GIS weiterbehandelt.

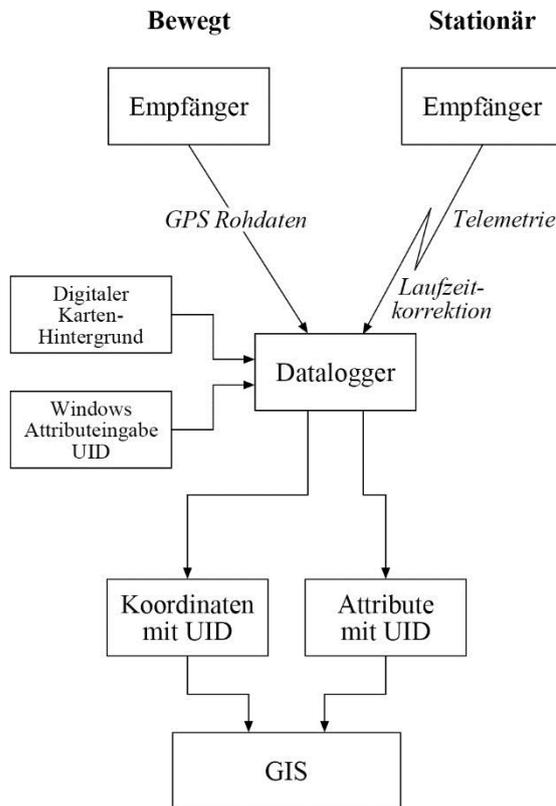


Abb. 2: DGPS/GIS Datenfluß – Echtzeitanwendung

GPS- GIS Feldausrüstung

Die Ausrüstung für die Erfassung von Freilanddaten muß einen effektiven und komfortablen Einsatz im Feld gewährleisten. Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz des GPS/GIS Systems für Datenaufnahmen mit schnell bewegten Trägern (Auto, Schiff, Flugzeug) oder zu Fuß ist ein System, das leicht zu bedienen und von geringem Gewicht ist. Die richtige Auswahl geeigneter GPS Hardware für GIS Anwendungen ist von den jeweiligen Ansprüchen an die Positionsgenauigkeit abhängig.

Ein besonderes Augenmerk sollte auf die Eingabemöglichkeit der sachbezogenen Attribute gelegt werden. Ein übersichtlicher und benutzerfreundlicher Aufbau mit gleichzeitig kontinuierlicher Registrierung der GPS Daten ist notwendig, um die Arbeit schnell und ohne Unterbrechung durchführen zu können.

Referenzstation

Auf der Referenzstation werden jene Daten aufgenommen, die zur Differenzenbildung mit den Feld-einheiten verwendet werden. Die Positionsergebnisse liegen somit als Raumvektoren zwischen der Referenzstation und den zu bestimmenden Freilandpunkten vor. Um absolute Koordinaten zu erhalten, ist Voraussetzung, daß die Position der Referenzstation im Koordinatensystem des WGS 84 Ellipsoides bekannt ist.

Vergleicht man zur Zeit am Markt erhältliche GPS/GIS Einheiten, so zeigt sich, daß die Koordinatenbestimmung meist auf absoluter Echtzeitpositionierung basiert, bei der Genauigkeiten von ca. 100 m (wenn S/A eingeschaltet ist) erwartet werden können. Die Eingabe der sachbezogenen Attribute in die Datenaufnahmegerate wird im allgemeinen mittels sehr kleiner und daher unübersichtlicher Eingabefenster oder mittels numerischer Codeeingaben ermöglicht.

Um den Anforderungen an eine effektive, kontinuierliche und leicht bedienbare Aufnahmemöglichkeit von positionsbezogenen Sachdaten im Genauigkeitsbereich von ca. 2.5 m gerecht zu werden, wurde vom Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Universität der Bundeswehr München eine DGPS/GIS Datenerfassungs- und Auswertesoftware mit den folgenden Eigenschaften entwickelt:

- Empfängerunabhängig
- Menügesteuerte Eingabemöglichkeit der verschiedenen Attribute ohne Unterbrechung der GPS Messung
- Vollautomatische Aufzeichnung der GPS-Daten aller verfügbaren Satelliten, ohne eine bestimmte Auswahl im voraus treffen zu müssen
- Akustische Warnsignale, falls die Anzahl der zur Positionsbestimmung notwendigen Anzahl von vier Satelliten nicht vorhanden ist und falls eine ungünstige Satellitengeometrie besteht (DOP Wert sehr hoch)
- Synchronisation der GPS-Daten und der positionsbezogenen Attribute mittels Zeitmarken
- Einsatz von differentiellen, phasengeglätteten Laufzeitmessungen, wodurch Genauigkeiten von 1-3 m erreicht werden
- Transformation der Koordinaten in das System der Landesvermessung auf Grund vorher bestimmter Transformationsparameter
- Datenaufbereitung für die GIS Software Arc Info, womit ein vollkommen automatischer digitaler Datenfluß gewährleistet ist.

4. Erzielte Ergebnisse

Zur Erprobung der Methode der digitalen Erfassung von Freilanddaten für Geographische Informationssysteme mittels GPS wurden gemeinsam mit der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden mehrere Testmessungen im Vorfeld des Nationalparks durchgeführt. Dabei wurde die Einsatzmöglichkeit des Systems bei der Aufnahme von linearen, flächenhaften und punktuellen Elementen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geländestrukturen und Waldtypen getestet.

Die Ausrüstung bestand aus einem Einfrequenz GPS-Empfänger (TerraNav 2000) und einem sehr leichten Mini Laptop als Datenerfassungsgerät. Die Testmessungen wurden zu Fuß unternommen. Zu diesem Zweck wurde die Ausrüstung in einem Rucksack verstaut und die Empfangsantenne an einem im Rucksack integrierten Stab befestigt.

Die Ergebnisse der entlang von Wegen und Straßen durchgeführten kontinuierlichen Datenerfassung wurden im Anschluß mit bereits im GIS der Nationalparkverwaltung vorhandenen Daten verglichen und die erreichte Positionsgenauigkeit analysiert. Beispiele für den Vergleich der GPS Positionen und der photogrammetrisch erstellten Daten sind in den Abbildungen 3-4 zu sehen. In Abb. 3 werden die aus GPS-Messungen erhaltenen Positionen in Form einer schwarzen Linie dargestellt. Die weißen Linien ergaben sich aus den bereits vorhandenen Daten.

In Gebieten ohne Signalabschattungen können Genauigkeiten von 2.5 m festgestellt werden. Sogar im relativ dichten Nadelwald konnten Positionsbestimmungen durchgeführt werden, jedoch mit einer verminderten Genauigkeit. Diese ist dadurch begründet, daß nicht ausreichend genug Daten für eine Phasenglättung der Laufzeitmessungen vorhanden sind.

Die Erfahrung zeigte, daß speziell in Waldregionen GPS Sensoren mit schneller Akquisition verwendet werden müssen, um nach Signalverlust in kurzer Zeit erneut Daten empfangen zu können. Auch die akustischen Warnsignale erwiesen sich unter dieser Bedingung als sehr nützlich. Auf diese Weise aufmerksam gemacht, war in den meisten Fälle nur eine kleine Änderung der Position der Antenne notwendig, um ausreichend viele Satelliten aufzeichnen zu können.

Zur Analyse der Wiederholgenauigkeit der GPS-Positionierungen wurde eine bestimmte Strecke in mehreren voneinander unabhängigen Messungen erfaßt (a, b, c in Abb. 4). Die maximale Klaffung

zwischen den verschiedenen Aufnahmen liegt bei 6 m. Berücksichtigt man die Tatsache, daß nicht jedesmal exakt derselbe Wegverlauf aufgenommen wurde (die Positionserfassung fand einmal am linken und an anderes Mal am rechten Wegrand statt), so kann die Wiederholgenauigkeit im Bereich von 1-3 m festgestellt werden. Die in Abb. 4 erkennbare Abweichung der weißen Linie, also der bereits vorhandenen Daten, von den GPS Positionen ist dadurch erklärbar, daß die vorhergegangene Digitalisierung mit dem Naturzustand nicht übereinstimmt.

5. Zusammenfassung

Die Resultate der Testmessungen bestätigen den erfolgreichen Einsatz des digitalen GPS/GIS Datenflusses sowohl im freien Gelände als auch in schwierigen Gebieten, wie in Schluchten, im Nadelwald, im schneebedeckten Laubwald und in Siedlungsgebieten. Anwendungsbereiche liegen sowohl bei Neuaufnahmen von Freilanddaten als auch bei Verifizierungen bereits vorhandener digitaler Datenstrukturen.

Um den Anforderungen an ein effektives Datenerfassungssystem gerecht zu werden, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden. Nur einfach bedienbare, vom Gewicht her leichte, transportable Hardware und übersichtliche, menügesteuerte Attribut-Eingabeoptionen ermöglichen dem Nutzer, sich auf die Beobachtungen der sachbezogenen Merkmale zu konzentrieren. Während der jeweilige Spezialist (Zoologe, Biologe, Geologe, etc.) bestimmte Ereignisse beobachtet bzw. untersucht und diesbezügliche Sachdaten eingibt, muß die Aufzeichnung der GPS-Daten automatisch und ohne Unterbrechung vor sich gehen. Die Verwendung von graphischen Tablettts (sog. »notepads« mit digitalen Hintergrundkarten) im Feld, auf denen die unmittelbare Position angezeigt wird, erhöht den Bedienungskomfort und gewährleistet eine bessere Orientierung im Feld.

Mittels Telemetrieanlagen, die Laufzeitkorrekturen von Referenzstationen aussenden, können in den Feldeinheiten Positionen auf 1-3 m angezeigt und die Koordinaten- und Attributdateien sofort in GIS-spezifische Formate aufbereitet werden.

Ermöglicht das Datenerfassungssystem, zusätzlich digitale Daten von externen Meßeinheiten zu verarbeiten, sind der Einsatzmöglichkeit des digitalen GPS/GIS Datenflusses zur Aufnahme und Zuordnung von Daten keine Grenzen gesetzt. Dieses System wird in Zukunft große Bedeutung haben.



Abb. 3: GPS-Wegaufnahme

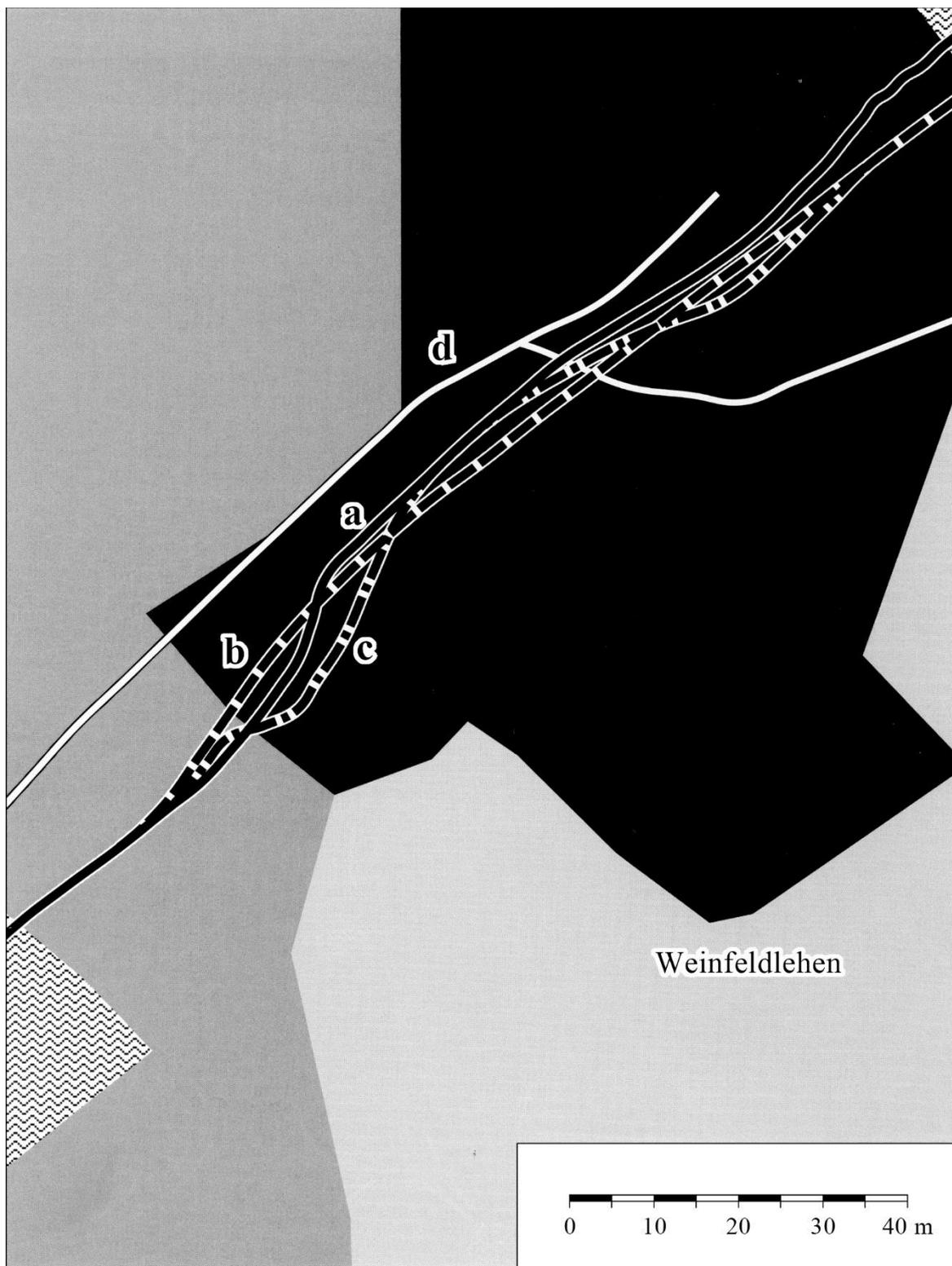


Abb. 4: Wiederholte GPS–Wegaufnahmen

Dank

Die Arbeiten zu diesem Projekt sowie die Konzepterstellung zu dieser Veröffentlichung wurden

im wesentlichen durch Frau Dipl.-Ing, Elke Achleitner ausgeführt. Das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Umweltfragen förderte die beschriebenen Entwicklungen durch das

Forschungsprojekt »Digitale Erfassung von Lagekoordinaten durch Satellitendaten und Zuordnung von Sachdaten«. Gedankt sei auch Herrn Dipl.-Biol. Franz von der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden für die Unterstützung und Praxiserprobung des Systems.

Literatur

- Achleitner, E., Hein, G. W., Franz, H., Helfrich, R. [1993]:* Receiver-Independent Sophisticated DGPS/GIS Data Logging and Analysis Software. Proceedings of the 3rd International GPS/GIS Conference, Seattle, Washington, June 21-22, 1993
- ESRI Inc. [1991a]:* ARC Command References. ARC/INFO Users Guide, Redlands, CA, Juli 1991
- ESRI Inc. [1991b]:* ARC/INFO Data Model, Concepts & Key Terms. ARC/INFO Users Guide, Redlands, CA, Oktober 1991
- Goad, C. C. [1990]:* Optimal Filtering of Pseudoranges and Phases from Single-Frequency GPS Receivers. The Journal of Navigation, Vol. 37, Oxford, pp. 249-262
- Hatch, R. [1982]:* The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. Proceedings of the 3rd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, NM., February 8-12, 1982. Defense Mapping Agency, National Ocean Survey, Rockville, MD., pp. 1213-1231
- Hein, G. W., Baustert, G., Landau, H. [1989]:* On the Use of GPS in Airborne Photogrammetry, Hydrographic Application and Kinematic Surveying. Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, NM., March 13-17, 1989. National Geographic Survey, National Oceanographic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.
- Hein, G. W., Baustert, G., Landau, H. [1990]:* Recent Results in High Precision Kinematic GPS Positioning. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 2, Brüssel, S. 85-93
- Hein, G. W., Basker, G. A., Casewell, I. E., Landau, H., Forsell, B., Hakegard, O. K., Steciw, A. [1993]:* A Wide Area Differential GPS Using Code and Carrier Phase Observations. Proceedings of the 2nd International Symposium on Differential Satellite Navigation Systems (DSNS 93), Amsterdam, March 29-April 2, 1993. Netherlands Institute of Navigations, Amsterdam
- Hein, G. W. [1993]:* Advances in GPS at the University FAF Munich: Towards a Real-Time DGPS Surveying and Navigation System. Lecture notes. »Metodi e Procedure a Vanzante di Modellizzazione e Trattamento dei Dati GPS«, Udine, Italy, April 1993. International Centre for Mechanical Sciences, Department of Structural Engineering and Geotechnics, Udine, pp. 111-136
- Hein, G. W., Achleitner, E., Luttenberger, Ch. [1993]:* Digitale Erfassung von Lagekoordinaten durch Satellitendaten und Zuordnung von Sachdaten. Abschlußbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, Juni 1993, 85 S.
- Landau, H. [1988]:* Zur Nutzung des Global Positioning Systems für Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. Dissertationsschrift. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Heft 36, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 284 S.

Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code

Zusammenfassung

Das erste digitale Nivelliersystem, das Wild NA 2000 mit der Code-Latte GPCL2/3, wurde im Jahre 1990 von der Firma Leica der Fachwelt vorgestellt. Das neuartige Meßverfahren zur digitalen Ablesung an einer codierten Latte erfordert neue Überlegungen zur Lattenkalibrierung. Nicht nur die Latte repräsentiert die Maßverkörperung, sondern das gesamte Meßsystem zur digitalen Auswertung trägt hierzu bei. Vorschläge zu diesem Kalibrierproblem werden diskutiert und numerische Ergebnisse erläutert. Weiterhin wird der Aufbau eines kostengünstigen Systems zur automatisierten Erfassung des Strichcodes mitgeteilt.

Summary

The first digital levelling system was introduced by Leica in 1990. The measuring system consisted of the levelling instrument Wild NA 2000 and a new coded invarstaff GPCL2/3. The procedure of the automated digital reading by using coded staffs requires new considerations to the calibration process. Both, the levelling rod and the opto-electronic system for the digital evaluation represents the embodiment of measure. Different approaches to solve this calibration problem as well as numerical results are discussed. Furthermore the composition of a low-cost scanning system for the detection of code lines is reported.

1. Einführung und Problemstellung

Mit der Automatisierung des geometrischen Nivellements, die erstmals von der Firma Leica mit dem Digitalnivellier Wild NA 2000 im Jahre 1990 [Ingensand, 1990] vollzogen wurde, sind auch die herkömmlichen Präzisions-Invarlatten mit metrischer Strichteilung durch Invar-Codelatten ersetzt worden. Nachdem jetzt andere Firmen ähnliche Wege zur Digitalisierung der Lattenablesung beim Nivellement beschritten haben, scheint sich zu-

künftig diese instrumentelle Entwicklung in der Praxis durchzusetzen. Verbunden hiermit ist aber auch, daß es dann keine einheitliche Nivellierlatte mehr geben wird: Jede Firma verwendet nämlich einen speziellen, unterschiedlichen Lattencode, dessen Bildausschnitt durch eine CCD-Zeile nach verschiedenen Verfahren der Signalverarbeitung elektronisch digitalisiert wird. Dadurch wird die frühere visuelle Höhenablesung des Beobachters, die einer bestimmten Strichlage zugeordnet werden konnte, durch einen automatisierten Meßvorgang ersetzt, der im allgemeinen nicht mehr nachvollzogen werden kann. Um so wichtiger werden deshalb, besonders in der Einführungsphase neuer Geräte, Untersuchungen zur Richtigkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Über das o. a. Meßsystem von Leica wurde bereits in mehreren Veröffentlichungen berichtet (z. B. [Schauerte, 1991; Ingensand, Maurer, Schauerte, 1992]), wobei u. a. auch die hohe Laborgenauigkeit und Auflösung dieses Meßsystems bestätigt wurde: Beim Wild NA 3000 liegt die Wiederholstandardabweichung bei $\sigma_r = 0.02$ mm.

Die Meßgenauigkeit wird nicht nur durch die systematischen Fehlereinflüsse des Nivellierinstruments bestimmt, über die an o. a. O. eingehend berichtet wird, sondern auch durch die Qualität der neuen Invar-Strichcodelatte. Dies bedeutet, daß der auf dem Invarband aufgebrachte Code mit seinem theoretischen Modell exakt übereinstimmen muß. Der Begriff »exakt« ist hierbei zunächst noch schwierig zu quantifizieren. Denn im Gegensatz zur herkömmlichen Strichlatte, wo jedem Skalenstrich ein Längenmaß zugeordnet werden konnte, ist diese eindeutige Zuordnung an Codelatten nicht mehr möglich. Vielmehr ist an der Digitalisierung der Höhenablesung – die einem Längenmaß entspricht, – eine Folge mehrerer Striche unterschiedlicher Breite beteiligt. Somit kann die in der DIN 18717 definierte Teilungsgenauigkeit nicht mehr ohne weiteres als Genauigkeitsmaß für die nun verwendeten Codelatten übernommen werden: Die Genauigkeit einer Codestrichlage ist nicht mehr direkt auf die Genauigkeit der Höhenablesung übertragbar. Die Teilungsgenauigkeit könnte nur noch zur Festlegung der Fertigungstoleranz gehalten werden. Die gewohnten Begriffe wie mittlere

res Lattenmeter und Strichverbesserung gewinnen ebenfalls bei Codelatten eine andere Bedeutung.

Es werden deshalb für Präzisions-Codelatten zwei Kalibrierverfahren vorgeschlagen:

1. Überprüfung der Code-Strichlagen (Fertigungsgenauigkeit und Ausdehnungskoeffizient)
2. Vergleich der Differenzen digitaler Lattenablesungen mit Soll-Differenzen (Genauigkeit des Meßsystems)

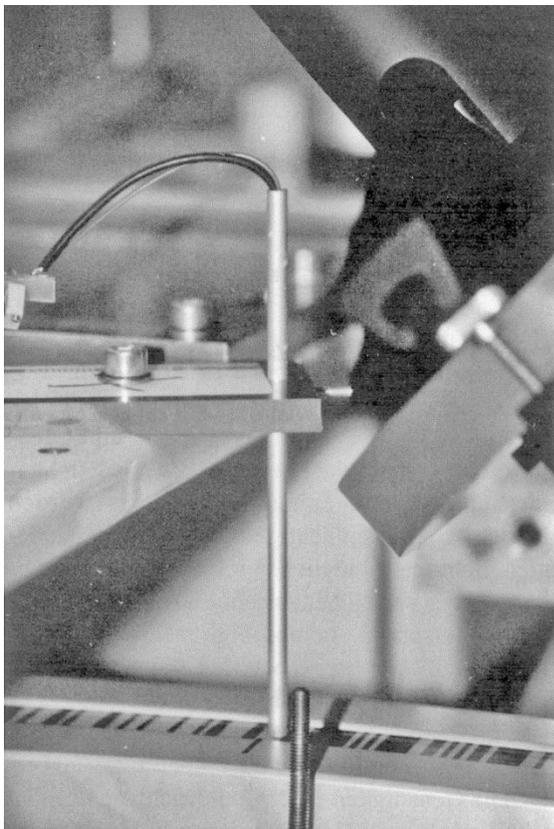
Die technische Realisierung beider Kalibriervorgänge sowie erste Ergebnisse und Erfahrungen werden im folgenden näher erläutert.

2. Nivellierlatten - Kalibrierung durch Erfassung der Code - Strichlagen

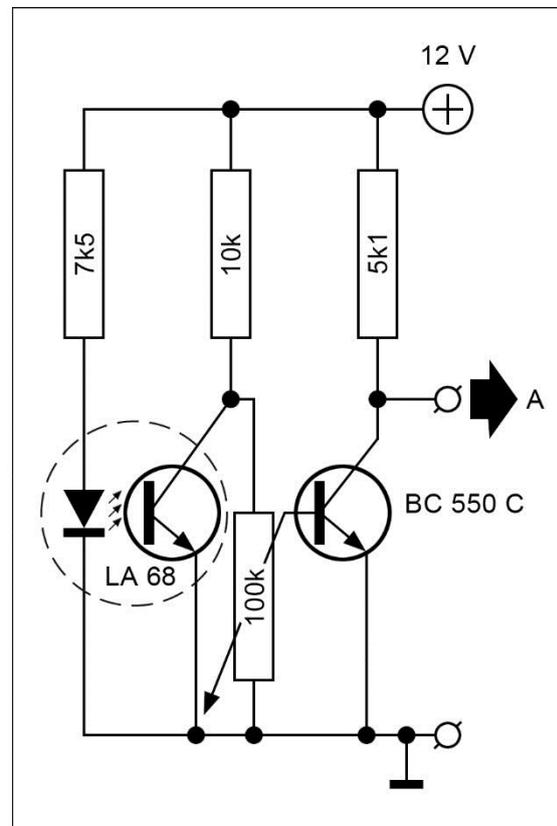
Dieser Kalibriervorgang bestimmt die Residuen jedes einzelnen Codestriches und stellt somit einen Soll-Ist-Vergleich zwischen theoretischem Lattencode und gefertigter Codelatte dar.

Ähnliche Untersuchungen wurden insbesondere zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten des Invarbandes [Ingensand, Maurer, Schaurerte, 1992] bereits vorgeschlagen und durchgeführt. Jedoch aus technischen Mängeln, die wohl im verwendeten photoelektrischen Meßmikroskop liegen dürften, konnten nur Codeelemente gleicher Breite detektiert werden, so daß aus diesen Messungen lediglich der Lattenmaßstab abgeleitet werden konnte.

Hier wird ein einfaches Stricherfassungssystem vorgeschlagen, das durch einen Scanvorgang den gesamten Lattencode erfäßt und von der Strichbreite völlig unabhängig arbeitet. Dazu werden die Nivellierlatten auf dem Meßschlitten eines Horizontalkomparators befestigt, wie z. B. in Heister [1987] beschrieben. Das sonst verwendete photoelektrische Meßmikroskop zur automatischen Stricherfassung wird durch das neue Stricherfassungssystem ersetzt. Dieses besteht lediglich aus einem preiswerten Photodetektor vom Typ LA 68, einer Halterung (Aluminiumröhrchen mit 1 cm Durchmesser), die zur Vermeidung von Störlichteinflüssen bis auf ca. 1 mm über dem Teilungs-



a) Bild des Meßaufbaus



b) Schaltbild des Detektors

Abb. 1: Photoelektrisches Meßsystem zum Scannen der Codeelemente

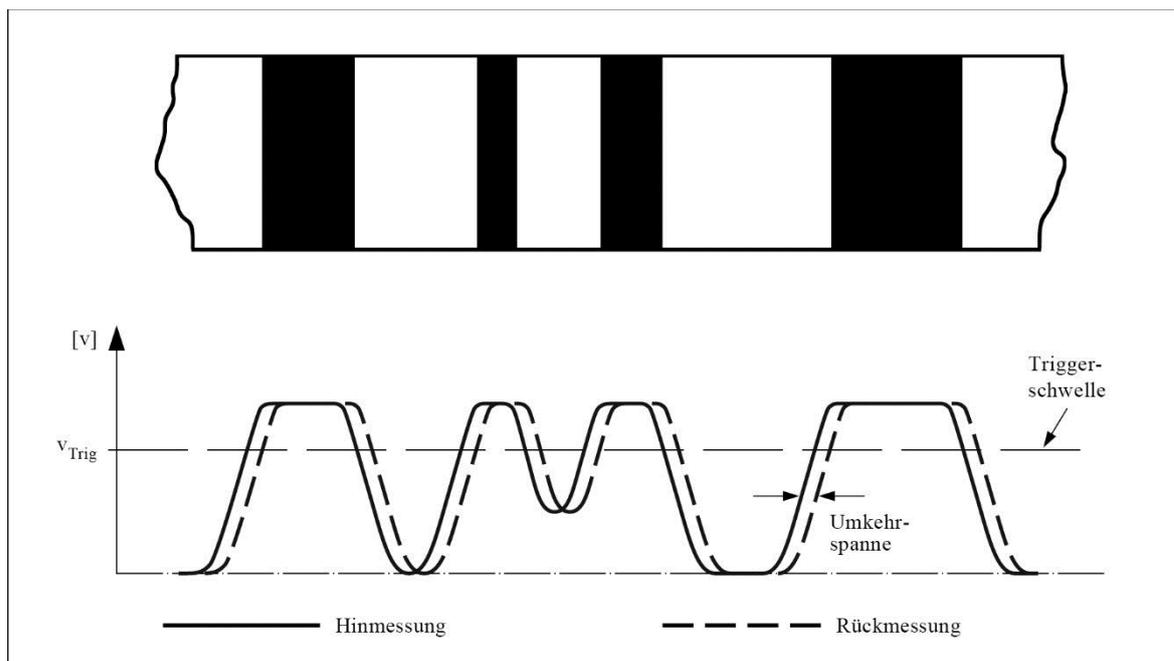


Abb. 2: Lattencode und photoelektrisches Signal

träger abgesenkt wird und einer elektronischen Schaltung zur Signalaufbereitung (siehe Abb. 1). Beim Verfahren der Latte können dann die Hell-Dunkel-Übergänge (Flanken) der einzelnen Codeelemente detektiert und einem Interferometerwert zugeordnet werden. Durch Mittelbildung von Hin- und Rückmessung kann eine von der Umkehrspanne (siehe Abb. 2) freie Mittellage des Codeelementes bestimmt werden. Da jedes Codeelement in seiner Breite vom Konstrukteur festgelegt ist – beim Wild NA 2000/3000 in Verbindung mit den Latten GPCL 2/3 wird diese aus einem Vielfachen der Grundelementbreite von 2.025 mm berechnet –, kann der Soll-Ist-Vergleich durch eine eindimensionale Auffelderung der gemessenen Strichmitten auf die theoretisch bekannten (rekonstruierten) Mitten durchgeführt werden. Ergebnis dieser Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate sind die Residuen der Codestrichlagen, der Maßstabsfaktor und Standardabweichungen. Die Ausgabe dieser Werte ist Tab. 1 und die graphische Darstellung der Abb. 3 zu entnehmen.

Bisherige Erfahrungen mit diesem Meßsystem bestätigen eine Vergleichsstandardabweichung für die Bestimmung der Codestrichmitte von $\sigma_R < 5 \mu\text{m}$. Damit reicht die Genauigkeit aus, um Abweichungen der Codeelemente von ihrer Sollage gemäß DIN 18717 signifikant nachzuweisen; sie schreibt vor, daß ein beliebiger Teilungsabschnitt ein $\Delta l = \pm(0.02 + 1 \cdot 2 \cdot 10^{-5}) [\text{mm}]$ nicht überschreiten darf.

Der Maßstab der Codeteilung wird bei diesem Verfahren durch den hohen Freiheitsgrad ($f \approx 1330$) repräsentativ mit einer Standardabweichung $s_m \leq 1 \text{ ppm}$ bestimmt. Der Zeitaufwand für die Kalibrierung einer 3 m-Latte im Hin- und Rückgang beträgt durch den kinematischen Meßmodus nur 20 Minuten.

Damit ermöglicht dieser einfache und kostengünstige opto-elektronische Aufbau zum Scannen einer Präzisions-Codelatte eine effiziente Überprüfung der Fertigungsgenauigkeit.

3. Kalibrierung des Meßsystems Digitalnivellier - Codelatte

Wie bereits einführend festgestellt, wird die Digitalisierung der Höhenablesung durch die elektronische Auswertung des Codelattenbildes erzeugt. Somit ist die Lage eines Codeelementes, wie sie im vorangegangenen Abschnitt bestimmt wurde, nicht mehr identisch mit der Maßverkörperung der digitalisierten Ablesung; damit kann man auch aus der Lagegenauigkeit des Codes noch keine zuverlässige Aussage über die Genauigkeit der digitalisierten Lattenablesung ableiten. Ähnliches gilt auch für den Maßstab.

Um hier zu einer für die Praxis befriedigenden Aussage zu kommen, wird eine Systemkalibrierung vorgeschlagen. Der Meßaufbau ist aus der

Tabelle 1: Ergebnisprotokoll

Längenkalibrierung auf der Laser-Komparatorstrecke		NA 2000: Lattenkalibrierung	
Auftraggeber: UniBw München Instrument: Invarlatte Instrumenten-Nummer: 9148 Zubehör: ----- Datum: 25.01.1992 Beobachter: HP 9000 Temperatur: 21.40°C Bemerkungen: Photodiode	Ausgleichungsmodell $l + v = b + c \cdot E$ $E = S - S(1) \qquad l = \text{Soll} - \text{Ist}$ $p(i) = 1$		
Auswertung	Ergebnisse		
Kalibrierung zwischen 0.0 m und 2.9 m an 670 Meßstellen Unter Laborbedingungen gilt: Äußere Genauigkeit aus Soll – Ist: $s(a) = \pm 0.027 \text{ mm}$ Freiheitsgrad: $f(a) = 670$ Innere Genauigkeit aus Wiederholungs- messungen: $s(i) = \pm 0.000 \text{ mm}$ Freiheitsgrad: $f(i) = 0$	$s(0) = \pm 0,025 \text{ mm}$ Freiheitsgrad: $f(0) = 666$ Absolutglied $b = 0.018 \pm 0.002 \text{ mm}$ Maßstab $c = -0.013 \pm 0.001 \text{ mm/m}$ Student-Test: $ c / s(c) = t = 11.36 \quad t(0.90;666) = 2.195$ $t(0.95;666) = 2.617$ $t(0.99;666) = 3.445$ Der Maßstabsfaktor ist hoch signifikant		

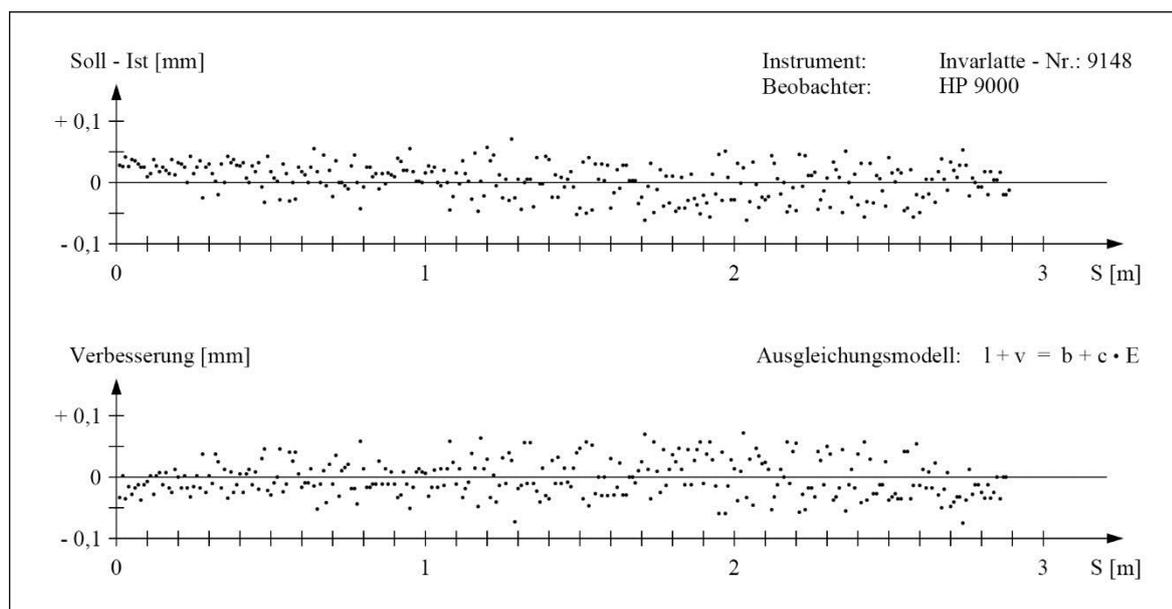


Abb. 3: Graphische Darstellung der Codestrich-Residuen und des Maßstabs

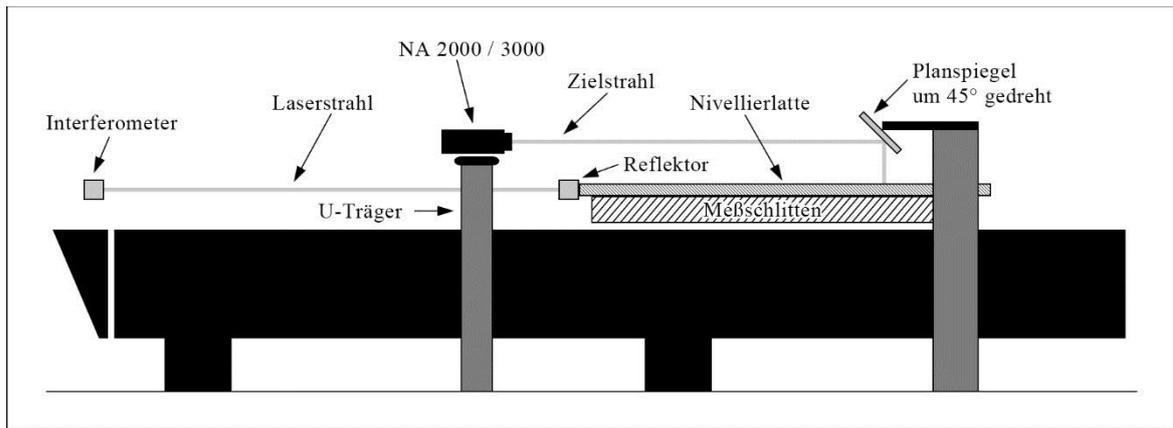


Abb. 4: Systemkalibrierung Digitalnivellier - Codelatte auf dem Präzisionslängenkomparator (schematische Darstellung)

Prinzipskizze (Abb. 4) der Ansicht (Abb. 5) ersichtlich.

Die auf zwei Meßschlitten horizontal gelagerte Codelatte kann über eine motorische Steuerung in frei wählbaren Meßintervallen verfahren werden. Der Verfahrensweg wird dabei mit einem interferometrischen Meßsystem bestimmt. Das Digitalnivellier wird auf einem U-Träger über der interferometrischen Meßachse befestigt (siehe Abb. 5). Der horizontale Zielstrahl wird nach einer Entfernung von ca. 5 m um 90° nach unten auf die horizontale Codelatte umgelenkt. Hierzu wurde an einer stabilen Meßbrücke ein Planspiegel ($\lambda/20$) mit 25 cm Durchmesser in einem Abstand von ca. 0.5 m zur Latte unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen angebracht (siehe Abb. 5). Der durch die Größe des Planspiegels begrenzte Bildausschnitt reicht dann aus, um über den Meßbereich von 3 m eine Ablesung am Nivellier zu erhalten. Der Soll-Ist-Vergleich von interferometrisch gemessenen Fahrwegdifferenzen (horizontalen Lattenverschie-

bungen) und digital gemessenen »Höhendifferenzen« ist somit über den gesamten Lattencode unter Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips möglich.

Ein direkter serieller Anschluß des Digitalnivelliers mit dem Steuerrechner des Komparators ermöglicht die vollständige Automatisierung des Kalibrierprozesses.

Die anschließende Auswertung und statistische Analyse der Meßwerte erfolgt nach einem einfachen Ausgleichsmodell unter Einführung eines Maßstabsfaktors (lineare Regression). Trotz der Beschränkung in der Auflösung der Digitalnivelliere läßt sich eine typische Genauigkeit der Einzelmessung von $s_0 \leq 0.04$ mm erreichen; die Standardabweichung des Maßstabsparameters liegt bei 1 cm-Meßintervallen (Freiheitsgrad $f = 550$) bei $s_m = \pm 2$ ppm.

Der Vorteil dieser Systemkalibrierung liegt darin, daß man eine repräsentative Aussage über die

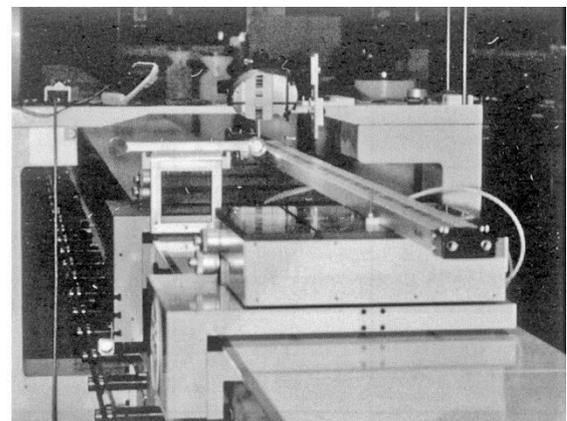
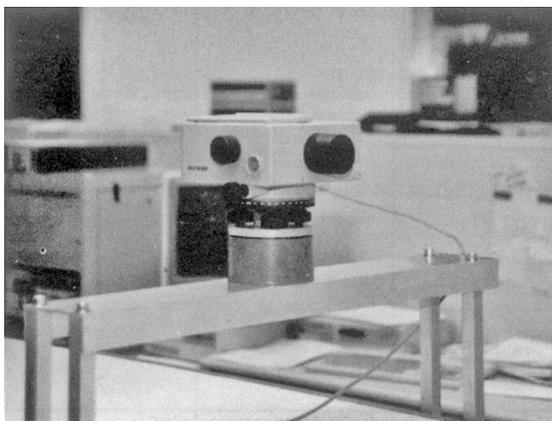


Abb. 5: NA 3000 auf U-Träger und Sicht auf Code-Latte über den Umlenkspiegel

Meßgenauigkeit (wobei die systematischen Abweichungen der Refraktion minimal sein dürften) machen kann. Die Teilungsgenauigkeit bzw. Lagegenauigkeit des einzelnen Codeelementes ist hierbei bedeutungslos. Die Maßstabsunbekannte ist als direkter Korrekturfaktor auf die gemessene Höhendifferenz übertragbar.

Unberührt hiervon bleiben natürlich die Untersuchungen zum typenspezifischen Temperaturverhalten von Instrument und Codelatte (linearer Ausdehnungskoeffizient).

4. Numerische Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Es wurden bisher nach den geschilderten Kalibrierverhalten mehrere Nivellierlatten untersucht und zahlreiche Meßreihen ausgewertet [Pietzsch, 1992]. Einerseits sollte dabei die Funktionsfähigkeit und Richtigkeit der Codestricherfassung überprüft werden, andererseits natürlich auch die Codelatte auf Fertigungsgenauigkeit und Maßstabsverhalten. In den nachfolgenden Tabellen sind aus diesen Untersuchungen stellvertretend die Ergebnisse

Tabelle 2: Kalibrierergebnisse der Wild Invar-Strichcodelatte GPCL 3 Nr. 9148

Meßreihe Nr.	s_R [mm]	m [ppm]	s_m [ppm]	f	Bemerkungen
1	0.04	2	2	555	NA 2000
2	0.04	-2	6	51	NA 2000
3	0.04	7	2	555	NA 2000
4	0.03	-3	6	51	NA 2000
5	0.04	3	2	555	NA 3000
6	0.03	12	4	53	NA 3000
Mittel	0.04	4	2	1820	NA 2000/3000
7	0.04	-13	1	1335	S
8	0.04	-13	1	1335	S
Mittel	0.04	-13	1	2670	S

Tabelle 3: Kalibrierergebnisse der Wild Kunststoff-Hohlprofil-Nivellierlatte (3-teilig) GKNL Nr. 015480

Meßreihe Nr.	s_R [mm]	m [ppm]	s_m [ppm]	f	Bemerkungen
1	0.06	-105	8	235	[U] NA 2000
2	0.04	-10	8	235	[M] NA 2000
3	0.06	-115	8	235	[O] NA 2000
4	0.07	-61	3	779	NA 2000
5	0.07	-65	3	779	NA 3000
Mittel	0.07	-63	2	1558	NA 2000/3000
6	0.08	28	2	1800	S
7	0.08	25	2	1800	S
Mittel	0.08	26	1	3600	S

jeweils einer Invar-Strichcodelatte (Tab. 2) und einer Kunststoff-Codelatte (Tab. 3) zusammengestellt.

Die Spalte 1 gibt in beiden Tabellen die Nummer einer unabhängigen Meßreihe an, Spalte 2 die Standardabweichung s_R einer Einzelmessung, die Spalten 3 und 4 den Maßstabsfaktor m mit seiner Standardabweichung s_m , Spalte 5 den Freiheitsgrad f und in Spalte 6 ist vermerkt, ob eine Systemkalibrierung mit dem NA 2000/3000 durchgeführt oder der Strichcode mit dem Stricherfassungssystem (S) detektiert wurde.

Die Werte für die Standardabweichung s_R in Tabelle 2, die aus dem Soll-Ist-Vergleich berechnet wurden, weisen mit 0.04 mm in beiden Kalibrierverfahren übereinstimmende Ergebnisse aus: sowohl Meßgenauigkeit des Systems als auch Fertigungsgenauigkeit der Invar-Codelatte liegen hiernach innerhalb der Herstellerspezifikationen. Die Meßreihen 1 bis 4 zeigen eine vergleichende Analyse unabhängiger Kalibrierungen mit 1 cm- und 10 cm-Meßintervall (Freiheitsgrad $f = 555$ bzw. $f = 51$). Selbst bei geringer Überbestimmung sind die Ergebnisse durchaus noch befriedigend, die Reproduzierbarkeit ist gut.

Die Überprüfung der Code-Strichlagen (Meßreihen mit Bemerkung »S« in Tab. 2 und 3) unterstreicht ebenfalls die gute Wiederholgenauigkeit des vorgestellten Stricherfassungssystems.

Obwohl Kalibrierverfahren dieser Genauigkeitsklasse normalerweise nur für Präzisions-Nivellierlatten sinnvoll sind, wurden auch die von Leica angebotenen Kunststoff-Codelatten untersucht. Hier bestätigte sich der Verdacht, daß die dreiteilige Stecklatte die Genauigkeit erheblich reduziert. Es wurden sowohl die Einzelteile ([U] = Unten, [M] = Mitte, [O] = Oben) untersucht, als auch die zusammengesteckte 4 m-Latte. Unterschiedliches Maßstabsverhalten der einzelnen Lattenteile und Sprünge von bis zu 0.4 mm an den Nahtstellen bestätigen die Herstellerempfehlung, für die Präzisionshöhenmessung nur Invar-Codelatten einzusetzen.

Bemerkenswert ist jedoch, daß sowohl bei den Untersuchungen der Invar- als auch Kunststoff-Codelatte die Maßstabsparameter (Mittel) m signifikant in den beiden Kalibrierverfahren differieren.

Dies deutet darauf hin, daß System- und Lattenkalibrierung bezüglich ihrer Maßstabsbestimmung unterschiedlich zu interpretieren sind. Um zu allgemeingültigen Aussagen zu kommen, sind weitere Meßreihen mit anderen Digital-Nivellieren und Invar-Codelatten vorgesehen.

Zusammenfassend ist anzumerken, daß die Kalibrierung von Digitalnivellier und Codelatte zusammen eine umfassende und repräsentative Genauigkeitsanalyse ermöglicht; die Überprüfung der Codelatte alleine läßt nur die Aussage zur Fertigungsgenauigkeit zu. Es ist deshalb darüber nachzudenken, ob zukünftig für Präzisionsmessungen nur noch die Systemkalibrierung einer digitalen Nivellierausrüstung, wie sie bei elektronischen Distanzmeßgeräten bereits seit Jahren praktiziert wird, durchgeführt werden sollte.

Literatur

Heister, H. [1987]: Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Heft 27, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 210 S.

Ingensand, H. [1990]: Das Wild NA 2000, das erste Digitalnivellier der Welt. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 97. Jahrgang, Heft 6, Karlsruhe, S. 201-210

Ingensand, H., Maurer, W., Schauerte, W. [1992]: Die Digitalnivellierfamilie Wild NA 2000/NA 3000 und ihre Anwendung in der Ingenieurvermessung. – In: *Matthias, H. J., Grün, A. (Hrsg.):* Ingenieurvermessung 92 – Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Band 1. Ferdinand Dümmler Verlag, Bonn, S. II 14/1-II 14/4

Pietzsch, U. [1992]: Untersuchungen zur Systemgenauigkeit der automatisierten digitalen Nivelliere NA 2000 und NA 3000. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, Neubiberg, 92 S.

Schauerte, W. [1991]: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Digitalnivelliers Wild NA 2000. Vermessungswesen und Raumordnung, 53. Jahrgang, Heft 1, Bonn, S. 45-55

Ausgewählte Probleme der stereoskopischen Auswertung von Aufnahmen mit einer Dreizeilenkamera am analytischen Auswertegerät

Zusammenfassung

Sollen die inzwischen zahlreich verfügbaren Bilddaten von digitalen Zeilenaufnahmesystemen mit analytischen Plottern ausgewertet werden, so sind Anpassungen notwendig. Eine mögliche Vorgehensweise wird hier skizziert und insbesondere auf die Auswahl einer bestimmten Zentralprojektion eingegangen, um dadurch eine bestmögliche Annäherung der Zeilengeometrie zu erhalten.

Summary

The analytical stereo restitution of analog hardcopies of the numerous digital image data now available from linear array sensors is briefly described. Special interest is focused on the approximation of linear array imaging geometry by a chosen central perspective.

1. Einleitung

In der Photogrammetrie stellt die stereoskopische Auswertung von analogen Perspektivbildern ein fundamentales Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objekten dar. Vorwiegend kommt diese Methode bei der Stereoauswertung von Bildpaaren mit analytischen Plottern zur Herstellung von topographischen Karten, Erzeugung von Digitalen Geländemodellen (DGM) und Datengewinnung für Geo-Informationssysteme (GIS) zur Anwendung. Dabei mißt der Operatorm am analytischen Plotter nicht nur dreidimensionale Positionen, sondern interpretiert zusätzlich noch den Bildinhalt und attributiert somit die Messungen. Gerade diese Fähigkeit der simultanen Interpretation wird auch in naher Zukunft trotz intensiver Forschungen im Bereich des maschinellen Sehens nicht vollständig zu ersetzen sein. Dies gilt analog auch bei der Auswertung an Softcopystationen (Digitaler Stereo -Arbeitsplatz).

Nach der erfolgreichen zweiten deutschen Spacelab-Mission (D2) vom 26.4.-4.5.1993 sind

digitale Bilddaten der MOMS-02 Dreizeilenkamera verfügbar. Um dieses Aufnahmematerial auch mit der Vielzahl der im praktischen Einsatz befindlichen analytischen Plotter nutzen zu können, müssen diese angepaßt werden. Im folgenden wird auf die Besonderheiten einer möglichen Anpassung eingegangen.

2. Gerätebeschreibung

2.1 MOMS-02 Kamera - Aufnahmeprinzip und Abbildungsgeometrie

Die MOMS-02 Kamera besteht aus fünf Objektiven mit CCD-Zeilensensoren in der Bildebene. Für photogrammetrische Anwendungen werden die drei im panchromatischen Spektralbereich arbeitenden Objektive mit nadir-, vor- und rückwärtsblickender Aufnahmerichtung verwendet [Ackermann, 1993]. Für thematische Untersuchungen kommen zwei senkrecht blickende Objektive mit multispektralem Sensorbereich zum Einsatz [Boedechtel et al., 1993].

Jedes einzelne Objektiv arbeitet nach dem pushbroom Prinzip [Hofmann, 1982], d.h. die Auslesefrequenz der Sensorzeilen ist mit der Geschwindigkeit der Trägerplattform so abgestimmt, daß eine lückenlose Aufnahme der überflogenen Erdoberfläche gewährleistet wird. Somit weicht die Aufnahmegeometrie von Zeilensensoren (kinematische Aufnahme) in Flugrichtung von der sonst üblichen Zentralprojektion (statische Aufnahme) ab [Müller, 1991]. Die Aufnahmen sind in Flugrichtung von orthographischer und quer dazu von zentraler Projektion.

2.2 Analytischer Plotter

Bei analytischen Plottern werden Zentralprojektion und Modellbildung rechnerisch durch Auswerten der Kollinearitätsgleichungen realisiert. Mit den Handrädern und der Fußscheibe oder einem Cursor werden die Modellkoordinaten kontrolliert und mit den Orientierungsparametern der beiden Meßbilder

die entsprechenden Positionen (Bildkoordinaten) der homologen Bildpunkte errechnet. Die Bildwagen werden ständig nachgeführt. Geschieht dies mit entsprechend hoher Frequenz (> 50 Hz), so bleibt der ungestörte Stereoeindruck erhalten.

3. Koordinatensysteme

Die im folgenden kurz beschriebenen Koordinatensysteme sind bei Auswertung von Zeilenaufnahmen beteiligt und zu definieren.

Das übergeordnete Koordinatensystem, in dem man die Auswertergebnisse erhalten möchte, wird als Weltsystem bezeichnet. Meist handelt es sich dabei um ein krummliniges Landeskoordinatensystem, das zunächst in ein lokales kartesisches System transformiert wird.

Das Modellsystem erhält man durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation aus dem Weltsystem. Dabei wählt man z.B. den Ursprung willkürlich in der Mitte des Auswertebereichs mit annähernd zu den Bildebenen paralleler x-y Ebene.

Sowohl vom Welt- als auch vom Modellkoordinatensystem aus erhält man mit den entsprechenden Orientierungsparametern (äußere und innere) über die perspektive Abbildungsgleichung die Bildkoordinaten der zentralperspektiven Aufnahme. Bei der zeilengeometrischen Aufnahme werden diese Koordinaten als Kamerakoordinaten bezeichnet. Denn das eigentliche Bild entsteht wegen des push-broom Prinzips erst durch die Aneinanderreihung der einzeln aufgenommenen Sensorzeilen.

Im analytischen Plotter kommt für jedes Bild noch einmal ein Wagenkoordinatensystem (Maschinensystem) hinzu, in dem die Bilder auf den Wagen liegend bewegt werden.

4. Korrekturprogramm

Da jede einzelne Zeile eines Bildes von einer anderen Position auf dem Weg der Trägerplattform aufgenommen ist, gehört auch zu jeder Zeile ein eigenes Projektionszentrum mit jeweils sechs äußeren Orientierungsparametern. Der direkte Lösungsweg mit Berücksichtigung der jeweiligen Aufnahmekonstellation (Orientierungsparameter) bei der Berechnung der Abbildungsgleichungen kann bei den meisten analytischen Plottern nicht beschränkt werden, da sie nur die Zentralperspektive zulassen. Allerdings können dynamische Korrekturen im

Modell-, Photo- oder Wagenkoordinatensystem angebracht werden. Folglich müssen die Korrekturwerte durch Vergleich zwischen der Sollposition (Zeilengeometrie) und den Istwerten (Zentralperspektive) ermittelt werden [Hoch und Dorrer, 1992].

Im Korrekturprogramm werden dann einerseits die wirklichen Aufnahmebedingungen der Zeilenkamera nachgebildet und andererseits die im analytischen Plotter näherungsweise geltende Zentralperspektive berechnet. Die Differenz wird dann an den Plotter übertragen und berücksichtigt.

Wenn die Änderungen der Korrekturwerte sehr klein bleiben, treten keine unangenehmen Störungen der Stereoskopie auf. Deshalb ist anzustreben, die Differenz zwischen der realen Aufnahme (Soll) und der im Plotter geltenden Zentralperspektive (Ist) möglichst gering zu halten. Weiterhin müssen auch die absoluten Werte der Differenzen möglichst klein bleiben, da der analytische Plotter hier oft Grenzen setzt und größere Werte nicht anbringen kann.

Um diejenige Zentralprojektion auszuwählen, welche die Zeilenaufnahmegeometrie bestmöglich annähert und die eben genannten Forderungen erfüllt, ist zu untersuchen, welche Ursachen für die Unterschiede überhaupt verantwortlich sind.

Hierzu werden die drei Objektive bei einem vollkommenen Flug (Sensorebene parallel zur Erdoberfläche, keinerlei Bahnstörungen) betrachtet. So lassen sich die Sachverhalte vereinfacht im zweidimensionalen Raum darstellen und nachvollziehen. Es zeigt sich, daß ein Bild einer Zeilenaufnahme bei idealem Flug über ebenem Gelände keinerlei Differenzen zur zentralperspektiven Abbildung der Erdoberfläche erkennen läßt. Unterschiede und somit notwendige Korrekturen am analytischen Plotter treten nur bei unregelmäßiger Bahn oder bewegtem Gelände auf. Dies führt bei der Bündelausgleichung von Zeilenaufnahmen zum bekannten Problem der unabhängigen Triangulationsketten [Hofmann, 1986; Müller, 1991].

4.1 Nadirobjektiv

Zum Vergleich wählt man das Projektionszentrum der Zentralprojektion in der Mitte (1) des Auswertebereiches, das sich nach links symmetrisch fortsetzt (Abb. 1). Vergleicht man beim Nadirobjektiv die Bildkoordinaten der Zeilenaufnahmen mit denen der ausgewählten Zentralperspektive mit Projektionszentrum (1), dann erhält man für den Punkt P_1 bei beiden Geometrien die gleichen Bildkoordinaten, nämlich im fünften Pixel (Abb. 1).

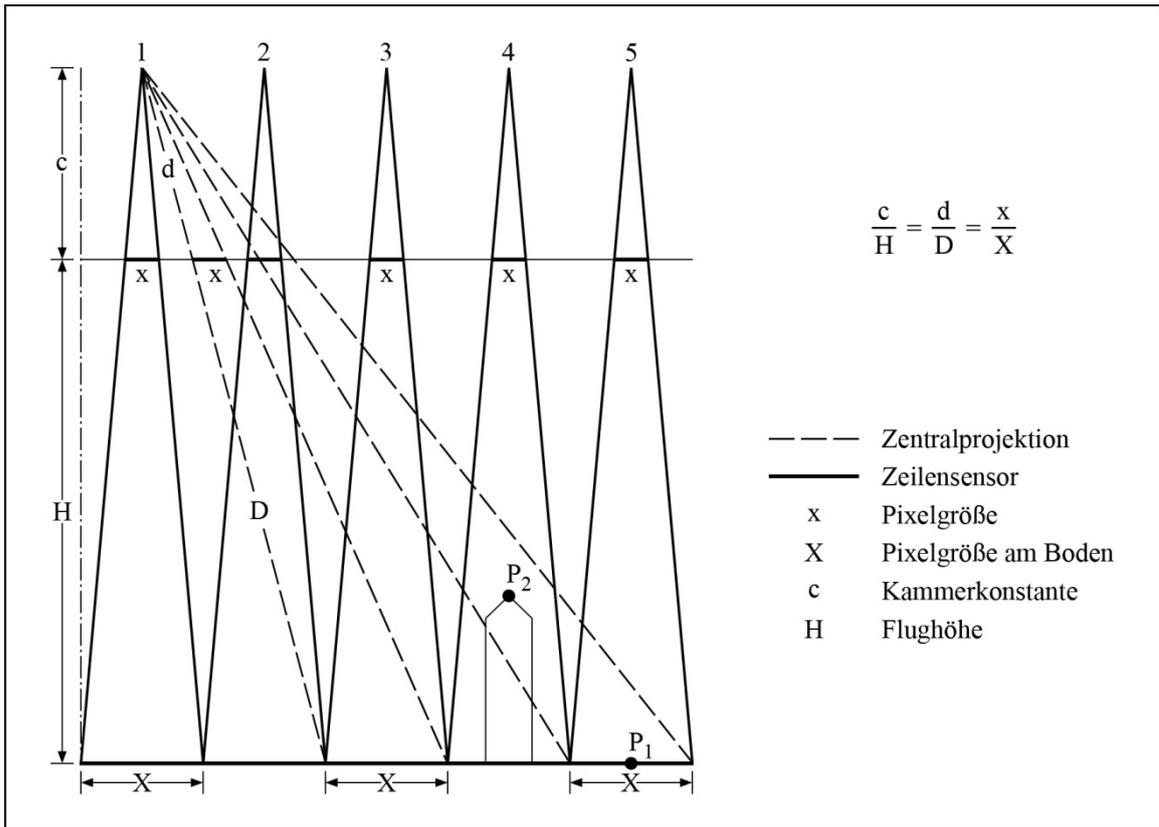


Abb. 1: Nadirobjektiv mit $c = 660$ mm

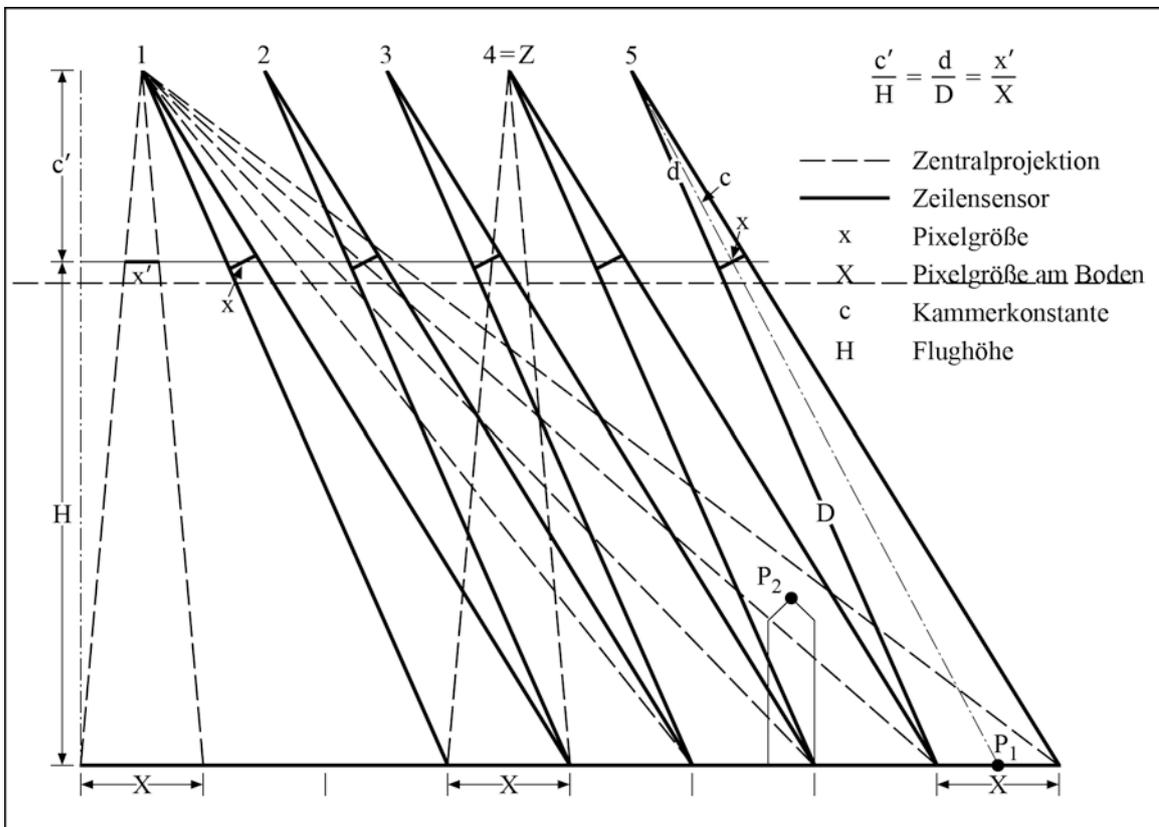


Abb. 2: Vorwärts-/Rückwärtsblickende Objektive mit $c = 237,11$ mm

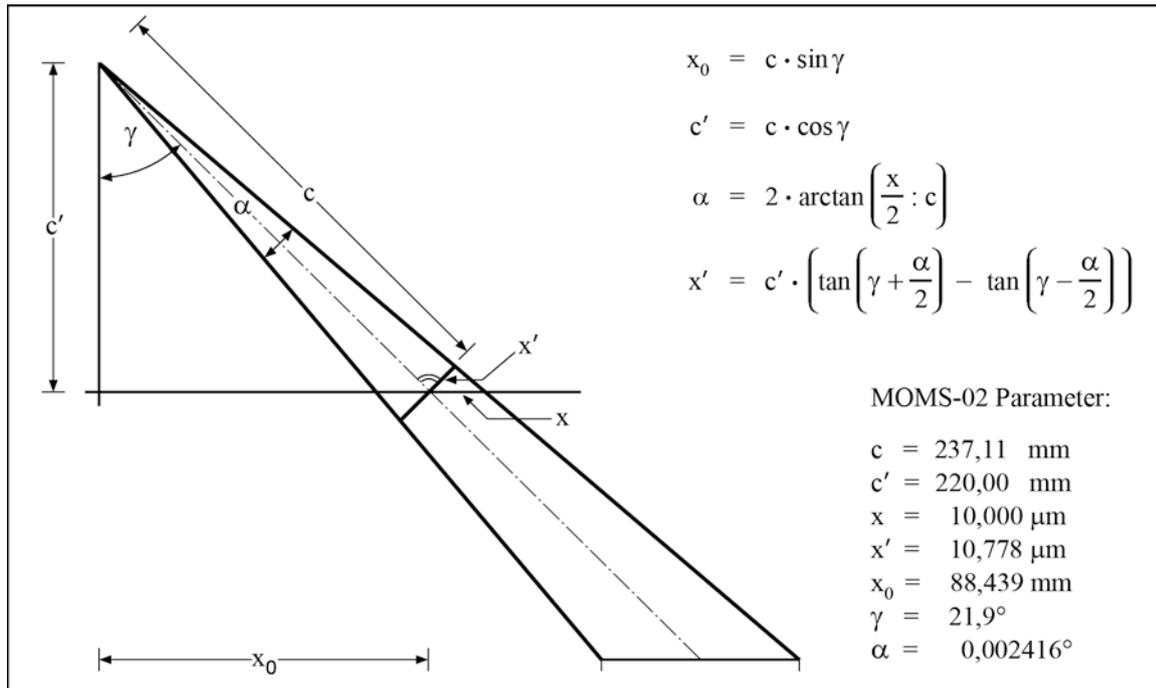


Abb. 3: Zentralperspektive bei geneigten Objektiven

4.2 Forward- und Backwardobjektiv

Betrachtet man nun die schrägblickenden Objektive, so vermutet man, daß hier schon aufgrund der geneigten Aufnahme-richtung größere Differenzen zur Zentralperspektive auftreten. Es läßt sich jedoch zeigen, daß durch entsprechende Wahl einer bestimmten Zentralperspektive auch hier wieder die Unterschiede verschwinden.

Es ist notwendig, eine Zentralprojektion zu wählen, welche ebenfalls wieder eine Bildebene parallel zur Erdoberfläche hat. Daraus folgt, daß sich die Kammerkonstante zu $c' = c \cdot \cos \gamma$ ergibt (Abb. 3). Dies folgt aus den Konstruktionsprinzipien für Dreizeilenkameras mit einem oder mit drei Objektiven, wie sie Hofmann [1986] darstellt. Die Pixelgröße der Zeilensensoren ist dabei ebenfalls geringfügig anzupassen, da die Pixelgröße am Boden gleich bleiben soll (Abb. 2). Die sich dann ergebenden großen x -Bildkoordinaten kann man entweder durch eine Bildhauptpunktverschiebung um x_0 oder durch eine Verschiebung des Aufnahmeortes der Zentralperspektive nach Z in die gewohnten Größenordnungen bringen. Sodann gilt wieder wie zuvor, daß keinerlei Differenzen in den Bildkoordinaten beider Geometrien auftreten.

5. Ursachen für Differenzen

Wie bisher gezeigt wurde, treten im idealen Fall keinerlei Differenzen zwischen den Aufnahmen in

der Zeilengeometrie und der ausgewählten Zentralperspektive auf. Die schon angesprochenen Soll-Ist-Unterschiede haben ihre Ursache zum einen in der Topographie des abgetasteten Geländes, zum anderen in der gestörten Bahn der Trägerplattform (Flugzeug, Space-Shuttle, Satellit) [Dorrer, 1978].

Genauer erläutert werden soll hier stellvertretend die Wirkung von Höhenunterschieden (P_1, P_2) im Gelände. Wie in Abb. 1 und 2 ersichtlich, wird der Punkt P_1 in der Zentralprojektion im Bereich des fünften Pixels abgebildet und beim Zeilensensor im Auslesezyklus 5 aufgenommen. Der höherliegende Punkt P_2 wird bei der Zentralprojektion ebenfalls im fünften Pixel aufgenommen, bei der Zeilenaufnahme jedoch im Auslesezyklus 4. Somit erhält man eine Differenz von einem Pixel, welche am analytischen Plotter zu berücksichtigen ist. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich bei der Betrachtung von Bahnstörungen und deren Auswirkungen.

6. Schluß und Ausblick

Unter Ausnutzung der Möglichkeit, die Zeilenaufnahmegeometrie bis auf geringe Abweichungen durch eine ausgewählte Zentralperspektive anzunähern, wurde am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München ein Korrekturprogramm für analytische Plotter der P-Serie der Fa. Zeiss entwickelt. In das Auswertesystem PHOCUS eingebettet, erlaubt es die

Auswertung von Zeilensensordaten in der von Reihenmeßkammerbildern gewohnten Weise [*Hoch und Dorrer, 1992*].

Nach den experimentellen Erfahrungen mit den Bilddaten der D2-Mission ist ein ca. zwei Jahre (1995/96) währender Betrieb der MOMS-02 Kamera auf der russischen Raumstation MIR vorgesehen, um kontinuierlich aktuelle Weltraumaufnahmen mit ausreichender geometrischer Genauigkeit zur Verfügung zu stellen.

Literatur

- Ackermann, F. [1993]:* Das MOMS-02-Stereosegment – Ein hochgenaues System der digitalen Photogrammetrie. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 6, No. 1, London/New York, S. 16-22
- Bodechtel, J., Lörcher, G., Sommer, S., Ammer, U., Koch, B., Schneider, Th. [1993]:* Geoscientific objectives and expected thematic performance of the MOMS-02 imager. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 6, No. 1, London/New York, S. 11-15
- Dorrer, E. [1978]:* Effect of Aircraft Attitude Changes on Image Geometry of Linear Array Sensors. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Heft 36, Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main, S. 67-77
- Hoch, L., Dorrer, E. [1992]:* Real Time Processing of MOMS-02 Linear Array Imagery for Analytical Stereo Restitution. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission II, Washington, D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B2, Washington, D.C., S. 140-144
- Hofmann, O. [1982]:* Digitale Aufnahmetechnik. Bildmessung und Luftbildwesen, 50. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, S. 16-32
- Hofmann, O. [1986]:* Dynamische Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, 54. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 105-121
- Müller, F. [1991]:* Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 372, Bayerische Akademie der Wissenschaften / Verlag Beck in Komm., München, S. 9 und S. 37

Wilhelm Kick

Das Gemälde des Satschéngletschers am Nanga Parbat aus dem Jahr 1856

Zusammenfassung

Das Gemälde des Satschéngletschers am Nanga Parbat von Schlagintweit 1856 zeigt das Niveau des Gletschers in der interessanten Zeit des alpinen 1850er Maximums. Wegen des unbekanntem Bildmaßstabes kann nur das Verhältnis der vertikalen Bildstrecke a (Moräne + Gletscher) zum Hintergrundhang b mit dem in einer Rolleiflex-Aufnahme von 1987 verglichen werden. Ergebnis: Die Gletscheroberfläche war 1856 in einem Profil über den Sango-See zum Gegenufer um 80 m niedriger als im 20. Jahrhundert. Das Maximum des Satschén war erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts erreicht worden.

Summary

The painting of the Satschén Glacier (Nanga Parbat) of Schlagintweit 1856 shows the level of the glacier in the interesting time of the alpine 1850 maximum. Because of the unknown scale of the image only the relation of the vertical extension a in the image (moraine + glacier) to b, the slope in the background, can be compared with this relation in a Rolleiflex photograph of 1987. Result: In 1856 the level of the glacier in a cross profile from the Sango lake was by 80 m lower than in the 20th century. The maximum of the Satschén occurred towards the end of the 19th century only.

Die Gebirgsgletscher außerhalb der polaren Zonen sind sensible Indikatoren für Klimaänderungen, auch wenn letztere sich über verschiedene zeitliche Verzögerungen und örtliche Besonderheiten auswirken. Weil die Alpen mitten im naturwissenschaftlich früher aktiven Europa liegen, sind deren Gletscheränderungen mit großem Abstand besser dokumentiert als das global viel wichtigere Gletscherareal Hochasiens. Umso interessanter sind die Beschreibungen, Bilder und Messungen, die die Brüder Hermann, Adolph und Robert Schlagintweit von ihren Reisen 1855-57 aus Himalaya, Karakorum und Künlün hinterließen. Dafür gibt es vor allem drei Gründe:

- 1) Ihre Forschungsreise fiel gerade in die Zeit des letzten Gletscherhochstandes der 1850er Jahre in den Alpen, also in die interessanteste Vergleichszeit.
- 2) Sie kamen als einsame Vorläufer mit großem zeitlichem Abstand – anders als andere Asienreisende im 19. Jahrhundert – bereits als aus den Alpen erfahrene Gletscherforscher in den Himalaya und stellten dort bewußt Vergleiche an.
- 3) Sie waren – im Geiste ihres Förderers Alexander von Humboldt – objektiv beobachtende und vermessende Aufzeichner und konstruierten z. B. in ihren »Panoramen« mit Hilfe von Theodolitmessungen regelrechte Meßbilder mit der Absicht, diese Panoramen als Hilfsmittel bei der späteren Schaffung einer kleinmaßstäblichen Karte zu benutzen.

Erst nach der Herstellung der Karte im Maßstab 1 : 50000 durch Richard Finsterwalder als Ergebnis der Nanga-Parbat-Expedition von 1934 konnte der Nachlaß des 1857 ermordeten Adolph Schlagintweit eingehender ausgewertet werden. Vor und während dieser großen Expedition wußten die Bergsteiger und die wissenschaftlichen Teilnehmer noch nichts von den Arbeiten ihres Vorgängers im gleichen Gebiet. Noch kurz nach seiner Rückkehr schrieb Finsterwalder, der Leiter des wissenschaftlichen Teiles der Expedition, in der ersten Buchveröffentlichung [Bechtold, 1935, S. 65]: »Wir hatten zu berücksichtigen, daß noch nie vor uns ein Wissenschaftler das Gebiet des Nanga Parbat betreten hatte.«

Dieses im Drang der Expeditionsvorbereitungen entschuldbare Übersehen änderte sich mit einem Schlag, als der Arzt Dr. Erwin Schlagintweit aus Bad Wiessee kurz nach der Expedition Finsterwalder einen Druck des »Diemer-Panoramas«, ein Bild der Nanga-Parbat-Südseite, überbrachte, das sein Onkel am 14./15.9.1856 gemalt hatte. Finsterwalder erkannte sofort den Wert dieser Darstellung als historische Datierung des Gletscherstandes in einem Bergmassiv Asiens für die so wichtige Zeit um 1850. 1934/35 lebte erstaunlicherweise noch ein Stiefbruder der drei Himalayaforscher, nämlich der ehemalige kgl. Bayer. Oberst Max von Schlagint-

weit (1849-1935), der Vater des Bildüberbringers Dr. Erwin Schlagintweit. In seinem letzten Lebensjahr stiftete Max eine Beihilfe, wodurch das Bild in Farbe erstmals veröffentlicht werden konnte [*Finsterwalder et al. 1935, Titelbild und Text S. 64; Finsterwalder und Jung, 1938, Bild und Text S. 153*].

Aus dem Bild und aus einer Deckpause, die Finsterwalder im Nachlaß des Adolph Schlagintweit in der Handschriftenabteilung der Bayerischen Staatsbibliothek fand [*Schl.'ana III, Bd. 12*], schloß er auf einen Gletscherhochstand um die Mitte des 19. Jahrhunderts: Der Chungpar- oder Taschingletscher endete »etwa 500 m« weiter vorne als 1934. Diese Rückzugsstrecke hatte Finsterwalder wahrscheinlich einer Skizze in *Schl.'ana II.1, Bd. 8, S. 151* entnommen. Sie ist in *Müller-Raunig [1982, S. 95]* veröffentlicht. »Bemerkenswert ist der auf dem Bild schwach sichtbare, von Schlagintweit [1872, S. 254] ausdrücklich erwähnte See, der vom Chungpar aufgestaut wurde und die unteren Fluren der Ortschaft Rupal unter Wasser gesetzt hat.« [*Finsterwalder und Jung, 1938, S. 154*]. Das Bild fand Finsterwalder bemerkenswert genug, um den damaligen Standort in die Ausgabe 1937 der Nanga-Parbat-Karte bei Kote 3837 auf dem Rampurkamm als »Standpunkt Schlagintweit 1856« eintragen zu lassen.

Die Schlußfolgerung von den damals größeren Chungpar- (und Bazhin-) Gletschern auf einen allgemein gegenüber 1934 wesentlich größeren Gletscherstand konnte für Finsterwalder nicht zweifelhaft sein. Er hätte aber wahrscheinlich vorsichtiger geurteilt, hätte er ein weiteres Gemälde Schlagintweits, das des Satschéngletschers, schon gekannt. Bereits hier sei festgehalten, daß die Folgerung auf einen größeren Gletscherstand in der Mitte des 19. Jahrhunderts zwar im großen und ganzen richtig war, daß aber im einzelnen Einschränkungen nötig sind. Aus anderen Beobachtungen im Gelände fand auch Finsterwalder Ausnahmen, von dem großen Unterschied 1856-1934, nämlich beim Satsché (sic!), Scheigiri und Toschain-Rupal, die 1934 »mit ihren Enden nahe an ihrem letzten Höchststand liegen« [*Finsterwalder und Jung, 1938, S. 152*].

Hier muß eine Rechtfertigung der Schreibweise »Satsché« zwischengeschaltet werden. Das ch in »Saché« in der Karte 1 : 50000 ist mit englischer Aussprache zu gebrauchen. Schlagintweit verwendete »Zungr-Gletscher« nach dem Namen Zungr, des größten Ortsteils im Provinzhauptort Astor. Nach diesem sind auch die Chongra Peaks und der Sango Sar (Sar bedeutet in China See) benannt.

Aber unter dem Namen Sati Schei Paß für einen Übergang ganz in der Nähe kommt bei Schlagintweit auch das Satsché vor, ebenso wie bei den trigonometrischen Punkten »Satschai« der Survey of India (Vermessung 1863) und »Satshe« No. 1-4 (Vermessung 1900-01).

Zur Zeit der Ausarbeitung der Expeditionsergebnisse von 1934 konnten das erwähnte Bild des Satsché- und ein weiteres vom Bazhingletscher noch nicht bekannt sein. Sie tauchten erst einige Jahre später auf. Durch Vermittlung von Drygalski kamen diese beiden Gemälde zusammen mit ca. 400 Bildern zur Familie Schlagintweit nach Bad Wiessee:

- Generalregister Nr. 642
»Sangu-sar-Gletscher in der Nanga Parbat- oder Diyamir-Gruppe, 50-32« (cm), 11. September 1856.
- Nr. 643
»Tami-Chuet-Gletscher, 50-32«, 17. September 1856.

Erst ca. 1955 wurde der Verfasser bei der (vergeblichen) Suche nach Chogo-Lungma-Bildern im Hause Schlagintweit auf diese weiteren zwei Gemälde aus dem Nanga-Parbat-Massiv aufmerksam.

Vorweg sei hier vermerkt, daß Bild Nr. 643 vom Bazhingletscher bei weitem nicht soviel Informationen zur Gletschergeschichte liefert wie Nr. 642. 1958 verglich der Verfasser in der Nähe des vermutlichen Standortes eine Bildkopie mit dem Gelände. Wie bei Schlagintweit üblich, ist der Vordergrund nicht naturgetreu, sondern nur landschaftstypisch als Staffage dargestellt. Dagegen lassen sich Rippen und Rinnen im Einzugsgebiet des Bazhingletschers gut identifizieren. Die jetzt bestehende totale Schuttüberdeckung des Gletschers bestand noch nicht. Zwei Mittelmoränenstreifen auf dem Bild existieren seit mindestens 1934 nicht mehr. Sie sind auch auf dem Damerpanorama sehr deutlich dargestellt. Wahrscheinlich deuten die von Schlagintweit wiedergegebenen Blankeisoberflächen am Chungpar und am Bazhin auf eine damals bestandene schnellere Eisbewegung und damit Vorstoß-tendenz. Für eine Feststellung der seitherigen Höhenänderung der Zungenoberfläche ist das Bild mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zu verwenden.

Seit Prof. Dorrer, damals noch als Assistent am Institut für Photogrammetrie, vom damaligen Institutsleiter Prof. Finsterwalder mit der Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen aus dem Jahre 1958 zur Feststellung der Änderungen 1934-58 von sechs Nanga-Parbat-Gletscherzungen befaßt

war, lagen Messungen an Bildern aus dieser Himalayagruppe in seinem Interessenbereich. Damit hängt zusammen, daß er 1986 für zwei Gemälde Schlagintweits – das Diamer-Panorama und Bild Nr. 642 – im Rahmen einer Diplomarbeit die Bildgeometrie untersuchen ließ [Galonska, 1987].

Diese zwei Landschaftsgemälde sind im Hinblick auf ihre Genauigkeit wesentlich verschieden. Mit »Panorama« bezeichneten die Schlagintweits Bilder, aus denen sie später »Gebirgsprofile« zur Orographie des Landes zusammensetzten und für die sie von einer Basis aus mit dem Theodolit Horizontal- und Höhenwinkel zu markanten Punkten – meist auf Gebirgskämmen – maßen. Ein Winkelgrad wurde dann maßstäblich mit einem angegebenen Seiten- und Höhenabstand – meist 1 bis 3 cm – wiedergegeben. »In den Originalen ist 1 Winkelgrad meist über 1 cm, in einigen 3 cm, ... lassen sich (aus den Panoramen) auch Winkel messen; natürlich nicht, um Höhen zu rechnen, aber doch um sie zu schätzen« [Schlagintweit, 1871, S. 257]. Horizontal wurde also das vom Maler Gesehene auf einen Zylindermantel abgebildet, vertikal kann das nur für begrenzte Höhenwinkelerstreckungen gelten, oder es muß der Tangens berücksichtigt werden. Schlagintweit dachte auch an eine Kugelabbildung (»cyclic«). Wichtig ist nun, daß das *Satschéngemälde* nicht als »Panorama« konstruiert wurde, sondern lediglich eine Ansicht dieses typischen Kesselgletschers und seiner Umgebung wiedergeben sollte. Die Schlagintweits nannten solche Bilder »views«, zum Unterschied von den Panoramen. Die Richtungen zu markanten Punkten hat Schlagintweit vermutlich freihand mit Hilfe von Visuren über Bleistiftabschnitte auf sein Arbeitspapier an der Staffelei gebracht und weiter mit Streckenverhältnissen gearbeitet. Es kann also nicht die gleiche Genauigkeit erwartet werden wie beim Diamerpanorama.

Galonska fand nach mehreren Ausgleichungen von Rückwärtsschnitten, zuletzt aus 13 identifizierten Punkten, den Standort Schlagintweits vor dem Satschéngletscher – in der Lage mit einer achtfach größeren Unsicherheit als beim Diamerpanorama:

$$y = 481310 \text{ m} \pm 27 \text{ m},$$

$$x = 910685 \text{ m} \pm 14 \text{ m},$$

$$H = 3718 \text{ m} \pm 95 \text{ m}.$$

Das Ergebnis war hinsichtlich der Höhe unbefriedigend. Auch die von Galonska abgeleitete 90 m-Höhe der 1856 bestandenen rechten Ufermoräne über dem Sango-See erschien unsicher. Dabei hatte er aus den Bildordinaten ausschließlich der Gipfelpunkte im Bildhintergrund den Vertikalmaß-

stab für das ganze Bild extrapolieren müssen. Der Bildmaßstab in vertikaler Richtung war aus den Ordinattendifferenzen von 13 Punkten auf dem Gipfelkamm mit 2.96 Gon/cm um 0.40 Gon/cm größer als derjenige in horizontaler Richtung gefunden worden. Die damit errechnete Moränenhöhe könnte z. B. deswegen zu groß sein.

Nach der Diplomarbeit von Galonska blieben im Hinblick auf die Moränenhöhe und damit auf den 1856er Stand des Satschéngletschers Zweifel. Bei einem Gespräch darüber im Hause Dorrer äußerte Frau Dorrer: »Warum nicht hingehen und an Ort und Stelle alles aufklären?« Aus dieser Idee entstand schließlich ein erweitertes Programm für eine Expedition 1987, nämlich außer dem Aufsuchen von Standorten Schlagintweits (bei seinem Diamerpanorama, beim Satsché, bei seiner Eisgeschwindigkeitsmessung am Chungpar und bei seiner Bestimmung der Länge des Rupalgletschers) auch die Änderungsmessungen an sechs Nanga-Parbat-Gletschern nach 24 Jahren (1934-1958) nun, nach weiteren 29 Jahren (1958-1987), fortzusetzen. Prof. Dorrer hatte dazu die Idee, außer zwei TAF-Phototheodoliten auch eine Rolleiflex SLX Kamera mitzunehmen und mit ihr Vergleichsaufnahmen von den vermuteten Standorten Schlagintweits aus zu machen. Galonska hatte geschrieben [Galonska, 1987, S. 53]: »Für genauere Aussagen wäre besseres Kartenmaterial nötig, oder man müßte den Ort selber aufsuchen und einen Geländevergleich durchführen.«

Zurück von den Aufnahmen am Nanga Parbat (22.8.-25.9.1987) befaßte sich Dorrer wieder kritisch – an Hand der genannten Diplomarbeit – mit der Bildgeometrie der zwei Landschaftsgemälde, dem Diamerpanorama und dem Satschéngletscherbild [Dorrer, 1989]. Die Hauptschwierigkeit für eine zuverlässige Bildauswertung bestand darin, daß sich »im Vordergrund ... kaum Homologien erkennen lassen« [a. a. O., S. 36]. Die Bildmaßstäbe mußten ausschließlich aus der Abbildung der Hintergrundpunkte abgeleitet werden. Dabei »scheint die Karte in diesem Gebiet geometrisch weniger zuverlässig zu sein als sonstwo« [a. a. O., S. 35]. Die Rolleiflex-Vergleichsaufnahmen von 1987 waren noch nicht ausgewertet und deswegen die Ergebnisse von Dorrer ausdrücklich als »noch vorläufig« bezeichnet worden [a. a. O., S. 37].

Daraufhin wurde die kritisierte Kartendarstellung für den Tasching-Chongma-Ramakamm in einigen für die Bildauswertung wichtigen Punkten verbessert. Das betreffende Gebiet ist aus relativ großer Distanz, nämlich aus 13-17 km von Standlinie 14/1934 her stereophotogrammetrisch erfaßt worden. Finsterwalder gibt als Beispiel für die in die-

sem Gebiet ungenauere Karte für den mittleren Chongra Peak (6455) einen theoretisch zu erwartenden Lagefehler von 23 m oder 0.5 mm auf der Karte an [Finsterwalder und Jung, 1938, S. 25]. Für den hier besonders interessierenden Ramakamm im Bildhintergrund über dem Satschén beträgt bei der wirksamen Basis der Standlinie 14 das Basis-Distanz-Verhältnis 1:17, nahe an der Grenze von etwa 1:20 für einen noch guten Stereoeffekt.

Die Genauigkeit dieser Auswertung ließ sich meßtischphotogrammetrisch durch Einschneiden einzelner Gipfel von den A-Punkten der Standlinien 14, 22, 3 und 5 wesentlich verbessern. Dazu wurden die Richtungen durch Ausmessung der noch vorhandenen Original-Topoplatten aus dem Jahr 1934 am Komparator gewonnen. Weiter ergab eine Durchmusterung des »Triangulation Pamphlets« für das Blatt 43 I, daß die Kammgipfel mit den Kartenkoten 5150, 5630 und 5124 (= Schlagintweits »Eckenberg« in seiner Skizze vom Zung-Gletscher) mit den »Intersected Points« Pk. 98, Pk. 97 und Pk. 95/431 der Indischen Landesvermessung [Survey of India, 1923, IV] identisch sind. Sie waren 1900/01 für eine nachfolgende Meßtischaufnahme trianguliert worden. Die damals bestimmten geographischen Koordinaten wurden jetzt in das Gauß-Krüger-System des 1934er Netzes umgerechnet. Dieses ist mit den gemeinsamen Punkten Chamuri und Khoijut in das Indische Landessystem eingebunden. Survey of India hatte mit Dreiecksketten vom indischen Tiefland herauf auf dem Everestellipsoid von 1830 gemessen und gerechnet. Nach 1934 erfolgte die Umrechnung der geographischen Koordinaten der Survey-Punkte in Gauß-Krüger auf dem Bessel-, anstatt auf dem Everestellipsoid. Dies verkleinerte alle Hochwerte gleichmäßig um 44.6 m, die Rechtswerte änderten sich um weniger als 1 m. Dadurch, daß nun die Survey-Punkte von 1900/01 mit den gleichen Bessel-Erddimensionen transformiert wurden, sind sie vom Koordinatensystem her homogen mit dem 1934er Netz, und die darauf basierende Karte kann mit den Aufnahmen von 1900/01 verglichen werden.

Dabei ergab sich, daß die meßtischphotogrammetrisch neu bestimmten Positionen wesentlich besser mit den Survey-Koordinaten übereinstimmen als die Kartenpositionen von 1934. Der Koordinatenabstand zwischen Karte und Survey verringerte sich beim Punkt »5124« von 123 m auf 28 m, bei »5630« von 35 m auf 15 m. Die Neubestimmung verschob die Kammgipfel in Blickrichtung des Gemäldes Nr. 642 um Werte zwischen 30 m und 140 m, wobei die Verschiebungsvektoren in

dieser Richtung konvergieren. Die anschließende Neubestimmung des Standortes von Schlagintweit ergab eine 185 m größere Distanz vom Gletscher. Dabei war allerdings der horizontale Bildmaßstab Galonskas unverändert übernommen worden. Die Höhenkoten der 1934er Karte änderten sich von »5150« auf 5112 m, von »5630« auf 5601 m und von »5124« auf 5088 m. Die durchschnittliche Minderung der Höhen um 34 m bestätigte sich bei einem umfangreicheren Vergleich (27 m).

Nach dieser Verbesserung der Karte wurden für eine zuverlässigere Standortbestimmung für das Gemälde Vergleichsfotos herangezogen. Dazu stand zunächst ein Color-Diapositiv aus ca. 3600 m vom 8. September 1958 morgens zur Verfügung, bei dem die Gipfel noch frei waren. Diese kommen nämlich häufig spätestens ab 11 Uhr in Wolken. Schließlich sollten die Vergleichsaufnahmen mit der Rolleiflex von 1987 präzisere Auswertungen erlauben. An drei Punkten oberhalb des Sango-Sees wurden von Dorrer Teilpanoramabilder fotografiert. Obwohl das schon um 7 Uhr morgens am 11. September geschah (das 1856er Gemälde war übrigens auch an einem 11. September entstanden!), waren doch schon wichtige Vergleichspunkte am Kammhorizont von Bewölkung verschleiert. Trotzdem konnte eine Rückwärtsschnittausgleichung für den ersten der Standpunkte durchgeführt werden. Dazu war die Rolleiflex am Institut Dorrers kalibriert worden, u. a. war die radialsymmetrische Verzeichnung bestimmt worden. Schließlich wurde aus dem Winkelvergleich der gesuchte Standort Schlagintweits relativ zum Rolleiflexstandpunkt ermittelt. Im Ergebnis verschob sich der von Galonska nach seiner dritten Ausgleichung gefundene Wert in Blickrichtung um 214 m weiter weg vom See, quer zur Blickrichtung nur um 7 m. Darin ist die Auswirkung der Kartenverbesserung, sind also obige 185 m enthalten. Es bestätigte sich, daß der Standort in Blickrichtung des Gemäldes mindestens doppelt so unsicher ist – drei oder mehr Zehnermeter – als quer dazu. Noch unsicherer wird eine Rekonstruktion der Standorthöhe aus dem Bild. Die Höhe wird besser aus der Lage zwischen den Höhenlinien der Karte bzw. des Autographenplanes 1:33333 von 1934 gefolgert. Die Gegend ist hier zuverlässiger dargestellt, nämlich aus großer Nähe von Walter Raechls Standlinie 113/114 aus kartiert. Der zuletzt gefundene Standort wäre demnach in 3820 m gewesen. Wegen der unsicheren Lage bleibt auch die Höhe um über 10 m unsicher.

Das Hauptproblem für eine Standortbestimmung und überhaupt für eine Bildanalyse ist der unbekannte Maßstab in diesem Bild, das kein Panorama im Sinne Schlagintweits ist. Diese Schwierigkeit

läßt sich aber dadurch umgehen, daß nicht Strecken, sondern vertikale *Streckenverhältnisse* verglichen werden. Dadurch wird der Bildmaßstab entbehrlich. Als Voraussetzung bleibt lediglich, daß überhaupt ein einigermaßen einheitlicher Maßstab für die Höhenwinkel für das Gebiet nahe um die Hauptvertikale in Anwendung kam. Der Unterschied zwischen Höhenwinkel und dem Tangens und eine eventuelle Bildneigung können hierbei vernachlässigt werden.

Untersucht wurde das Verhältnis der vertikalen Bildstrecke a (= vom Fuß der rechten Moräne (Seeufer) bis zum Gegenufer des Gletschers) zu b (= Hintergrundhang bis zu »5124«). Bewußt wurde nicht die Höhe der Ufermoräne allein herangezogen, da deren Oberrand im Bild unsicher erscheint. Es kann nämlich sein, daß der obere Teil des dunklen Abschnittes nicht zur Moräne gehört, sondern schon zum Gestein, und wegen der Schuttbedeckung dunkel dargestellt ist. Bei vorrückenden Gletschern wölbt sich nämlich die Eisoberfläche schon vom Rand her hoch über die in der Aufschüttung begriffene Randmoräne.

Bei der gegenwärtigen Situation, wie sie nachweislich nur geringfügig verändert seit 1900/01 besteht, bildet sich auf der Rolleiaufnahme das Verhältnis $a:b$ wie $1:1.16$ ab (Abb. 1 und 2). Die im Gemälde von 1856 auf der gleichen Vertikalen liegenden Streckenabschnitte a' und b' erscheinen wie $1:3.65$, d. h. die Höherstreckung von Moräne und Gletscher bildete sich damals nur mit $1/3$ der heutigen ab. Dies gilt zunächst, wenn Schlagintweit vom Rolleistandpunkt 1987 gemalt hätte:

$$y = 481044 \text{ m,}$$

$$x = 910892 \text{ m,}$$

$$H = 3548 \text{ m,}$$

also 600 m vom heutigen Moränenfuß beim Sango Sar entfernt. Von dem von *Galonska* gefundenen Standort, nämlich in 3718 m, in weiteren 325 m Abstand von der Moräne, hätte Schlagintweit die heutige Situation mit $a:b = 1:0.97$ gesehen. Wäre er aber noch weiter oben gewesen – was wegen der ihm zur Verfügung gestandenen Zeit sehr unwahrscheinlich ist –, bis oben auf dem Bulankamm (4260 m), hätte er die heutige Situation mit $a:b = 1:1.17$ gesehen. Diese Verhältnisse sind aus den Höhenkoten und Strecken in $1:50000$ berechnet bzw. aus Fotos gefolgert.

Es bleibt also dabei, daß die sichtbare Gletscheroberfläche einschließlich rechter Ufermoräne in Schlagintweits Gemälde relativ zum Hintergrundhang mit $1/3$ der modernen Mächtigkeit dargestellt ist, wobei diese Aussage *unabhängig von möglichen Varianten in den Annahmen für den Standort* Schlagintweits ist. Dazu waren auch seitlich bis um 100 m abweichende Standorte untersucht worden – mit dem im wesentlichen gleichen Ergebnis: Mittel für $a:b$ (20. Jahrhundert) ist $1:1.14$ mit maximaler Abweichung von 0.17. Berücksichtigt war, daß der Gletscher an seinem linken Ufer um 250 m weniger breit gewesen war, da der Ausbruch links jünger erscheint als 1856.

Eine zuverlässige Berechnung der Moränenhöhe von 1856 ist aus dem Bild nicht möglich, weil die Entfernung vom Standpunkt zum Fuß der damals

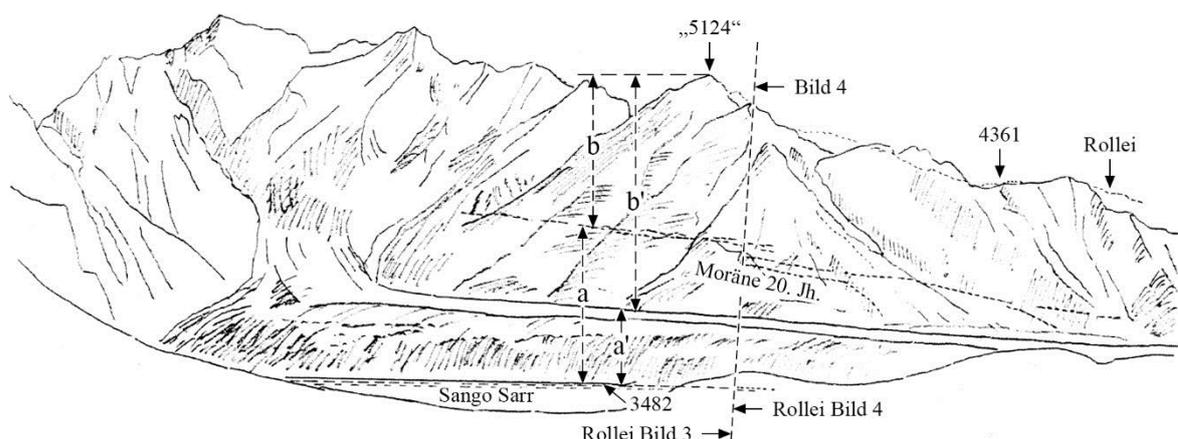


Abb.1: Satschéngletscher, Nanga Parbat – Linker und rechter Gletscherrand im 20. Jahrhundert aus Rolleiflexphotos S 5-1, 3548 m, interpoliert in Schlagintweits Gemälde von 1856; daraus: Moräne über See 3.3 mal höher als 1856, aus Schlagintweits Höhenangaben ca. 5 mal höher; Voraussetzung: Seehöhe im 20. Jahrhundert = Seehöhe von 1856. Verschiedene mögliche Standpunkthöhen Schlagintweits 1856 verändern nachweislich a/b (20. Jh.) gegen a'/b' (1856) nicht wesentlich.

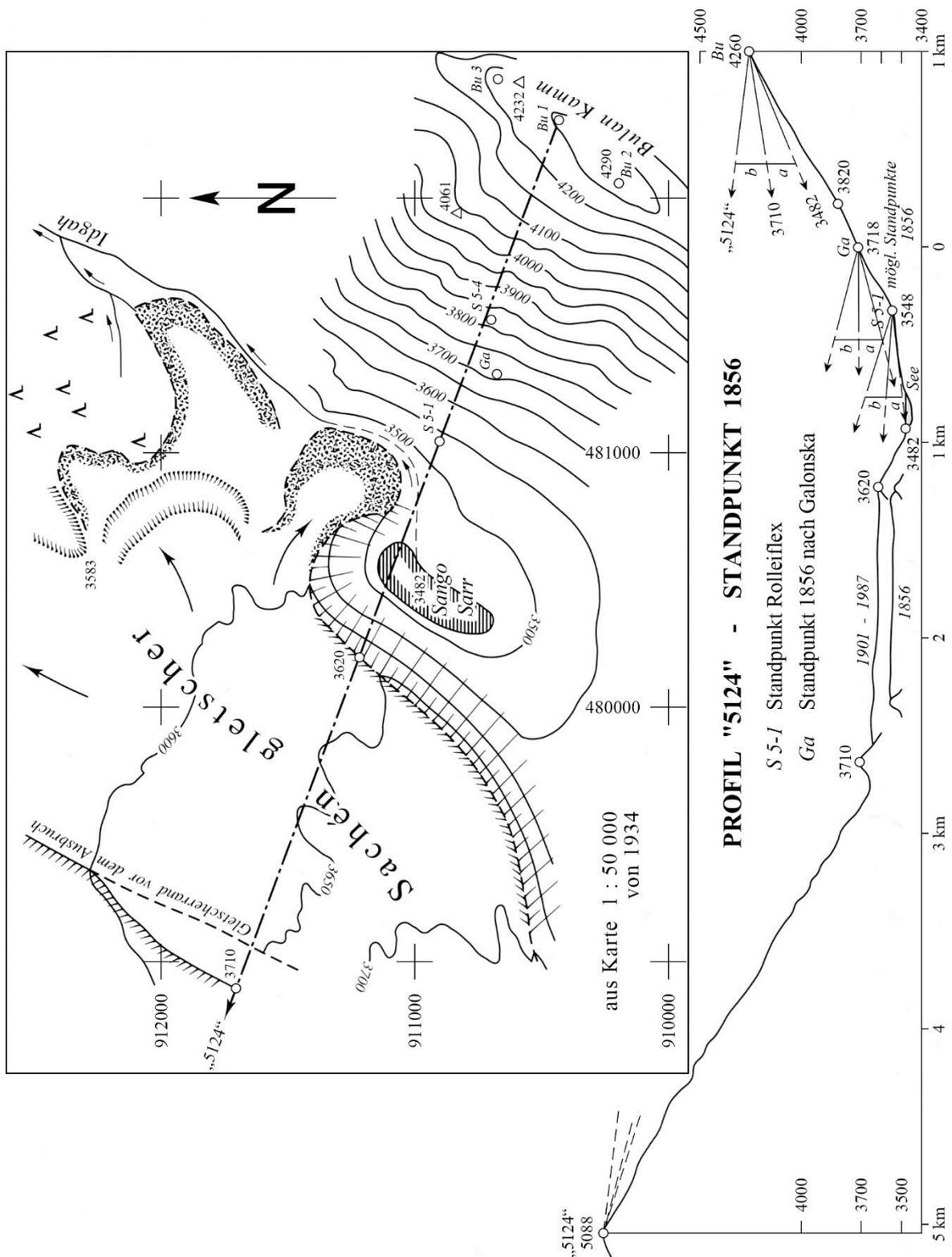


Abb. 2: Profil »5124« – Standpunkt 1856

viel niedrigeren Moräne nicht feststeht. Im Vergleich zur Abbildung der heutigen 140 m bis 150 m hohen Moräne bildete sich die damalige nur mit weniger als dem vertikalen Bildwinkel

ab. Nimmt man die Distanz zum *Moränenkamm* als gleich geblieben an, dann muß der Moränenfuß (= Seeufer) um grob 200 m näher am Gletscher und wegen des Geländes um zwei oder mehr Zeh-

nermeter tiefer gewesen sein. Unter plausiblen Annahmen errechnet sich eine damalige Moränenhöhe von maximal 70 m. Nimmt man aber nur den unteren Teil der dunklen Fläche im Bild als Moräne, so wäre diese eben nur etwa 35 m gewesen. Wichtiger ist das dargestellte Niveau der Gletscheroberfläche von 1856. Es ergibt sich an der Stelle dieses Profiles zu *rund 80 m niedriger* als für 1987 (um 20 m ist hier der Moränenfuß tiefer angesetzt), und damit für fast das ganze 20. Jahrhundert. Denn von 1901 bis 1934 sank die Zungenoberfläche im Mittel weniger als die Unsicherheit im Vergleich von vier 1901 triangulierten Oberflächenpunkten, d. h. um weniger als 6 m; von 1934 bis 1958 um 3.1 m, von 1958 bis 1987 um 1.2 m. Die beiden letzten Werte gelten für jeweils 3.7 km² der Zungenoberfläche. In fast 90 Jahren sank die Gletscheroberfläche im Mittel nur um weniger als 1.0 m.

Für die Moränenhöhe wird das Ergebnis aus dem Bild durch eine Notiz Schlagintweits in seinem Feldbuch [*Schl'ana II.1, Bd. 8, S. 139*] ergänzt: »... *Sehr große, alte Randmoränen gegen Sangu Sarr sehr hoch (60-90 E. Fuß)* ...«. Das wären rund 20 m bis 30 m. Es ist unwahrscheinlich, aber doch nicht auszuschließen, daß Schlagintweit hier »E. Fuß« aus Gewohnheit schrieb, aber in Wirklichkeit Meter geschätzt hatte. Am gleichen Tag war er nämlich – etwas talauf vom See aus – auf den Moränenkamm gestiegen, um von dort von einer Basis die Gletscherbreite zu bestimmen (Ergebnis: 940 m; Ausbruch über die linke Moräne bestand noch nicht). Die Schätzung der Moränenhöhe wird am ehesten von diesem Aufstieg stammen. Die besagte Basis maß er aber mit »*AB = 24½ Met - 24¾ Met*« [*II.1, Bd. 8, S. 56*], also diesmal nicht in Engl. Fuß, wie in den meisten anderen Fällen. Weiter spricht für Meter, daß er in seiner Angaben die Moräne für »*sehr hoch*« hielt. Mit 60 bis 90 Metern hätte er wesentlich näher so geschätzt, wie oben aus dem Bild auf 35 m bis 70 m gefolgert wurde. Für Schlagintweit waren Meter und Fuß gleichermaßen geläufige Längemaße. So hatten Hermann und Adolph z. B. im Mai 1848 den Höhenunterschied zwischen München und der Benediktenwand mit dem Barometer gemessen und das Ergebnis zusammen mit weiteren Höhen in Meter angegeben. Auch ihre Messungen an Pasterze, Vernagt, Hintereis in den Jahren 1847 und 1848 erfolgten alle in Meter. In Indien und Hochasien bevorzugten sie wegen der Engländer die »Engl. Fuß«, verwendeten aber auch Meter-Angaben, z. B. am Milumgletscher [*II.1, Bd. 21, S. 185*]. Gegen die heutige Moränenhöhe von 140 m bis 150 m bleiben aber alle Werte für 1856

nur halb so groß oder noch kleiner, gleich ob Schlagintweit Fuß oder Meter gemeint hatte.

Als *sicheres Ergebnis* aus Bildanalyse und Schlagintweits Schätzung bleibt in jedem Fall, daß der Satschéngletscher 1856 noch *weit* vor seinem letzten Maximum gewesen war, wie es heute durch seine Ufermoräne dokumentiert ist. Dazu mußte die Gletscheroberfläche noch ca. 80 m höher werden. Diesen letzten Hochstand wird der Satsché erst kurz vor der Jahrhundertwende erreicht haben. Jedenfalls war 1900/01 die Moränenhöhe schon so wie heute. Für einen trigonometrischen Standpunkt auf dem Moränenkamm haben englischen Surveyors uns eine Höhenangabe aus dem Jahr 1901 hinterlassen, die dies einwandfrei beweist. Danach blieb die Satschéoberfläche erstaunlich stationär, obwohl andere Nanga-Parbat-Gletscher – z. B. Chungpar und Bazhin – sich erheblich zurückzogen.

Dies führt zu folgender glaziologischer Interpretation: Das Verhalten des Satsché im 20. Jahrhundert kommt bei schuttbedeckten Gletschern in Hochasien öfter vor. Nach ihrem letzten Vorstoß blieben sie längere Zeit – einige Jahrzehnte – stationär, ehe sie sich langsam dem allgemeinen Rückgang anschließen. Auch daß der letzte größte Vorstoß lange nach dem in den Alpen, also nach der Mitte des 19. Jahrhunderts, stattfand, kennt man z. B. beim Batura, Fedtschenko, Minapin, Chogo Lungma und einigen Pamirgletschern. Im Falle des Satsché ist eine starke Schuttanhäufung durch eine Querbarriere, einen Felsriegel, vor seiner Stirn bedingt. Durch diese morphologische Besonderheit gabelt sich sein Zungenende in vier Verzweigungen und die Abfuhr von Schutt wird verhindert. Aus den Wänden um den oberen Teil (Kesselgletscher) fällt enorm viel Schutt auf den Gletscher. Er kann nur an der Sohle und an den Ufermoränen aufgelagert werden. Der Satsché erfuhr seine starke Aufhöhung nicht allein aus einer positiven Massenbilanz aus Schnee und Eis, sondern auch durch Vergrößerung seines Schuttvolumens. Mächtige Schuttakkumulationen an Gletschersohlen kommen auch – seltener – in den Alpen vor, z. B. sind ca. 100 m beim Grubengletscher im Wallis durch elektrische Widerstandsmessungen nachgewiesen [*Haerberli, 1984*]. Ähnlich mächtige Schuttsedimentationen beobachtet man an den »Dammgletschern«, so am Scheigiri und Tap am Nanga Parbat. Dort kommen sie anders zustande als beim Satsché. Für die meisten Gletscher in Hochasien ist – wegen der jungen Tektonik – eine viel stärkere Schutführung als bei Alpengletschern eines der auffallendsten Phänomene.

Zur Bedeutung des Satschéngemäldes läßt sich abschließend feststellen: Wenn man nicht zu hohe

Anforderungen an genaue, zahlenmäßige Informationen stellt, dann bleibt die Darstellung Schlagintweits ein im wahrsten Sinne des Wortes *einzigartiges historisches Dokument* für die Gletschergeschichte Hochasiens. Aus der Literatur oder aus Bildern ist kein ähnlich aussagekräftiges, zeitgenössisches Zeugnis für das bekannt, was heute fast nur noch aus Moränen erschlossen werden kann. Das Gemälde beweist, daß der Satschéngletscher erst lange nach 1856 seine gegenwärtige Mächtigkeit erreicht hat. Demgegenüber ist aus den Alpen kein Gletscher bekannt, der sich ebenso verhalten hätte, der also um die Mitte des 19. Jahrhunderts kleiner gewesen wäre als im 20. Jahrhundert. Das Satschéngemälde belegt, was indirekt das heute in den asiatischen Hochgebirgen häufig zu beobachtende geringe Absinken der Gletscheroberfläche unter den Kamm der Großen Ufermoräne nahelegt: Das Abklingen des Little Ice Age geht bei einem Teil der Eismassen Hochasiens um mehrere Jahrzehnte langsamer vor sich als in den Alpen.

Literatur

- Bechthold, F. [1935]:* Deutsche am Nanga Parbat. Der Angriff 1934. Verlag F. Bruckmann, München, 67 S.
- Dorrer, E. [1989]:* Zur Bildgeometrie von Landschaftsgemälden. Bildanalysen am Beispiel zweier Gletschergemälde von Schlagintweit aus dem Jahre 1856. – In: Festschrift Wilhelm Kick. Acta Albertina Ratisbonensis, Band 46, Regensburg, S. 29-38
- Finsterwalder, R. et al. [1935]:* Forschung am Nanga Parbat. Deutsche Himalaya-Expedition 1934. Sonderveröffentlichung der Geographischen Gesellschaft zu Hannover. Verlag Helwing, Hannover, 143 S.
- Finsterwalder, R., Jung, H. [1938]:* Die geodätischen, gletscherkundlichen und geographischen Ergebnisse der Deutschen Himalaya-Expedition 1934 zum Nanga Parbat. Schriften der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Neue Folge, Band 2. Verlag Karl Siegmund, Berlin, 201 S.
- Galonska, A. [1987]:* Zur Bildgeometrie von Landschaftsgemälden. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Professur für Photogrammetrie, Neubiberg, 116 S.
- Haerberli, W. [1984]:* Electrical Resistivity Soundings of Glacier Beds. Journal of Glaciology, Vol. 30, Cambridge, S. 373-376
- Kick, W. [1960]:* 100 Jahre Nanga-Parbat-Gletscher. Urania Universum, Band 6, Leipzig/Jena, S. 42-50
- Müller, C. C., Raunig, W. (Hrsg.) [1982]:* Der Weg zum Dach der Welt. Pinguin-Verlag, Innsbruck, und Umschau-Verlag, Frankfurt/Main, 407 S.
- Schlagintweit-Sakünliński, H. von [1871]:* Der Himalaya von Bhutan bis Kaschmir. Reisen in Indien und Hochasien. Eine Darstellung der Landschaft, der Cultur und Sitten der Einwohner, in Verbindung mit klimatischen und geologischen Verhältnissen. Basirt auf die Resultate der wissenschaftlichen Mission von Hermann, Adolph und Robert von Schlagintweit, ausgeführt in den Jahren 1854-1858. 2. Band. Costenoble, Jena, 468 S.
- Schlagintweit-Sakünliński, H. von [1872]:* Tibet; zwischen der Himalaya- und der Karackorum-Kette. Reisen in Indien und Hochasien. Eine Darstellung der Landschaft, der Cultur und Sitten der Einwohner, in Verbindung mit klimatischen und geologischen Verhältnissen. Basirt auf die Resultate der wissenschaftlichen Mission von Hermann, Adolph und Robert von Schlagintweit, ausgeführt in den Jahren 1854-1858. 3. Band. Costenoble, Jena, 335 S.
- Schlagintweitiana* der Bayerischen Staatbibliothek München
- Survey of India [1923]:* Triangulation in India, Sheet 43 I (Gilgit). Dehran Dun, 44 S.

Bildfundstellen

Das Gemälde von 1856 ist in einer Beilage zu *Dorrer [1989]* in schwarzweiß dem Rolleiflex-Teilpanorama von 1987 gegenübergestellt, in *Kick [1960]* einem Foto von 1985 und im Jahrbuch des Deutschen und des Österreichischen Alpenvereins 1957 einem Meßbild von 1934.

Geographische Informationssysteme aus der Sicht der Photogrammetrie

Zusammenfassung

Geographische Informationssysteme sind heute von zentraler Bedeutung. Sie sichern den Raumbefugnis für allgemeine Datensysteme. Während leistungsfähige Hard- und Softwarelösungen existieren, ist ihr Datenbestand noch mangelhaft und nur kostspielig zu beschaffen. Satellitensysteme und Luftbildaufnahmen bieten verbesserte Möglichkeiten zur Datenbeschaffung und Datennachführung. Der Vorteil der Geographischen Informationssysteme liegt in der Integrierbarkeit von Daten. Hierzu ist ein multidisziplinärer Aufwand erforderlich.

Summary

Geographic Information Systems are of central importance today. They permit spatial coordination for general data systems. While efficient hard- and software solutions exist, the data content is still lacking and costly to acquire. Satellite systems and aerial surveys offer improved possibilities for data collection and data updates. The advantage of

geographic information systems rests with their capabilities for data integration. For this purpose multidisciplinary efforts are required.

1. Einleitung

Eingeleitet durch die Entwicklung der Rechner-technik von der Lösung algebraischer Aufgaben zur Computergraphik, zur digitalen Bildverarbeitung und zur Datenbankverwaltung befindet sich das gesamte Geoinformationswesen, zu dem auch das Vermessungswesen gehört, in einem Umbruch. Dies ist in Abb. 1 dargestellt.

Während es vor dieser Entwicklung noch möglich war, ein Kartenwerk als Modell der Umwelt zu betrachten, das die Basis für Planung und Verwaltung der nachhaltigen Entwicklung eines Landes oder einer Region bereitstellte, und während die Aufgabe der Kartenherstellung in einzelne spezialisierte Arbeitsabläufe (Geodät und Vermessungsingenieur, Photogrammeter, thematischer Spezialist, Kartograph) unterteilt werden konnte, sind durch die fortgeschrittene Computertechnik Alternativmöglichkeiten zur Erfassung, Verwaltung und

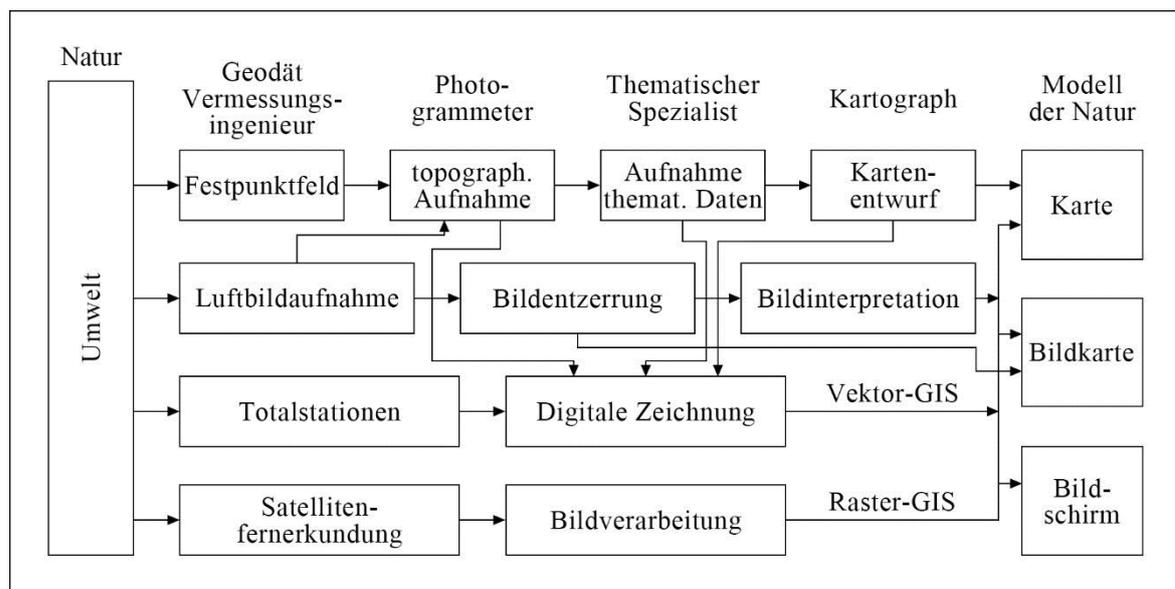


Abb. 1: Das Geoinformationswesen

Visualisierung von Umweltdaten geschaffen worden, welche nicht nur die spezialisierte berufsbezogene Struktur, sondern auch die zur Planung und Verwaltung benötigten Daten in alternativen Formen verfügbar gemacht haben.

Zentrales Thema sind heute die geographischen Informationssysteme, welche es erlauben, Daten verschiedener Herkunft zu sammeln, zu verwalten, zu analysieren, zu integrieren und in verschiedener Form anschaulich zu machen (Karte, Bild, Bildschirm), gleichgültig, ob es sich um Vektordaten, Rasterdaten oder um Attribute von punkt-, linien-,

flächen- oder raumbezogenen nichtgraphischen Daten handelt.

Die Integration von landschaftsbezogenen Umweltdaten mit personenbezogenen und wirtschaftsbezogenen Daten steht unmittelbar bevor, wenn man sich bisher vorrangig auch noch mit der Erstellung zweckgebundener Informationssysteme befaßt. Die entwickelten geographischen Informationssysteme (Geoinformationssysteme) gliedern sich in folgende Gruppierungen auf:

- topographische Informationssysteme zur Automation der topographischen Kartographie und

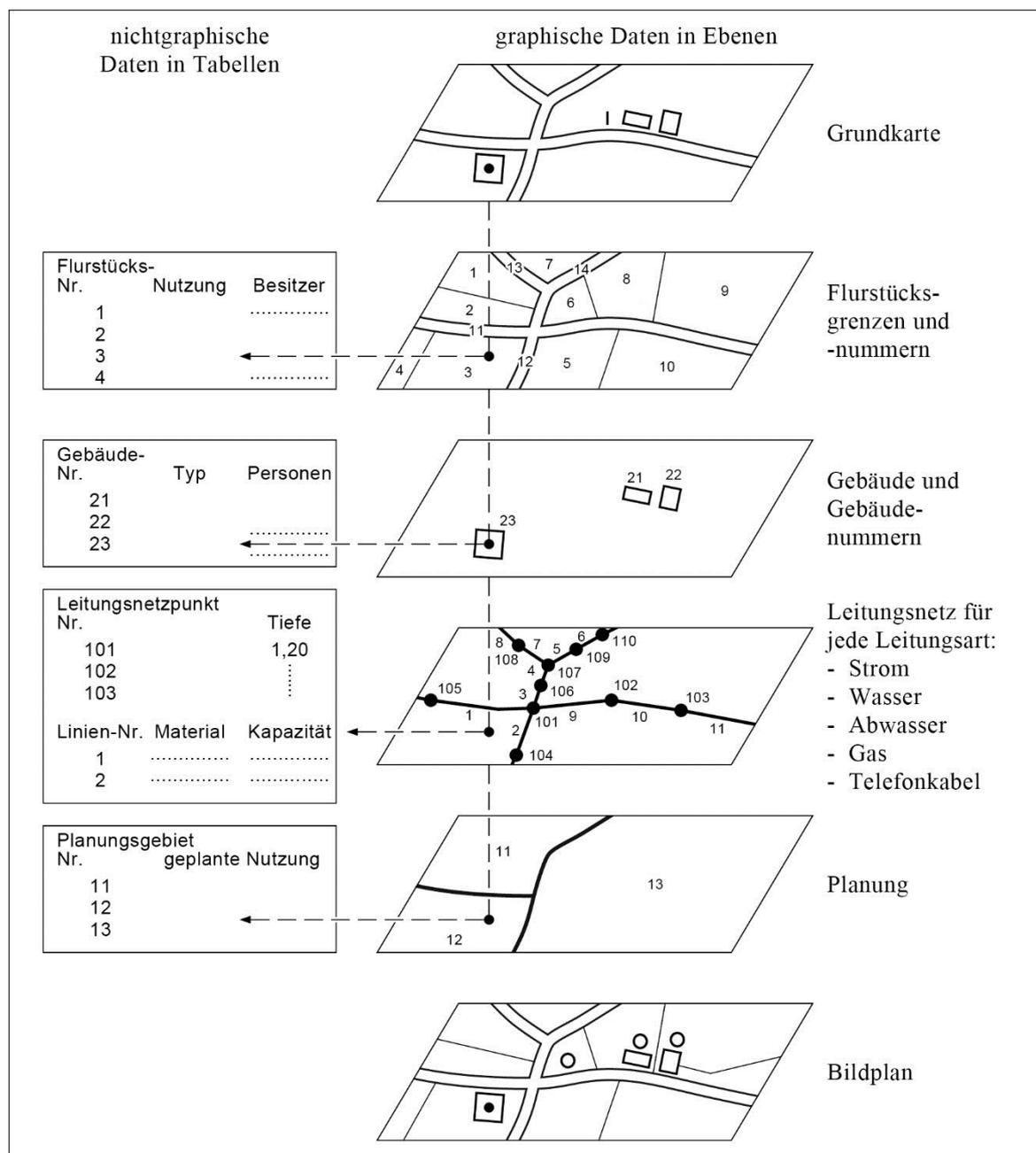


Abb. 2: Datenstruktur in geographischen Informationssystemen

Zur Sicherung des allgemeinen Raumbezugs für Landnutzung und Statistik

- Landinformationssysteme zur Regelung des Liegenschaftswesens
- städtische Informationssysteme zur Ver- und Entsorgung
- Umweltinformationssysteme zur Speicherung und Analyse von Umweltdaten
- Planungsinformationssysteme zur Planung spezieller Aufgaben (Verkehr, U-Bahnbau, Flughafenbau).

Zur Erklärung des Raumbezugs von Daten wird normalerweise die Darstellung in Abb. 2 benutzt.

Die Graphik unterschiedlicher Themenbereiche ist in graphischen Ebenen enthalten. Die graphi-

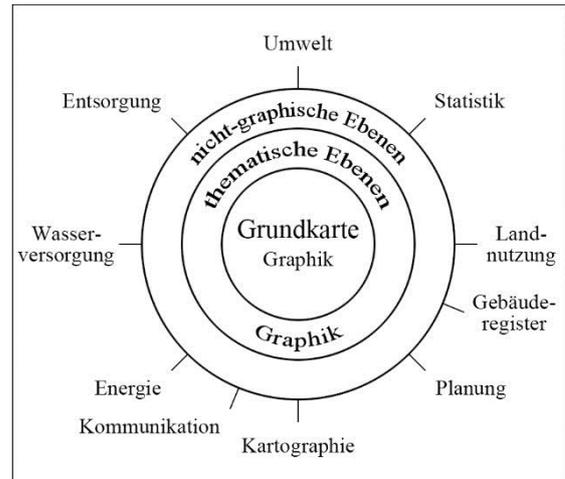


Abb. 3: GIS aus der Sicht des Vermessungsingenieurs

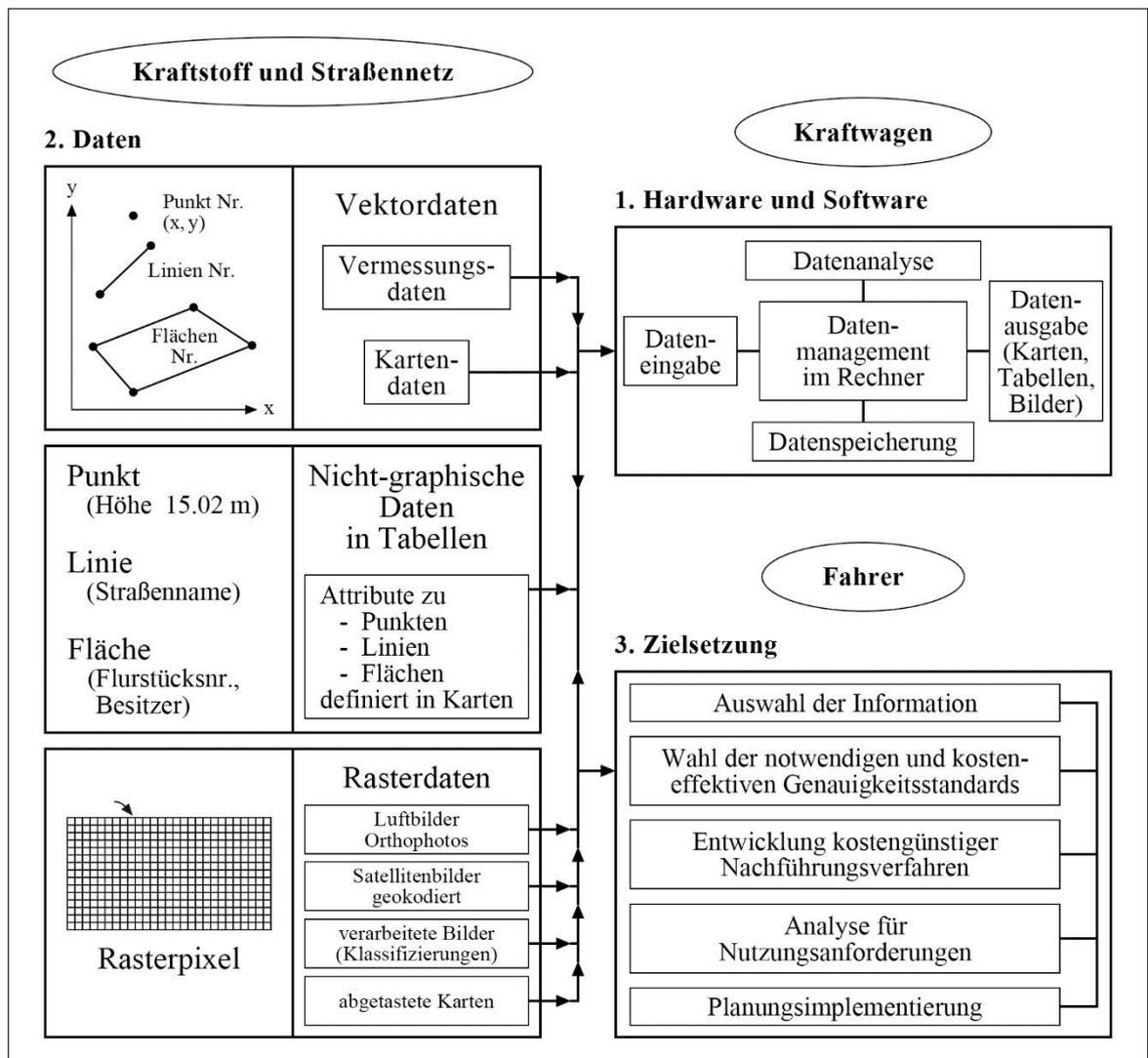


Abb. 4: Die wesentlichen Komponenten eines raumbezogenen Informationssystems

schen Elemente sind entweder Vektorgraphiken (Punkte, Linien) oder Rasterelemente (Bilder). Werden diese Elemente durch Numerierung oder ihre topologischen Eigenschaften gekennzeichnet, so können sie mit nichtgraphischen Daten, welche in Tabellen abgelegt sind, verknüpft werden.

Die Vorstellung eines idealen GIS aus der Sicht des Vermessungsingenieurs ist in Abb. 3 gekennzeichnet.

Zentraler Bestandteil eines GIS ist die Grundkarte, auf deren Graphik thematische Daten beruhen und mit welcher nicht-graphische Daten für die Summe der Anwender verknüpft sind.

Aus übergeordneter Sicht, wie sie in Abb. 4 dargestellt ist, ergeben sich jedoch drei wesentliche Komponenten eines raumbezogenen Informationssystems:

- das vom Hersteller gelieferte Hardware- und Softwaresystem,
- die Daten in Vektor-, Raster- und Tabellenform,
- die Datenstrategie.

Die Hardware- und Softwarekomponenten können verglichen werden mit dem Kauf eines Kraftwagens. Der Kraftstoff und das Straßennetz (die Daten) ermöglichen erst das Fahren des Wagens. Will man ihn aber nutzen, so ist eine Zielsetzung erforderlich. Der Fahrer muß wissen, wie, wohin und zu welchem Zweck ein Ziel erreicht werden soll.

Abb. 5 beurteilt die ungefähren Kosten und die Lebensdauer der Komponenten. Da die Daten den kostspieligsten Bestandteil des Informationssystems darstellen, muß eine Strategie entwickelt werden, wonach die erfaßten Daten relevant, hinreichend genau und aktuell sind. Nur dann sind die mit den Daten durchgeführten Analysen aussagekräftig, wenn sie für Planungen und deren Implementierung benötigt werden.

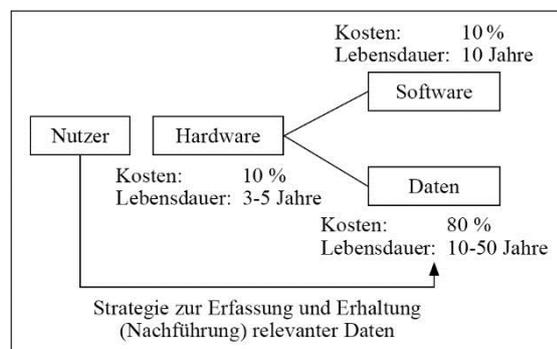


Abb. 5: Kosten und Lebensdauer der GIS-Komponenten

2. Hardware- und Softwarefragen

Es gibt heute weltweit über 300 Systemhersteller für GIS-Hardware und Software. Die Entwicklung neuer Systeme ist kontinuierlich im Fluß. Deshalb wird im Rahmen dieses Beitrages davon Abstand genommen, auf einzelne Systeme, ihren Kostenrahmen und ihre Leistungsfähigkeit hinzuweisen.

Allerdings sollen hierzu einige allgemeine Bemerkungen gemacht werden:

Je nach Datentyp erfolgten die industriellen Entwicklungen ausgehend von zwei Richtungen. Die eine war die Computergraphik, welche zunächst auf die effiziente Herstellung maschineller Zeichnungen ausgerichtet war (z. B. Autocad auf PC-Basis). Allmählich wurden Verknüpfungen zu Sachdaten ermöglicht (z. B. Intergraph IGDS/DMRS auf Microcomputern).

Auf der anderen Seite wurde von Datenbanksystemen mit dem Schwerpunkt auf graphischen Analysemöglichkeiten ausgegangen (z. B. Arc/Info, Siemens und IBM auf Microcomputern und PC's), wobei die topologische Datenstruktur der Graphik im Vordergrund stand. Heute haben sich die Entwicklungen aus beiden Richtungen einander angenähert. Es sind leistungsfähige Systeme entstanden, welche nicht nur Vektordaten, sondern auch Rasterdaten und deren Kombination in Arbeitsstationen auf UNIX-Betriebssystemen und selbst auf PC-Basis effizient verarbeiten können.

Die Limitationen oder deren Vor- und Nachteile liegen heute weniger in der Auswahl der Hardwarekomponenten, sondern in der Bereitstellung entsprechender Software-Module. Je nach Anwendung sollten diese vorhanden sein für

- Eingabe von Vermessungszahlen aus Messungen,
- die Rasterabtastung von Karten und deren Raster-Vektorkonvertierung,
- die graphische Digitalisierung objektbezogener Daten, auch in topologisch strukturierter Form,
- die Verwaltung von Katasterdaten,
- die Analyse von vektorbestimmten Flächendaten,
- die Analyse von vektorbestimmten Netzwerken,
- die Interpolation und Analyse von Rasterdaten,
- die Erstellung digitaler Geländemodelle,
- die Verwendung von Fernerkundungsdaten mit den Mitteln der digitalen Bildverarbeitung,
- die Einbeziehung der digitalen Photogrammetrie (digitale Bildkorrelation, digitale Orthophotos und deren Mosaikbildung).

Der Auswahl der Plattformen (Minicomputer, Arbeitsstationen, PC's) kommt durch die Möglich-

keit der Computervernetzung zunehmend eine untergeordnete Bedeutung zu, wenn moderne Betriebssysteme (Unix, Windows-NT) benutzt werden, die es zunehmend erlauben werden, Daten unterschiedlicher Hardware-Softwaresysteme im Netz zu verwenden, wenn es gelingt, die Schnittstellen zu verbessern oder zu schaffen.

3. Datenbestand

Die Beurteilung des Datenbestandes und seiner Kosten ist nach Abb. 6 von seiner geographischen Ausdehnung, der Datenqualität und vom thematischen Inhalt abhängig.

Die Kosten für die Beschaffung einer Grundkarte als Basis für den Raumbezug thematischer und nicht-graphischer Informationen betragen nach Schätzungen der Vereinten Nationen [World Cartography XIV, 1976] etwa 0.1 % des Bruttosozialproduktes. Die maßstabsunabhängige Qualität der

Daten ist in den Ländern der Erde aber nur unvollständig vorhanden (siehe Tab. 1).

Insbesondere läßt auch der Nachführungsstand vorhandener Kartenwerke zu wünschen übrig (siehe Tab. 2).

Daraus ist zu schließen, daß die kartographische Erfassung der Erde dem Bedarf nachhinkt.

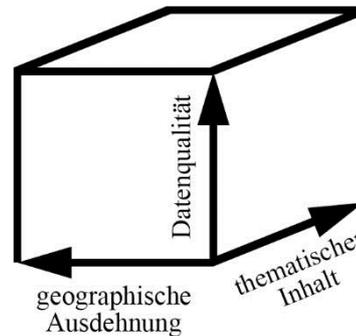


Abb. 6: Nutzen der Daten eines GIS

Tab. 1: Kartenbedeckung der Landfläche der Erde ohne großflächig mit Eis bedeckte Zonen (Stand 1987, U.N. Statistik)

Kontinent	1 : 25 000	1 : 50 000	1 : 100 000	1 : 200 000
Afrika	2,5 %	34,5 %	19,5 %	85,0 %
Asien	12,8 %	69,2 %	62,1 %	80,0 %
Australien	18,3 %	22,8 %	54,4 %	80,0 %
Europa	83,4 %	96,2 %	78,5 %	90,0 %
GUS	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Nordamerika	36,9 %	71,7 %	37,1 %	97,0 %
Südamerika	6,7 %	29,8 %	53,4 %	75,0 %
besiedelte Welt	17,0 %	56,0 %	59,0 %	90,0 %
jährl. Fortschritt	0,6 %	2,0 %	1,4 %	1,5 %

Tab. 2: Stand der Kartennachführung (jährlich) (Stand 1987, U.N. Statistik)

Kontinent	1 : 25 000	1 : 50 000	1 : 100 000	1 : 200 000
Afrika	2,0 %	2,6 %	4,2 %	1,5 %
Asien	4,0 %	0,8 %	0,0 %	2,1 %
Australien	2,1 %	1,8 %	0,1 %	0,5 %
Europa	7,4 %	6,4 %	8,0 %	8,2 %
Nordamerika	4,7 %	3,1 %	0,0 %	6,5 %
Südamerika	0,0 %	0,8 %	0,0 %	0,4 %
besiedelte Welt	4,9 %	2,3 %	0,7 %	3,4 %

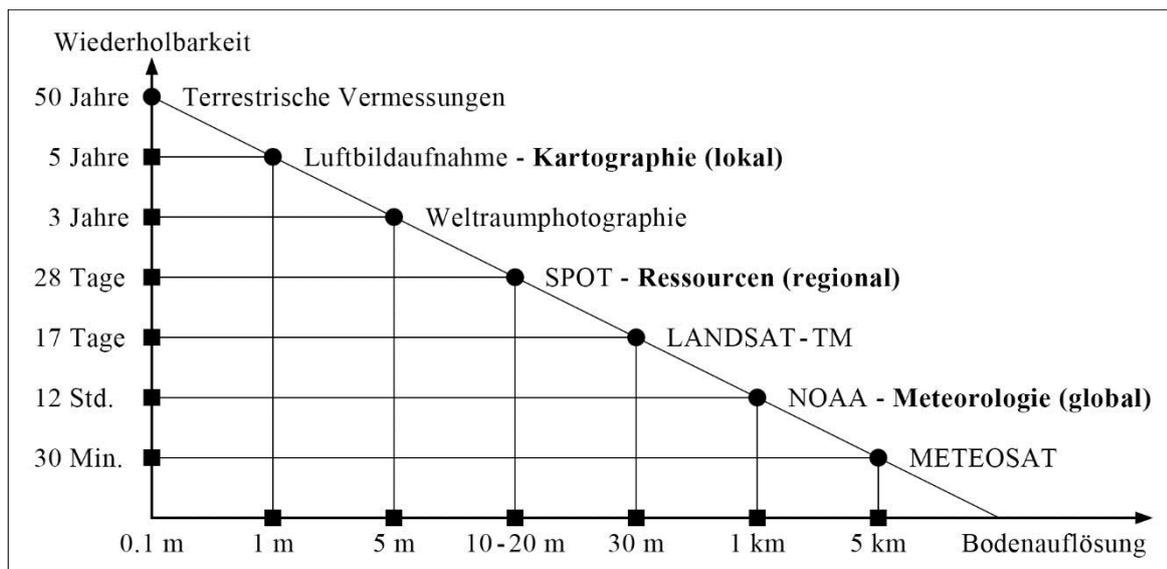


Abb. 7: Auflösung und Wiederholbarkeit von Fernerkundungsdatenbeschaffungen

Tab. 3: Operationelle (experimentelle) Satellitenfernerkundungssysteme

Weltraumagentur	Meteorologie	Ressourcen	Kartographie
USA	GOES NOAA	Landsat TM	(LFC)
Rußland	Meteor	MKF 6 Karte 2000	KFA 1000 KWR 1000
Frankreich		Spot-XS	Spot-P
ESA	Meteosat	ERS-1	
Japan	GMS	MOS JERS-1	
Indien	INSAT	IRS-1	
China		Satelliten- photographie	
Deutschland		(MOMS)	(MC) MOMS-02

Die UNCED Konferenz von Rio de Janeiro (1992) hat in Agenda 21 empfohlen, bis zum Jahre 2000 2.015 Milliarden US\$ jährlich zur Erfassung von Umweltdaten für eine nachhaltige Entwicklung vorzusehen.

Das beinhaltet sowohl die von der Kartographie lückenhaft erfaßten Daten, als auch umweltrele-

vante Daten, die im allgemeinen noch viel lückenhafter vorhanden sind.

4. Fernerkundung und GIS

Die klassischen Verfahren der Datenerfassung am Boden und aus der Luft sind für die Erforder-

nisse der Datenbeschaffung über die Umwelt zu langsam und zu kostenaufwendig. Deshalb müssen sie durch Verfahren der Satellitenfernerkundung ergänzt werden. Abb. 7 stellt die Zusammenhänge zwischen Auflösung und Wiederholbarkeit von Fernerkundungsdatenbeschaffungen dar.

Tab. 3 zeigt, daß die operationelle Datenbeschaffung für die unterschiedlichen Auflösungsbereiche (Meteorologie, Ressourcen, Kartographie) von verschiedenen Weltraumagenturen wahrgenommen werden.

Die Kosten für den Bildkauf stehen im allgemeinen in keinem Verhältnis zu den Kosten für den Satellitenbetrieb. Da die Kosten für den Bau, den Start und den Betrieb eines Satellitensystems von den einzelnen Betreiberorganisationen in sehr unterschiedlicher Weise staatlich subventioniert werden, stellt der Bildverkauf einen unechten Markt dar, der in Bezug auf Leistungsfähigkeit (Auflösung und Aufnahmefläche) kaum vergleichbar ist (siehe Tab. 4).

Die Bildflugkosten für die konventionelle photogrammetrische Aufnahme sind maßstabsbedingt. Sie variieren etwa zwischen 7 DM pro km² für Hochbefliegungen (Bildmaßstab 1:60000) und 30 DM pro km² für Niedrigbefliegungen (Bildmaßstab 1:4000). Sie sind in jedem Fall teurer als die Kosten pro km² für Satellitenbilder.

Die Situation der Satellitenfernerkundung läßt sich nach Abb. 8 als hierarchisch von oben nach unten entwickelte Struktur erkennen. Aus der Sicht des Nutzers wäre aber eine Strategie von unten nach oben empfehlenswerter, weil dabei die Nut-

zeranforderungen im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Kosten und weniger das Konkurrenzdenken der Weltraumagenturen zum Tragen gekommen wäre.

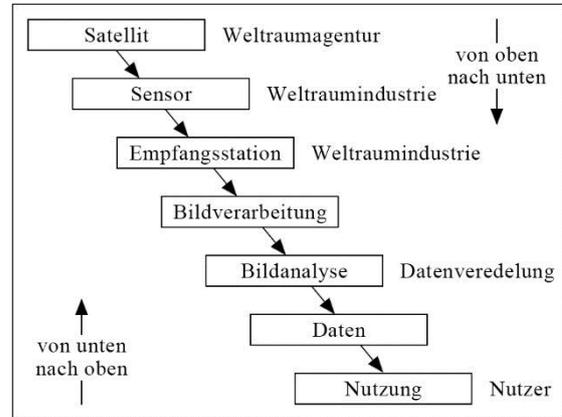


Abb. 8: Entwicklung von Fernerkundungssatelliten

Die hierarchisch von oben nach unten entwickelte Struktur hat nach Abb. 9 zunächst die Weltraumindustrie und danach die Forschungsinstitute befriedigt, weniger aber die Nutzerorganisationen, welche veredelte Daten zur Nutzung benötigen.

Die Realisierung der notwendigen Verbindungen zum Nutzer wird am besten in Frankreich erkannt, wo parallel zur Weltraumbehörde CNES eine Vertriebsagentur Spot-Image eingerichtet worden ist, die nicht nur den Vertrieb, sondern auch die Datenveredelung übernimmt. So betrug der Datenver-

Tab. 4: Kostenvergleich von Weltraumbildern

Sensor	Land	Anzahl der Kanäle	ungefähre Kosten pro Bild	Aufnahme-fläche (Streifenbreite)	Boden-auflösung	Preis pro km ²
Meteosat	ESA	3	200 DM	Halbkugel	5 km	0,000 DM
NOAA	USA	5	200 DM	280 km	1 km	0,002 DM
Landsat MSS	USA	4	2000 DM	185 km	80 m	0,06 DM
MOS-1	Japan	4	400 DM	100 km	50 m	0,05 DM
Landsat TM	USA	7	8800 DM	185 km	30 m	0,28 DM
Spot-P	Frankreich	1	5300 DM	60 km	10 m	1,47 DM
Spot-XS	Frankreich	3	4200 DM	60 km	20 m	1,17 DM
ERS-1	ESA	1	1300 DM	100 km	12,5 m	0,13 DM
IRS-1	Indien	4	500 DM	130 km	36 m	0,03 DM
KFA 1000	Rußland	2	2000 DM	120 x 120 km	7,5 m	0,11 DM
MKF 6	Rußland	6	1500 DM	175 x 260 km	20 m	0,03 DM
KWR 1000	Rußland	1	5500 DM	40 x 40 km	2 m	3,44 DM

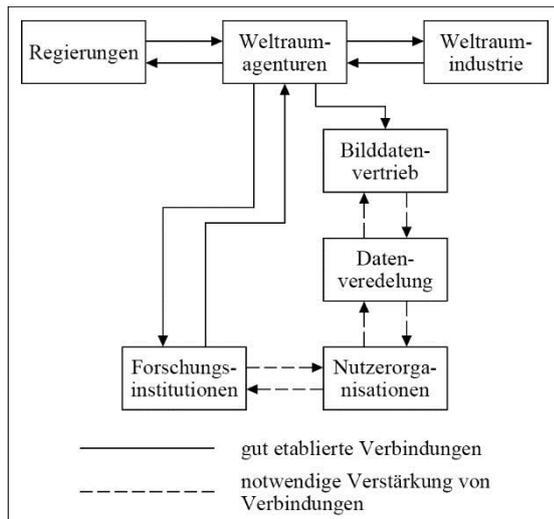


Abb. 9: Partner der Satellitenfernerkundung

edelungsanteil bei den Spot-Image-Erlösen im Jahre 1991 bereits 60% und der Bildverkauf lediglich 40%. Dabei ist nach Tab. 5 ein drastischer Anstieg der Erlöse erzielt worden, der aber immer noch nicht die Kosten eines Satellitensystems von mindestens 250 Mill. US\$ decken kann.

Tabelle 6 zeigt die Spot-Image-Prozentsätze am Verkauf der interessierten Disziplinen.

Die hier dargestellten Zahlen stellen lediglich einen Versuch dar, die Problematik der Fernerkundungsanwendung aufzuzeigen.

Satellitenfernerkundungssysteme sind zwar einsetzbar, sie operieren aber zu marginalen Bedingungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit. Deshalb beharren die Nutzerorganisationen auf den zwar teureren, aber immerhin leistungsfähigeren Datenerfassungsverfahren mit der konventionellen Luftbildaufnahme.

Tabelle 7 zeigt die Gesamtkosten pro km² für eine Fernerkundungsnutzung. Demnach sind die Nutzerkosten bei Anwendung der Fernerkundung erheblich höher als das hierfür benötigte Bildmaterial. Die Zahlen sind Richtwerte, die je nach Oberflächenverhältnissen in den verschiedenen Regionen der Erde und ihren Anforderungen erheblich variieren können.

Doch auch im Luftbildwesen hat sich die Technologie im letzten Jahrzehnt grundlegend verändert. Hierzu zählt der Einsatz von GPS bei Befliegungen. Die Einbeziehung von GPS-Registrierungen für die Aufnahmestandorte in der Aerotriangulationsausgleichung hat die Anforderungen an teure Paßpunkte erheblich reduziert. Neue Reihenmeßkammern mit Bewegungskompensation und

Tab. 5: Verkaufserlöse von Spot-Image

Jahr	Betrag
1986	3 Mill. US\$
1987	12,2 Mill. US\$
1988	18 Mill. US\$
1989	24,6 Mill. US\$
1990	33 Mill. US\$
1991	40,8 Mill. US\$

Tab. 6: Spot-Datenvertrieb nach Disziplinen

Kartographie	30 %
Landwirtschaft	20 %
Umwelt	20 %
Geologie	15 %
Forstwesen	10 %
Regionalplanung	4 %
Verifizierung	1 %

Kammerstabilisierung haben die erreichbare Auflösung um mindestens den Faktor 2 verbessert. Deshalb können Bildflüge in kleineren Maßstäben erheblich zur Kostenminderung beitragen.

Schließlich ist es die digitale Orthophotoelektronik, einschließlich der automatischen Bildkorrelation digital abgetasteter Luftbilder, welche zu einer starken Kostenverminderung führt und eine Leistungssteigerung bei der Nachführung von Karten herbeiführen kann.

In allen Fällen wird die Datenerhebung für geographische Informationssysteme ohne zusätzliche Bodenmessungen nicht auskommen. Diese bestimmen die Gesamtkosten der Datenerfassung.

5. Datenintegration im GIS

Im Gegensatz zur konventionellen Praxis bietet das GIS aber die Möglichkeit zur Datenintegration, wobei sowohl Bilddaten als auch Vektordaten und am Boden ermittelte Werte zusammengefaßt werden können. Dies ermöglicht eine Zusammenschau der erfaßten Daten einerseits und eine Optimierung des Datenerfassungsverfahrens andererseits. Abbildung 10 gibt eine Übersicht wieder, in welcher die Fa. Nordisk-Kvantif 29 nordeuropäische GIS-Projekte auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis hin analysiert hat. Daraus ist ersichtlich, daß der GIS-Einsatz bei der Automation bestehender Aufgaben nur

Tab. 7: Gesamtkosten der Fernerkundungsnutzung

Anwendungs- gebiet	Anwendung	Maßstab	Sensor	Kosten/km ²
Landwirtschaft	Vegetationsindex	1 : 1 000 000	NOAA	10 DM
Forstwesen	Waldinventar	1 : 100 000	Landsat TM	30 DM
Desertifizierung	Veränderungs- nachweis	1 : 100 000	Landsat TM	60 DM
Regionalplanung	Landnutzung	1 : 50 000	Spot KFA 1000	100 DM
Kartographie	Topographische Karte	1 : 50 000	Luftbilder	200 DM
Geologie	Photogeologie	1 : 25 000	Luftbilder	400 DM
Regionalplanung	Landnutzung	1 : 10 000	Luftbilder	900 DM
Kartographie	Topographische Karte	1 : 10 000	Luftbilder	1 200 DM
Kartographie	Orthophoto	1 : 10 000	Luftbilder	700 DM
Kartographie	Topographische Karte	1 : 5 000	Luftbilder	1 000 DM
Kartographie	Mehrzweck- kataster	1 : 1 000	Luftbilder	30 000 DM

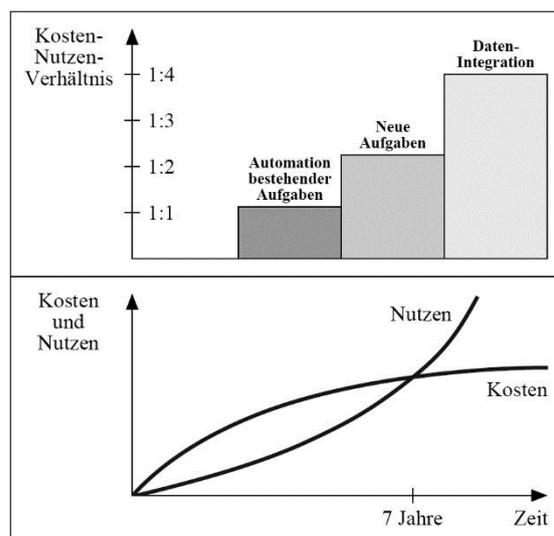


Abb. 10: Kosten-Nutzen-Aspekte eines GIS-Projektes

marginale Vorteile bringt, daß aber die Integration von Daten erhebliche Kosteneinsparungen mit sich bringt, wenn diese auch erst nach einigen Jahren erreicht werden. Die Probleme der Datenintegration liegen daher vornehmlich auf der organisatorischen Seite und weniger auf der finanziellen und der technischen Ebene.

Die organisatorische Lösung des GIS-Problems ist vornehmlich eine politische Aufgabe, die insbesondere in den Entwicklungsländern eine große Rolle spielt. Wegen der Nichtverfügbarkeit rele-

vanter Daten, deren Austausch und deren Nutzung, konkurrieren Entwicklungshilfeprojekte verschiedener Geberländer miteinander im gleichen Land und, was noch schlimmer ist: Sie erreichen oft nicht das gewünschte Ziel. Deshalb hat die Weltbank im Jahre 1989 einen Beratungsausschuß eingerichtet, der Empfehlungen zur Einrichtung eines Umweltinformationssystems für nachhaltige Entwicklung erarbeitet hat. Der Autor hat mit Vertretern verschiedener Geberländer an diesen Empfehlungen mitgewirkt.

- 5.1 Am Anfang der Einrichtung eines GIS steht die Aufstellung des umweltrelevanten und entwicklungsspezifischen Informationsbedarfs. Dabei sollen die Prioritäten der Ressourcennutzer, der Planer und der Verwaltungsexperten auf lokalem regionalem und nationalem Niveau bestimmt werden.
- 5.2 Danach soll eine Analyse der technischen, finanziellen, institutionellen und der gesetzlichen Vorbedingungen durchgeführt werden.
- 5.3 Informationsbedarf und Analyse der Vorbedingungen ermöglichen die Erstellung einer Langzeitstrategie für die nächsten 15-20 Jahre.
- 5.4 Gleichzeitig aber sollen billige Kurzzeit-Interimslösungen ermittelt werden.
- 5.5 Maßnahmen für die Ausbildung des technischen Personals, aber auch der Entscheidungsträger, sollen dabei eingeleitet werden.

- 5.6 Für die ersten fünf Jahre soll eine Pilot-Phase vorgesehen werden.
- 5.7 Während oder nach der Pilot-Phase soll eine Koordination der Geberländerbeiträge stattfinden.

Die Empfehlungen sind nur realisierbar, wenn die organisatorischen Probleme durch folgende Maßnahmen gelöst werden:

- 5.8 Die Maßnahmen sollen länderbezogen durchgeführt werden.
- 5.9 Dabei ist die lokale Partizipation (Strategie von unten nach oben) wichtig.
- 5.10 Eine Mobilisierung der vorhandenen menschlichen Ressourcen ist notwendig.
- 5.11 Eine Konzentration auf reale Bedürfnisse ist Voraussetzung.
- 5.12 Eine Inventur aller verfügbaren Datenbestände, die zur Integration notwendig sind, ist gefordert.
- 5.13 Die Datenerfassungs- und Datenverwaltungsprobleme sollen mit nationalen Aktionsplänen für die nachhaltige umweltbezogene Entwicklung verknüpft werden.

Wenn diese Empfehlungen auch für Entwicklungsländer gemacht worden sind, so haben sie doch in gleicher Weise Gültigkeit für entwickelte Länder, in denen Alleingänge bei der Einführung von GIS nicht ungewöhnlich sind.

6. Fachdisziplinen und GIS

Der Hemmschuh in der GIS-Entwicklung in entwickelten Ländern ist allerdings nicht allein in den Organisationsstrukturen begründet, sondern er wird von den in ihnen tätigen Angehörigen unterschiedlicher Fachdisziplinen genährt.

GIS-Hardware und -Software ist unbestritten ein Werkzeug zum Betreiben von Geoinformationssystemen. Die GIS-Technologie wird von der Industrie vorangetrieben. Der akademische Bereich kann Teilaufgaben der Entwicklung wahrnehmen, aber er ist von der Industrie häufig nicht als Mitentwicklungspartner gefragt, weil er im Vergleich zur Computer- und Softwareentwicklung zu langsam vorankommt. Er kann allenfalls in Nischen der Softwareentwicklung partizipieren.

Die Betreiber von Geoinformationssystemen halten hingegen die Bereitstellung, Laufendhaltung und Analyse von Daten für ihre Hoheitsaufgabe. Für sie kommt die Mithilfe des akademischen Be-

reiches lediglich zur Adaption der Herstellersoftware an die geforderten Lösungen der Praxis als sogenannte »Customization« in Frage.

Dennoch ist gerade der akademische Bereich für die Aufstellung von Konzepten vonnöten: International befassen sich folgende wissenschaftliche Gesellschaften oder Fachverbände mit der GIS-Entwicklung:

- AM/FM
- FIG
- ICA
- IGU
- ISPRS
- IUGG (IAG)
- SORSA
- URISSA

Dabei treten Duplizierungen in der Aufgabenbehandlung auf. Dies wird noch dadurch verstärkt, daß einige GIS-Herstellerfirmen eigene Jahreskongresse abhalten, die die Teilnehmerzahlen wissenschaftlicher Kongresse bei weitem übersteigen und die GIS lediglich von der Warte ihre Herstellerplattform, aus betrachten.

Daher wäre es an der Zeit, international und auch national an eine fachspezifische Integration der in den Gesellschaften oder Verbänden vertretenen Interessen zu denken. Während bei der Datenerfassung für GIS durchaus spezielle Fachdisziplinen in Frage kommen und während für die Analyse und die Ausgabe der Daten unterschiedliche fachspezifische Anwendungen vonnöten sind, so betrifft die Datenverwaltung ein für alle Disziplinen gemeinsames Gebiet, welches zur Zeit hauptsächlich durch die Herstellerfirmen dominiert wird.

In Abb. 11 wird der Versuch unternommen, die einzelnen Aufgabenbereiche den genannten Verbänden zuzuordnen. Der Bereich der im Vermessungswesen vereinigten Disziplinen der Vermessungskunde, der Photogrammetrie und Fernerkundung, des Liegenschaftswesens und der Kartographie, der in der Internationalen Union für Vermessungswesen (IUSM) zusammengefaßt ist, wäre sehr wohl in der Lage, eine solche Fachintegration gemeinsam voranzutreiben. Das Vermessungswesen in seiner breiten Anwendung kommt in Zukunft ohne GIS nicht aus. Deshalb wäre es falsch, die GIS-Probleme als eine gesonderte Disziplin »Geoinformatik« abzusondern. Die Problemlösung sollte eine gemeinsame Aufgabe aller Fachgruppen sein. Das Vermessungswesen könnte deshalb den Nukleus aller GIS-orientierten Fachdisziplinen bilden.

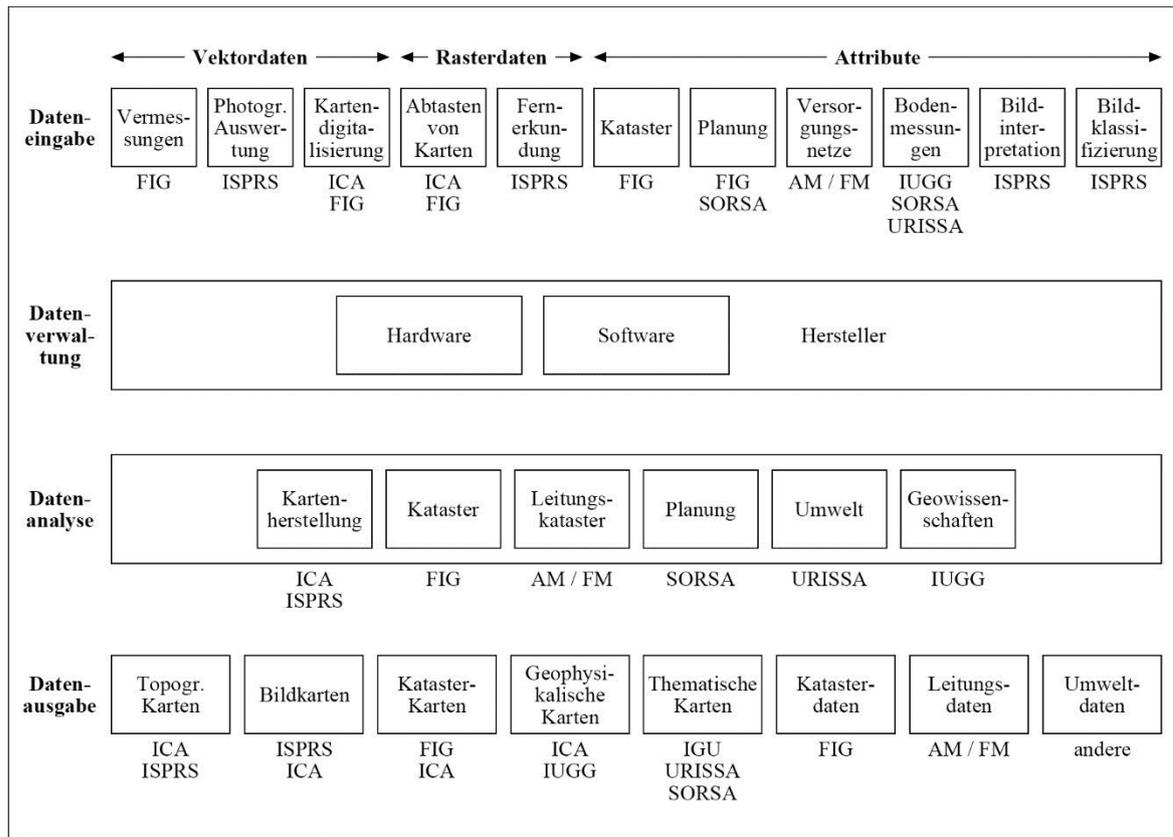


Abb. 11: Fachaufgaben innerhalb der GIS-Entwicklung

Die außerhalb des Vermessungswesens befindlichen GIS-orientierten Fachgruppen allein wären weniger dazu in der Lage, eine solche Fachintegration zu bewirken. Sicherlich können sie sich aber einem durch das Vermessungswesen gebildeten Nukleus anschließen, ihn bereichern und ergänzen. Es bleibt zu hoffen, daß das Vermessungswesen

diese Herausforderung erkennt und zur Integration des GIS federführend beiträgt. Dies sollte Ausdruck finden in der Einbeziehung des GIS-orientierten Lehrstoffes in das Studium des Vermessungswesens und in der national und international fachlich übergreifenden Struktur wissenschaftlicher Vereinigungen.

Digitale Orthophotos und Geo-Informationssysteme¹

In meiner Studienzeit an der damaligen Technischen Hochschule München gab es am Institut für Photogrammetrie und Kartographie einen Assistenten, der bereits Anfang der 60er Jahre die photogrammetrischen Grundaufgaben in den Lehrveranstaltungen gerne auf rechnerische Weise gelöst hat. Dieser Assistent war mutig und weit vorausschauend, denn Anfang der 60er Jahre war die Photogrammetrie noch auf den Leitsatz »Wer viel rechnet, denkt wenig« ausgerichtet. Dieser progressive Assistent, von dem hier die Rede ist, war Egon Dorrer. Er hat mich in einem beachtlichen Ausmaß geprägt und in mir frühzeitig das Interesse an den rechnerischen Methoden der Photogrammetrie geweckt.

Karl Kraus

Zusammenfassung

Das digitale Orthophoto ist ein neues photogrammetrisches Produkt. Die Genauigkeit des digitalen Orthophotos hängt entscheidend von der Qualität des digitalen Geländemodelles ab. Der Bildinhalt des digitalen Orthophotos wird mit den Methoden der digitalen Bildverarbeitung optimiert. Das digitale Orthophoto wird in einem hybriden GIS mit Vektordaten kombiniert. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten der Aktualisierung der Datenbestände; auch Methoden einer komplexen Datenanalyse bieten sich an.

Summary

Digital orthophotos are a new photogrammetric product. The geometric precision of a digital orthophoto depends on the quality of the digital terrain model. Digital image processing techniques are useful in improving considerably the quality of digital orthophotos. The digital orthophoto integrated into a hybrid GIS containing raster and vector data offers new possibilities for data updating and for enabling complex methods of data analysis.

1. Einleitung

Geo-Informationssysteme (GISe) sind eine mehr oder weniger starke Abstraktion der realen Welt. Bei jedem Teil eines GIS, der die natürliche und künstliche Landschaft nachbildet, wird angestrebt, daß sich das abstrahierte Modell und die reale Welt

möglichst nahe kommen. Der Teil eines GIS, der die natürliche und künstliche Landschaft nachbildet, kann auch als Topographisches Informationssystem (TIS) bezeichnet werden.

Die Photographie ist ein Bild der Landschaft, das durch einen physikalischen Abbildungsprozeß entsteht, der weitgehend dem menschlichen Sehen entspricht. Eine Photographie ist ein – aus der Sicht des menschlichen Betrachters – objektives Dokument der realen Welt. Dem photographischen Bild kommt deshalb in GISen eine große Bedeutung zu.

Die Photographie eignet sich aber nicht unmittelbar für die Übernahme in ein modernes GIS. Der ursprünglich analoge Inhalt einer Photographie muß zuerst digitalisiert werden; dann müssen die Bildelemente (Pixel) in das Koordinatensystem des GISes transformiert werden. Die beiden – und noch andere – Arbeitsschritte verbergen sich hinter dem Herstellungsprozeß eines digitalen Orthophotos. Einen solchen Datensatz, dessen Inhalt nach wie vor dem Photonenstrom, der zum Zeitpunkt der photographischen Aufnahme von der Landschaft ausging, geprägt ist, sollte man als digitales Orthophoto bezeichnen und dafür nicht den verwachsenen Ausdruck Orthobild verwenden (siehe die in der Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 61. Jahrgang 1993, Heft 1, S. 46 und Heft 4, S. 162, abgedruckte Diskussion).

2. Die Bedeutung digitaler Orthophotos für GISe

Nachdem die Photographie ein objektives Dokument der realen Welt ist, kommt dem digitalen Orthophoto in einem GIS, insbesondere in einem TIS, ein hoher Stellenwert zu. Das digitale Orthophoto entspricht in einem hohen Maß dem Bedürf-

¹ Dieser Beitrag wurde beim XX. FIG-Kongreß in Melbourne vorgetragen und ist in den Proceedings der Kommission 3 in englischer Sprache enthalten.

nis des Anwenders, das er sich von einem GIS – neben vielen anderen Informationen – auch ein Abbild der realen Welt erwartet. *Loodts [1993]* hat dieses Bedürfnis der Anwender sehr treffend formuliert: »Digital orthophotos are not just a new GIS layer, but a GIS "partner". By coupling digital orthophotos to GIS, GIS data is put alive and data coherence is preserved at all stages.«

Die Bedeutung digitaler Orthophotos für GISe wird im folgenden noch etwas mehr konkretisiert, ohne dabei vollständig sein zu wollen.

2.1 Orientierungshilfe

In einem GIS werden häufig Daten zusammengeführt, die sehr abstrakt sind und wenig Bezug zur realen Welt besitzen, wie zum Beispiel Planungsdaten und administrative Daten. Der Benutzer des GISes braucht in diesem Fall eine Orientierungshilfe, die ihm das digitale Orthophoto als Hintergrundinformation zu diesen abstrakten Daten bieten kann. Noch anschaulicher als eine Präsentation in der Grundrißebene sind die mit Hilfe des digitalen Geländemodelles (DGM) abgeleiteten Perspektivansichten, die den Inhalt des digitalen Orthophotos gemeinsam mit den abstrakten Daten in dreidimensionaler Form zeigen (Beispiele enthält z. B. die Veröffentlichung von *Kuhn [1989]*).

2.2 Aufklärung von Widersprüchen in den Daten

Nach dem Zusammenführen der Daten, die von unterschiedlichen Quellen stammen können, entdeckt man häufig in einem GIS Widersprüche in den Daten. Die Widersprüche in den heterogenen Daten – insbesondere die geometrischen Widersprüche – können in vielen Fällen mit digitalen Orthophotos aufgeklärt werden. Digitale Orthophotos befriedigen nämlich höchste Genauigkeitsansprüche, wenn sie mit einem hochwertigen DGM erzeugt werden [*Ecker, 1992*]. Digitale Orthophotos sind auch wesentlich genauer als jene Daten, die von topographischen Karten in ein GIS übernommen werden: das digitale Orthophoto ist im Gegensatz zur topographischen Karte nicht generalisiert.

Das digitale Stereoorthophoto bietet noch zusätzlich die Möglichkeit, die Höhenangaben der dreidimensionalen Vektordaten in einem GIS zu überprüfen. Voraussetzung ist allerdings, daß der Bildschirm mit einer Stereobetrachtung ausgestattet sein muß [*Kraus und Waldhäusl, 1993*]. Orthophoto und Stereopartner, die gemeinsam das Stereoorthophoto bilden, vermitteln dem Betrachter ein dreidimensionales photographisches Modell der realen Welt. Wenn man die dreidimensionalen Vek-

tordaten ebenfalls nach den Gesetzen des Stereoorthophotos auf dem Bildschirm darstellt und gemeinsam mit dem Stereoorthophoto betrachtet, erkennt man die Höhenfehler in den dreidimensionalen Vektordaten.

2.3 Aktualisierung der Daten

Die in einem GIS zusammengeführten Daten sind häufig veraltet. Ein weiterer Nachteil ist, daß man das Datum der Entstehung der einzelnen Datensätze selten kennt. Demgegenüber bezieht sich der Inhalt des digitalen Orthophotos genau auf den (bekannten) Zeitpunkt der Flugzeug- oder Satellitenaufnahme. Außerdem ist der Herstellungsprozeß der digitalen Orthophotos weitgehend automatisiert, so daß digitale Orthophotos verhältnismäßig preisgünstig in kurzen Zeitabständen erneuert werden können. Zur Aktualisierung von veralteten Datensätzen in einem GIS können deshalb digitale Orthophotos einen beachtlichen Beitrag leisten.

2.4 Visualisierung der Genauigkeit der Datenbestände

Bisher wurde die Datenqualität in einem GIS, insbesondere der Genauigkeit der Datenbestände, zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Um Mißbräuche mit einem GIS zu vermeiden, ist der Anwender vom GIS ständig über die Genauigkeit der von ihm benutzten Daten zu informieren. Die Möglichkeit, die Daten mit sehr starken Vergrößerungen in einem GIS betrachten zu können, verleitet zu Fehlhandlungen.

Um solche Fehlhandlungen zu vermeiden, haben zum Beispiel *Kraus und Haussteiner [1993]* vorgeschlagen, die Genauigkeit der Vektoren selbst zu modellieren und sie entsprechend zu visualisieren. Eine andere Möglichkeit besteht in der Kombination der Vektordaten mit den digitalen Orthophotos, indem man jedem Vektordatensatz ein digitales Orthophoto hinterlegt, dessen Pixelgröße etwa der Genauigkeit der Vektordaten entspricht.

Dazu ein Beispiel: Das Bild 1 enthält links ein digitales Orthophoto mit einer Pixelgröße von 2 m. In einem digitalen Bild mit einer Pixelgröße von 2 m werden noch Linienmuster ohne Mischpixel erfaßt, deren Balkenbreite 2.8 m beträgt [z. B. *Kraus und Schneider, 1988*]. Geht man von einer Kartiergenauigkeit von ± 0.3 mm aus, so entspricht diese Breite etwa einem Maßstab von 1:10000. Daten, die also von einer Karte 1:10000 in ein GIS übernommen wurden, sollten mit einem digitalen Orthophoto, das eine Pixelgröße von 2 m aufweist, kombiniert werden. Hat man dagegen Vektordaten, die nur eine Genauigkeit

von etwa ± 25 m besitzen, sollte das GIS ein digitales Orthophoto der vierten Stufe (rechter Ausschnitt im Bild 1) mit einer Pixelgröße von 16 m als Hintergrundinformation auf den Bildschirm bringen.

3. Landesweite Herstellung digitaler Orthophotos

Digitale Orthophotos werden voraussichtlich für GISe, insbesondere für TISe, eine so große Bedeutung erlangen, daß Staaten ihr Gebiet in Zukunft mit Datensätzen mehrerer Sensoren mit unterschiedlicher geometrischer Auflösung und unterschiedlichen spektralen Kanälen überziehen.

3.1 Digitale Orthophotos aus Satellitenaufnahmen

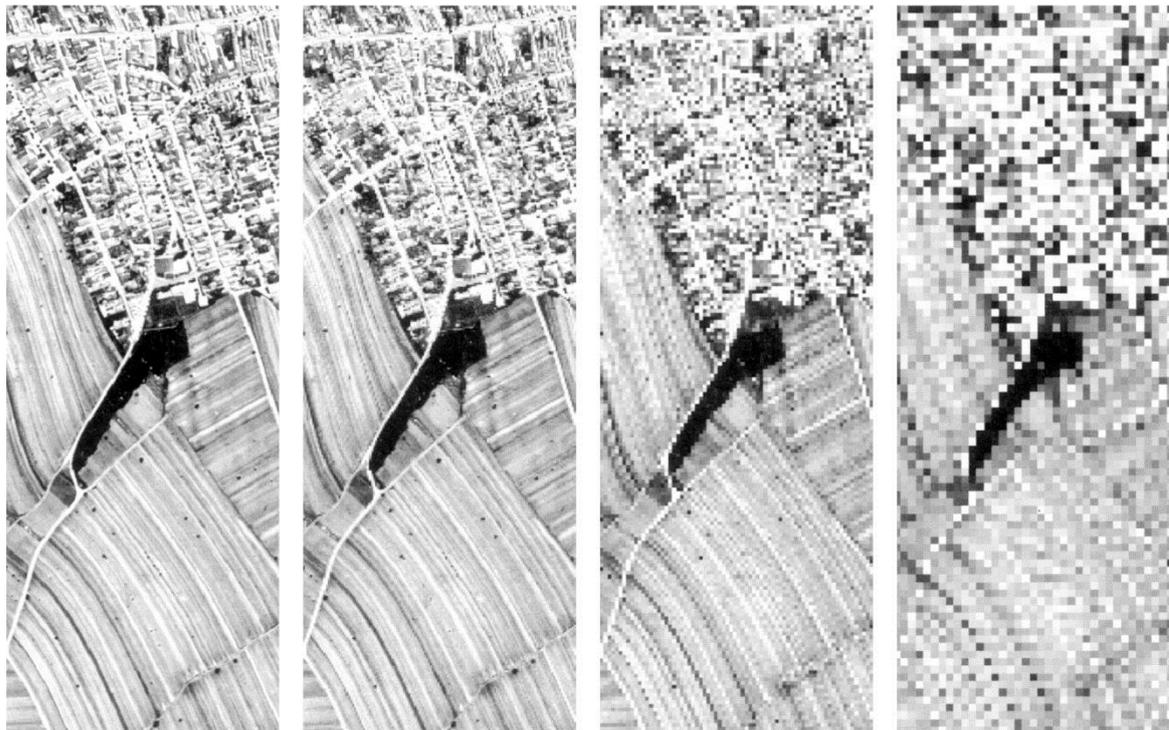
LANDSAT-TM hat nur eine Pixelgröße von 30 m. Infolge des geringen finanziellen Aufwandes ist es daher angebracht, alle sieben Kanäle zu rektifizieren und als geokodierte Datensätze in einem GIS vorzuhalten. Für Österreich mit 80 000 km² erhält man eine Datenmenge von etwa 90 Mega-Bytes für einen Kanal und 630 Mega-Bytes für die verfügbaren sieben Kanäle. Die LANDSAT-Ortho-

photos können in einem GIS mit Daten aus Karten mit Maßstäben zwischen etwa 1 : 100 000 und 1 : 200 000 zusammengeführt werden.

SPOT bietet drei Spektralbereiche mit 20-m-Pixeln und einen Spektralbereich mit 10-m-Pixeln an. Der dreikanalige multispektrale Datensatz würde für Österreich 600 Mega-Bytes Speicherkapazität erfordern, der Schwarz-Weiß-Kanal 800 Mega-Bytes. Die SPOT-Schwarz-Weiß-Orthophotos können in einem GIS mit Vektordaten kombiniert werden, die aus Karten mit Maßstäben zwischen etwa 1 : 50 000 und 1 : 100 000 stammen.

Die KFA-1000-Daten sind von der geometrischen Qualität etwa mit den SPOT-Schwarz-Weiß-Daten vergleichbar. Man wird also für ein TIS entweder digitale Orthophotos aus SPOT-Aufnahmen oder KFA-1000-Aufnahmen herstellen.

Sensationell ist die Qualität der seit kurzem verfügbaren KWR-1000-Aufnahmen. Sie erlauben digitale Orthophotos mindestens mit 2-m-Pixeln, d. h. diese digitalen Orthophotos können Daten ergänzen, die aus Karten 1 : 10 000 entnommen sein können [Riess *et al.*, 1993]. Die im Bild 1 wiedergegebenen Daten stammen von einer KWR-1000-Aufnahme. Im Bild 2 sind diese Daten nochmals wiedergegeben, aber in der Form einer Bildpyramide. Diese Bildpyramide hat unter anderem den



a) 768 x 288 2-m-Pixel b) 384 x 144 4-m-Pixel c) 192 x 72 8-m-Pixel d) 96 x 36 16-m-Pixel

Bild 1: Orthophotos mit verschiedener Pixelgröße

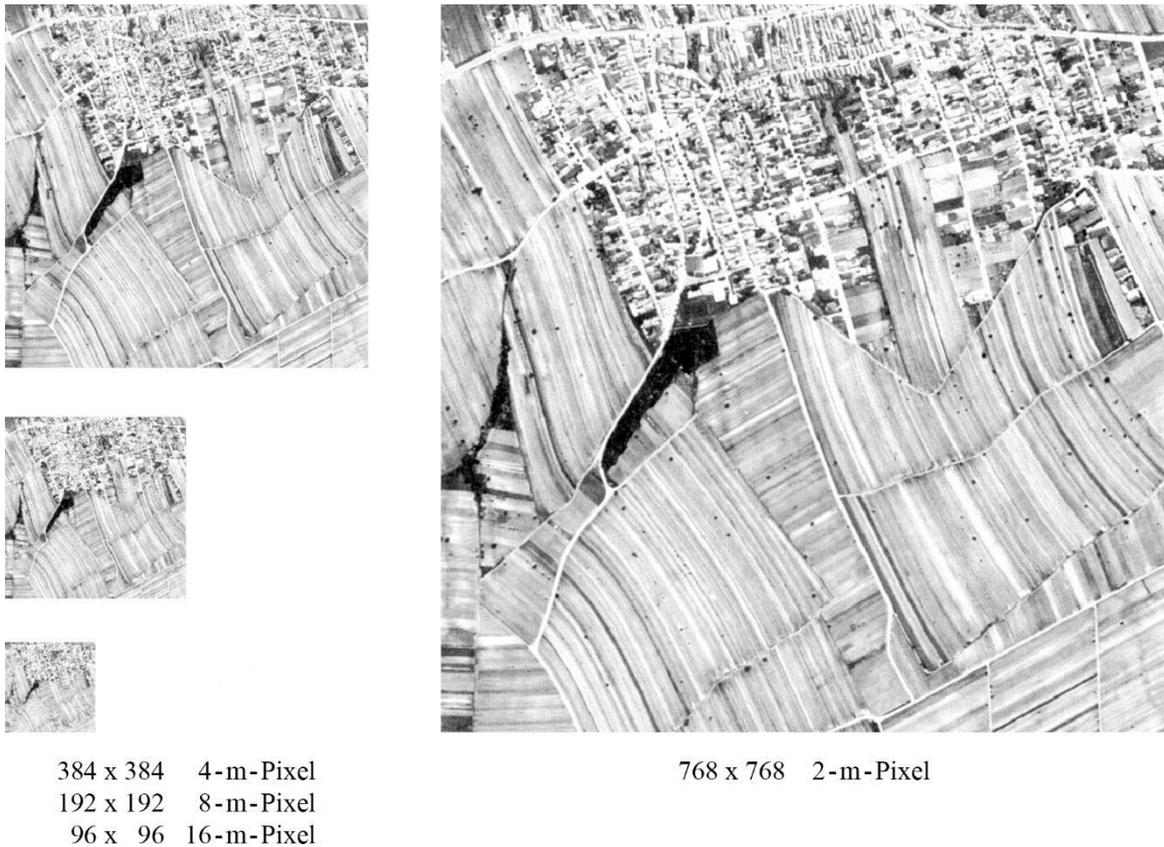


Bild 2: Bildpyramide einer KWR-1000-Aufnahme

Vorteil, daß für verschiedene geometrische Auflösungen die Bilddaten unmittelbar bereitstehen. Der Speicherbedarf für die Orthophotos mit 2-m-Pixeln würde für Österreich 20 Giga-Bytes ausmachen; für die anderen drei Stufen der Bildpyramide kämen noch 6.56 Giga-Bytes dazu.

3.2 Digitale Orthophotos aus Luftaufnahmen

Mit den KWR-1000-Aufnahmen ist die Satellitenbildtechnik in einen Bereich vorgezogen, der bisher den Luftaufnahmen vorbehalten war. Digitale Orthophotos mit 2-m-Pixeln wird man künftig nicht mehr aus Luftbildern, sondern aus KWR-1000-Aufnahmen erzeugen. Der Herstellungsprozeß aus Satellitenaufnahmen hat nämlich einige Vorteile:

- man braucht wesentlich weniger Bilder,
- infolge der großen Brennweite – bei KWR-1000-Bildern beträgt sie 1 m! – werden auch nur geringe Anforderungen an die Höhengenaugigkeit des DGMS gestellt und der lästige Bildsturz der Kunstbauten ist äußerst gering,
- die radiometrische Anpassung benachbarter digitaler Orthophotos ist wesentlich einfacher als bei

Luftaufnahmen mit ihren verhältnismäßig großen Öffnungswinkeln.

Digitale Orthophotos mit einer Pixelgröße von 1 m muß man dagegen noch längere Zeit aus Luftaufnahmen erzeugen. Bisher hat man bei der Digitalisierung der Luftbilder 30-µm-Pixel gewählt; heute erlauben die leistungsfähigen photogrammetrischen Abtaster durchaus eine Pixelgröße von 15 µm. Die entsprechenden Bildmaßstäbe für die digitalen Orthophotos mit 1-m-Pixeln betragen daher zwischen 1:33000 und 1:66000. Solche digitalen Orthophotos können mit Daten im GIS kombiniert werden, die aus Karten 1:5000 stammen.

Die digitalen Orthophotos mit den 1-m-Pixeln würden für Österreich eine Speicherkapazität von 80 Giga-Bytes erfordern, in Farbe sogar 240 Giga-Bytes. Mit den gegenwärtigen EDV-Ressourcen stellt das digitale Orthophoto mit 1-m-Pixeln wohl die Grenze der Machbarkeit dar.

Digitale Orthophotos mit noch kleineren Pixeln, z.B. 0.5-m-Pixel aus Bildmaßstäben zwischen 1:15000 und 1:30000, wird man nur in wirtschaftlich hochentwickelten Regionen wie z.B.

Stadtlandschaften herstellen. Dafür braucht man ein DGM, das auch die groben Umrisse der Kunstbauten enthält. Auf diese aktuelle und große Herausforderung für ein zukünftiges DGM wurde in einer anderen Veröffentlichung [Kraus, 1993] bereits eindringlich hingewiesen. Beispiele über die negativen Auswirkungen von fehlenden Kunstbauten im DGM wurden ebenfalls bereits veröffentlicht [Ecker et al., 1993].

3.3 Hard- und Softwareaspekte

Zunächst wird auf die Herstellung der Orthophotos näher eingegangen.

3.3.1 Herstellung der Orthophotos

Die Herstellung von digitalen Orthophotos mit einem auf dem Markt befindlichen GIS ist zur Zeit nur beschränkt möglich; sie erlauben nur – falls überhaupt – sehr einfache Geokodierungsverfahren wie Polynomverzerrungen. Diese dürfen aber nur in Sonderfällen angewendet werden [Ecker, 1993]. Für die geometrisch exakte Geokodierung benötigt man zusätzlich ein digitales Geländemodell. Entsprechende Programme sind inzwischen für unterschiedliche Computer verfügbar. Vor allem UNIX-Workstations, wie sie auch für die meisten GISe verwendet werden, sind dafür prädestiniert. Es gibt aber auch Programme für PCs.

Bei der Herstellung der Orthophotos aus photographischen Luftbildern ist der erste Schritt die Digitalisierung des Bildmaterials. Scanner für die Orthophotoherstellung müssen in der Lage sein, farbige Durchlichtvorlagen (Filme) mit hoher Präzision und ausgezeichnete Auflösung zu digitalisieren. Einfache Desktop-Scanner können diese Anforderungen nicht erfüllen. Deshalb muß man auf teure Spezialgeräte zurückgreifen. Diese erlauben Pixelgrößen von bis zu 7 µm mit einer geometrischen Positioniergenauigkeit von 1 µm bei einer radiometrischen Auflösung von 256 Stufen in den 3 Farbkanälen. Der Scanner ist zur Zeit sicher das mit Abstand teuerste Stück Hardware bei der digitalen Orthophotoherstellung.

Die Berechnung von digitalen Orthophotos erfordert große Speicherkapazitäten. Nur ein Farbluftbild, mit 15 µm gescannt, benötigt bereits 705 Mega-Bytes Speicherplatz. Bei den meisten Projekten [Ecker, 1993] begnügt man sich gegenwärtig mit 30-µm-Pixeln. Ein Schwarz-Weiß-Luftbild benötigt in diesem Fall 59 Mega-Bytes. Wegen der bei der Berechnung notwendigen Zwischenschritte bedarf es aber doch mindestens 118 Mega-Bytes Speicherplatz für die Entzerrung eines Bildes.

Der Zugriff und die Archivierung von landesweiten Orthophotos erfordert noch größere Massenspeicher. Die folgende Tabelle zeigt den benötigten Speicherplatz für Farb-Orthophotos (24 Bits je Bildelement) in Abhängigkeit von der Pixelgröße im Orthophoto und der Fläche. Orthophotos von Österreich (80000 km²) mit 1-m-Pixeln erfordern 240 Giga-Bytes Speicherplatz. Mit einer Juke-Box (sie verwaltet optische Harddisks) kann auf diesen Datensatz sogar operatorlos zugegriffen werden. Für die Archivierung eignen sich vor allem die relativ billigen Magnetbandkassetten (DAT, Exabyte), die jeweils ca. 1 bis 4 Giga-Bytes Speicherkapazität haben. Durch Komprimierungsalgorithmen können die Daten softwaremäßig noch reduziert werden. Nach unseren Erfahrungen ergeben sich bei Orthophotos und den bekannten Algorithmen von Huffman und Lempel-Ziv [Lelewer und Hirschberg, 1987] Einsparungen um 10 bis 50 Prozent. Geometrisch hochauflösende Orthophotos erlauben dabei größere Einsparungen. Für die Archivierung der 0.25-m-Orthophotos von Österreich benötigt man ca. 1152 Magnetbandkassetten mit 2 Giga-Bytes Speicherkapazität bei einer Kompressionsrate von 40%, im Vergleich zu 51200 Kartenblättern (50 x 50 cm²) im Maßstab 1:2500 eine kleine Zahl.

Fläche	Pixelgröße		
	0.25 m	1 m	5 m
1 km ²	48 MB	3 MB	0.12 MB
80000 km ²	3840 GB	240 GB	9.6 GB

An den Rechner werden bei der Orthophotoherstellung keine besonderen Anforderungen gestellt. Wichtig ist die Verwaltung sehr großer Datenmengen, d.h. es müssen Anschlußmöglichkeiten für zusätzliche Harddisks sowie Magnetbandlaufwerke vorhanden sein. Vorteilhaft ist außerdem eine hohe Prozessorleistung und ein großes Memory. Für die Orthophotoherstellung eignen sich daher besonders UNIX-Workstations, aber auch sehr gut ausgestattete PCs unter OS 2 oder Windows-NT.

3.3.2 Orthophotos im GIS

Digitale Orthophotos können am besten in hybriden GISen (sie ermöglichen die gemeinsame Bearbeitung von Vektor- und Rasterdaten) eingesetzt werden. Viele GISe erlauben heute die kombinierte Darstellung von Orthophotos (Rasterdaten) mit Vektordaten. Es besteht aber häufig ein Mangel an qualifizierten Werkzeugen für die integrierte Bearbeitung. Es ist unbestritten, daß abhängig von der

Problemstellung einmal Raster- und einmal Vektormethoden der Vorzug zu geben ist. Die Datenkonversion von Vektordaten in Rasterdaten und umgekehrt ist daher ein wichtiges zu forderndes Hilfsmittel.

Die digitale Bildverarbeitung bietet ein breites Spektrum an Möglichkeiten, die auch in einem entsprechend ausgestatteten GIS genutzt werden können. Bildverbesserungsalgorithmen ermöglichen prägnante Visualisierungen von relevanten Bildinhalten. Multispektrale Klassifizierungen erlauben die thematische Klassifizierung von Orthophotos. In Zukunft wird es durch die Mustererkennung möglich sein, Objekte automatisch oder zumindest automationsgestützt im Orthophoto zu erkennen [z. B. *Gunst und Lemmens, 1992*].

Für die praktische Arbeit mit dem Orthophoto im GIS sind kurze Bildaufbauzeiten erforderlich. Effiziente Zugriffsalgorithmen sind notwendig, weil in den meisten Fällen nur Ausschnitte – wegen der begrenzten Auflösung der Bildschirme – von Orthophotos am Schirm bearbeitet werden können. Spezielle Graphikhardware kann nützlich sein, um schnellere Bildaufbauzeiten (z. B. beim Verändern eines Ausschnittes) zu erreichen. Der heutige Standard von gleichzeitig 256 Farben reicht für Schwarz-Weiß-Orthophotos aus. Bei der Bearbeitung von farbigen Orthophotos sind die teureren Bildschirme, die 16 Millionen Farben ermöglichen, notwendig.

4. Praktische Erfahrungen

Die Äußerungen in diesem Aufsatz konnten vor dem Hintergrund gemacht werden, daß am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien in den vergangenen Monaten einige hundert digitale Orthophotos hergestellt wurden. Die Palette der digitalen Orthophotos aus Luftbildern schwankt zwischen Pixelgrößen von 0.1 m bis 1 m. Darüber hinaus wurden mehrere großräumige Geokodierungen von Satellitenaufnahmen, beginnend von LANDSAT-TM über SPOT und KFA-1000 sowie KWR-1000 bis hin zu den Radaraufnahmen des ERS-1 durchgeführt. Die digitalen Orthophotos wurden in hybriden GISen mit Vektordaten vereinigt; dabei konnten die im Abschnitt 2 zum Ausdruck gebrachten hohen Erwartungen an solche kombinierten Datensätze mehr oder weniger bestätigt werden.

Literatur

- Ecker, R. [1992]:* Digital orthophoto generation based on a high-quality DTM. The ITC Journal, Vol. 20, No. 1, Enschede, S. 59-64
- Ecker, R. [1993]:* Digitale Orthophotos im GIS. Presented paper for 9th AM-FM European Conference, Strasbourg, im Druck
- Ecker, R., Kalliany, R., Otepka, W. [1993]:* High quality rectification and image enhancement techniques for digital orthophoto production. – In: *Fritsch, D., Hobbie, D. (Hrsg.):* Photogrammetric Week '93 (44. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, 1993). Wichmann Verlag, Stuttgart, S. 143-155
- Gunst, M., Lemmens, M. [1992]:* Automized updating of road databases from scanned aerial photographs. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission IV, Washington, D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B4, Washington, D. C., S. 477-484
- Kraus, K., Schneider, W. [1988]:* Fernerkundung, Band 1. Dümmler Verlag, Bonn, 387 S.
- Kraus, K., with contributions by Waldhäusl, P. [1993]:* Photogrammetry, Vol. 1. Dümmler Verlag, Bonn, 397 S.
- Kraus, K. [1993]:* Qualitätssteigerung photogrammetrischer Produkte mittels digitaler Bildverarbeitung. Zeitschrift für Vermessungswesen, 188. Jahrgang, Heft 8, Stuttgart, S. 403-407
- Kraus, K., Haussteiner, K. [1993]:* Visualisierung der Genauigkeit geometrischer Daten. International Journal of Geographic Information Systems, Vol. 6, No. 1, London/New York, S. 7-12
- Kuhn, H. [1989]:* Digitale Erzeugung von Perspektivbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 347, Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 94 S.
- Lelewer, D. A., Hirschberg, D. S. [1987]:* Data compression. ACM Computing Surveys, Vol. 19, No. 3, Baltimore, MD., S. 261-296
- Loodts, J. [1993]:* Digital orthophotos and GIS: The perfect couple. Proceedings of the International Symposium »Operationalization of Remote Sensing«, Vol. 6, Enschede, S. 205-216

Riess, A., Albertz, J., Söllner, R., Tauch, R.
[1993]: Neue hochauflösende Satellitenbilddaten
aus Rußland. Zeitschrift für Photogrammetrie
und Fernerkundung, 61. Jahrgang, Heft 1, Karls-
ruhe, S. 42-46

Friedrich S. Kröll

Interpolation – eine triviale Ingenieuraufgabe?

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Modellen ist für den Menschen seit alters her eine wesentliche Voraussetzung für sein Verstehen – oder besser »Begreifbar-machen« – einer sehr komplex funktionierenden und weitgehend unverständlichen Umwelt. Dabei kommt es mangels »besseren Wissens« über die Zusammenhänge oder aus anderen Gründen zu mehr oder weniger starken Vereinfachungen. Diese erleichtern dann zwar häufig unser Verständnis grundlegender Tatbestände, können aber wegen des dadurch entstandenen, nur groben Abbildes nicht alle Einzelheiten enthalten. Will man die Güte von Modellen beurteilen, so muß man entsprechende Kriterien für ihre Bewertung zumeist als Genauigkeiten – wieder als Modelle – entwickeln. Auch Interpolationen müssen Modellen genügen, die nur mehr oder weniger gute Abbilder der zumeist unbekanntem oder erst noch näher zu ergründenden Realität sein können. Diese Tatsache bedingt in der Praxis des Ingenieurs unterschiedliche Strategien für ausgewählte und nachfolgend behandelte Aufgaben. Diese mögen verdeutlichen, daß Lösungen scheinbar einfach zu lösender Aufgaben, betrachtet man alle notwendigen Einzelheiten, nicht notwendigerweise auch trivial sein müssen.

Summary

Of old ages for mankind the development of models is an essential prerequisite for the comprehension of a complex functioning and mainly not understandable environment. Lacking of better knowledge of mutual relationships or of other reasons more or less heavy simplifications must be made. These frequently simplify our understanding of the principal facts but don't contain all the necessary details because of the resultant only inaccurate image. To qualify the value of models one has to develop reasonable criteria for their evaluation, mainly as precisions – and again as models. Also interpolations must satisfy models, which can only be imperfect images of the mainly unknown reality, which mostly has to be investigated more deeply. This fact requires various strategies applied by the engineer for selected examples, which are subsequently dealt with. They demonstrate that

solutions of apparently simple problems must not necessarily be trivial, when all necessary details are considered.

1. Modelle der Umwelt und ihrer Erscheinungen

Der Mensch versucht seit seinem Bestehen, sich seine Umwelt nicht nur begreifbar, sondern vielmehr auch vorhersagbar, also berechenbar zu machen. Bereits früheste, uns bekannt gewordene Quellen, aber auch alle Religionen, moraltheoretische und philosophische Maximen zeugen für diese Bestrebungen. Dabei ist der Mensch in verschiedenen Epochen und in verschiedenen Kulturen gemäß seinem jeweiligen Verständnis der ihn umgebenden Natur zu sehr voneinander abweichenden Ergebnissen gekommen. In moderner Terminologie können wir von den daraus erkennbaren unterschiedlichen Modellen zu Verständnis, Nutzung, Manipulation und schließlich Ausbeutung der Umwelt/Natur in verschiedenen Kulturen und Zeiträumen sprechen. Modellvorstellungen haben nicht nur unsere Frühgeschichte geprägt, sie sind auch heute noch überall im Alltagsleben und in unseren Wissenschaften anzutreffen.

Eingriffe in die Natur sind Teil der Menschheitsgeschichte. Durch immer effizientere Mittel und Methoden werden jedoch deren Auswirkungen (Modellfehler nicht der Realität angepaßter Modelle) immer gravierender. Besondere Erfolge der modernen Naturwissenschaften, aber auch Errungenschaften moderner Technik und Medizin haben unser Weltbild und damit auch dessen Modelle in atemberaubender Geschwindigkeit während der letzten Jahrhunderte – und dies zunehmend beschleunigt – entscheidend geändert. Die Idee von der Realisierbarkeit aller Zielvorstellungen einer beliebigen und stets steigerbaren Verbesserung unserer Lebensbedingungen und unserer Umwelt hat allerdings besonders in den letzten Jahren durch die kaum mehr hinzunehmenden Folgen und deren mit hoher Wahrscheinlichkeit – und in vielen Bereichen sicheren – Unumkehrbarkeit einen entscheidenden Dämpfer bekommen.

Es wird uns immer mehr bewußt, wie wenig wir im Grunde wissen:

- Wir erkennen, wie schlecht wir die vielfältigen und komplexen Zusammenhänge des Lebens und seiner Kreisläufe trotz aller durch unser Streben nach Ausweitung unserer Erkenntnis bedingten Fortschritte wirklich verstehen und wie grob unsere Modelle trotzdem immer noch sind.
- Wir erkennen, daß viel zu einfache Modellvorstellungen die komplexe Realität vielfältiger Vernetzungen nur unzureichend abbilden und plausibel machen können. Sie reichen trotz aller, gerade in den letzten kaum dreißig Jahren gewaltig verbesserten Rechenhilfsmittel und Programme bei weitem nicht aus, um als Grundlage für unsere Eingriffe zu dienen und vor allem die immer stärker beobachtbaren Schäden als Folge dieser Eingriffe zu verhindern.
- Wir erkennen immer mehr, daß unsere mit atemberaubendem Tempoo vorgenommenen Eingriffe in unsere Umwelt und schließlich in die gesamte Natur diese nicht auch für die Zukunft erhalten, sondern nur ausbeuten und die Vielfalt des Lebens innerhalb kürzester Zeit unwiederbringlich vernichten.
- Wir erkennen, möglicherweise viel zu spät, daß unsere Eingriffe bei ganzheitlicher Betrachtung keine langfristig sinnvollen Maßnahmen darstellen und die Verbesserung der Lebensbedingungen des Einzelnen die Basis des gesamten Lebens auf unserer Erde entscheidend und in vielen Teilen bereits irreversibel gestört hat.

Diese negativen Folgen sind nur teilweise den groben, unvollständigen und unzureichenden und oft zu sehr simplifizierenden Modellen zuzuschreiben, die wir uns von unserer Umwelt und deren Realität machen. Ein weiterer und gravierender Grund ist das Unvermögen des Menschen, seine für das Überleben als Einzelner oder in (kleinen) Gruppen perfektionierten egoistischen Eigenschaften und Bestrebungen nach Eigennutz nunmehr zugunsten einer überzuordnenden Gemeinschaft aller Menschen aufzugeben. Ohne Sicherheit, daß alle solchen Forderungen folgen, sind wir einzeln kaum geneigt, auf Gewinn – und sei er noch so kurzfristig – zu verzichten und den vielfach vorhandenen guten Einsichten auch zu folgen.

2. Wissen und seine Vermittlung als Voraussetzung für Modellierungen

Somit wird deutlich, daß der Mensch einerseits in seinem Streben nach immer mehr Erkenntnis und Wissen sehr erfolgreich war und ist, andererseits die

gewonnenen Einsichten und Theorien aber doch nicht in langfristig sinnvolle Praxis umsetzen kann. Unser System der Aus- und Fortbildung, unsere Universitäten und Forschungsanstalten, aber auch die Zielvorstellungen unseres Wirtschaftssystems tragen hierzu ebenso entscheidend bei wie unser egoistisches Streben nach maximiertem Gewinn für den Einzelnen auf Kosten des Ganzen.

Zur Bewältigung und Vermittlung unseres Wissens müssen wir dieses in begreifbare Einzelheiten und Teilgebiete zerlegen. Ein Universitätsstudium soll nicht nur Wissen anhäufen, sondern auch zu selbständigem Denken erziehen und Basis für ein Einarbeiten in neue und fortgeführte Wissensgebiete sein. Auch hier ist das Ziel, dem Menschen Grundlagen an die Hand zu geben, um erfolgreich später wechselnden Anforderungen und Bedingungen zu seinem und dem Wohle unserer Wirtschaft genügen zu können.

Inhalt und Umfang des hierfür zu vermittelnden Wissens wird in den Universitäten und durch die Politik verstärkt diskutiert. Basis hierfür ist wiederum das Ziel einer Gewinnmaximierung nach einer Analyse von Kosten und Nutzen verschiedener nationaler Ausbildungssysteme und deren verstärkter Konkurrenz durch das Zusammenwachsen der europäischen Wirtschaft in EU (EG) und EWR.

Diese Kriterien scheinen sicherlich häufig für eine kurzfristig überschaubare Zukunft des Einzelnen wichtig. Langfristig jedoch ist viel wichtiger, eine solide Basis zu übergeordnetem Denken in grundlegenden Zusammenhängen und entsprechendem Handeln zu legen. Hierfür ist das in begreifbare Bruchstücke zerlegte Wissen wieder ganzheitlich und im Lichte übergeordneter Bedeutungen und Auswirkungen zusammenzusetzen. Unsere Fiktion von der letztendlichen Realisierbarkeit aller Zielvorstellungen und von deren grundsätzlicher Berechenbarkeit erweist sich immer mehr als trügerisch, solange wir hierfür keine gesicherten Grundlagen in genauen und alle Vernetzungen möglichst berücksichtigenden Modellen gefunden haben. Abhilfe schaffen kann auf längere Sicht nur ein gesunder Kritizismus gegenüber jeder unserer Tätigkeit, sei es deren Planung oder die Erforschung ihrer Grundlagen und Strukturen. Nur ein fortwährendes *Infragestellen* aller noch so gesichert erscheinenden Erkenntnisse und deren immer neue Durchdringung in neuem Kontext kann zu langfristig vertretbaren Entscheidungen führen. Dies muß jedoch ständig geübt werden. Wichtig ist, daß nicht nur Rechnungen in vorgegebenen Bahnen wiederholt, sondern auch die Modelle optimiert und angepaßt werden. Wer, wenn nicht Absolventen unserer hohen Schu-

len und Universitäten soll und muß sich vorrangig dieser Aufgabe annehmen und dazu in die Lage versetzt werden?

Jeder planende Ingenieur weiß, wie essentiell und wie schwierig dieses Streben nach einer möglichst ganzheitlichen Betrachtungsweise der zu lösenden Probleme für seinen Erfolg ist. Leider mißt sich dieser Erfolg häufig in möglicherweise nur kurzfristigem Nutzen. Dann ist zwar die Zusammensetzung der Wissensteile eines Fachgebietes gelungen, nicht jedoch deren Einbindung in einen übergeordneten Rahmen. Solange wir jedoch hierfür keine moralisch zwingenden Maximen aufgestellt und für deren unbedingte Einhaltung sorgende Instrumentarien entwickelt haben, muß ein wesentliches Element jeder Ausbildung sein, das Verständnis für Handlungen und Eingriffe und deren Folgen sowie für die Verantwortung jedes Einzelnen im Rahmen des übergeordneten Ganzen bestmöglich zu wecken.

3. Schritte zu ganzheitlichen Betrachtungsweisen

An zunächst trivial und einfach erscheinenden Beispielen als *Photogrammetrie*, *Fernerkundung* und *Kartographie* sei ausgeführt, daß nicht nur die Einbindung unserer scheinbar so gesicherten und in Modellen gezwängten Fachdisziplin in den notwendigen übergeordneten Rahmen schwierig zu bewerkstelligen ist, sondern die Modelle selbst auch immer wieder in Frage gestellt und den jeweiligen Zielen jedes Projektes angepaßt werden müssen. Die Aufstellung von Modellen dient einer *Formalisierung von Strategien*. Sie muß die Grundlagen in ausreichendem Maß berücksichtigen und alle Folgen bestmöglich abschätzen und nach aufzustellenden Kriterien bewerten.

3.1 Modellierungsstufen

Am Beispiel der *Aerotriangulation* läßt sich das Problem der Konzeption von Modellen und ihrer Weiterentwicklung gut nachzeichnen. Als elegante und leistungsfähige Methode zur Überbrückung festpunktloser Räume verdichtet die *Aerotriangulation* vorhandene Festpunktfelder und zählt daher zu den *Interpolationsaufgaben*.

Untersuchungen über das Genauigkeitsverhalten photogrammetrischer Streifentriangulation und der dort herrschenden Fehlerfortpflanzung waren vor dem Zweiten Weltkrieg – wie Lehrbücher jener Zeit zeigen – noch nicht weit gediehen (s. a. *Schwedefsky [1936]*, *Zeller [1948]*). Sie wurden erst nach Entwicklung tragfähiger Modelle unter Einbezie-

hung moderner statistischer Verfahren (z. B. auch Monte-Carlo-Simulationen) in die Überlegungen erfolgreich.

Die Entwicklung der *Aerotriangulation*, komprimiert auf wesentliche Schritte, zeigt:

- *Streifentriangulation* durch empirische Wiederherstellung der Aufnahmesituation an speziell konstruierten Geräten mit vielen Projektoren vom Typ Multiplex mit nachfolgender Fehleraufteilung durch gemeinsame Einpassung ins Landessystem. Berechnungen vermied man so auf Kosten erzielbarer Genauigkeiten.
- *Graphische Ausgleichungen* registrierter Modellkoordinaten nach Streifentriangulation mit Polynomen (zweiten Grades) nach Verdin, v. d. Weele, Zarzycki und Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, da lange Triangulationsstreifen immer ein gleichartiges charakteristisches Verhalten aufweisen. Nach kontinuierlichen Auf- und Abwölbungen tritt meist plötzlich eine durch Polynome zweiten oder dritten Grades beschreibbare Trendumkehr ein. Durch Doppelsummation zufälliger Fehler ist ein ähnliches Verhalten simulierbar. Zur Verbesserung des Polynom-Modelles der Ausgleichung mußte man nur noch erkennen, wie Orientierungsfehler auf Koordinaten wirken und warum sie durch Doppelsummation beschreibbar sind.
- *Radialschlitz-Triangulation* [s. a. *Schwedefsky, 1936*] als mechanisches Verfahren der Ausgleichung liefert Lagekoordinaten mit möglichst exakten Vertikalnahmen auch für nicht ebenes Gelände. Es wird ein Äquivalent zur numerischen Ausgleichung gleichgewichtiger Fehler nach der Methode der kleinsten Quadrate erzielt.
- *ITC-Jerieverfahren* [Jerie, 1958] als räumliche, mechanische Blockausgleichung gleich- und ungleichgewichtiger Fehler mit weltweiter Verbreitung.
- *Anblock-Methode* durch van den Hout [1966] ursprünglich für ebenes Gelände entwickelt als rechnerische Ausgleichung von Lageblöcken in ebenem Gelände durch verknüpfte ebene konforme (Helmert-) Transformationen; später auf drei Dimensionen erweitert.
- *PAT M 43* von Ackermann [1970, 1973] entwickelt als leistungsfähiges Programm für Ausgleichungen zufällig verteilter Fehler nach der Methode der kleinsten Quadrate für Blöcke aus Einzelmodellen (und damit auch für Triangulationsstreifen) nach Messungen an analogen Universal- bzw. Präzisionsauswertegeräten.
- *Bündellösungen* für die *Aerotriangulation* nach Messungen von Bildkoordinaten mit Komparato-

ren, die nicht zusätzlich auch für topographische Auswertungen einsetzbar und deshalb teuer, unflexibel und nicht so weit verbreitet sind. Erst moderne analytische Auswertegeräte vermeiden diese Spezialisierung.

- Die *Simulation des Fehlerverhaltens* beliebig konfigurierter Blöcke und Anordnungen von Verknüpfungs- und Paßpunkten, basierend auf realistischen Modellen des Verhaltens unvermeidlicher Fehler, ergab wesentliche Einblicke in deren *Genauigkeitsverhalten* und *Fehlerfortpflanzung*. Der exakten und wirtschaftlich optimierten Planbarkeit photogrammetrischer Projekte durch Wahl und Kombination geeigneter Projektparameter war man hierdurch ein entscheidendes Stück näher gekommen.
- Allerdings war nur der Sonderfall *zufälliger Fehler* modelliert. Nicht aufgedeckte *kleine und große grobe Fehler* sowie *systematische Fehleranteile* verfälschten die Resultate, was ohne graphische Darstellung der Restfehler von Verknüpfungs- und Paßpunkten nach der Ausgleichung nicht immer auffällt. Vor allem der *mittlere Fehler* (Sigma Null, Standardabweichung) wird dann als Indikator erzielter Genauigkeit unbrauchbar, ohne dies deutlich zu zeigen.
- Hierdurch wurde die Photogrammetrie nicht nur wie bisher für die Überbrückung *festpunktloser Räume* durch Aerotriangulation und *für topographische Kartierungen* in kleinen und mittleren Maßstäben ein geeignetes, kostengünstiges und rasches Verfahren, sondern erschloß sich durch die Erreichung voraussagbarer Genauigkeiten im cm-Bereich auch die *Aufgaben des Katasterwesens*.
- Wesentliche Voraussetzung hierfür waren auch modernes Filmmaterial auf *stabilen Filmbasen* (Polyester statt Acetat) und die rasch zunehmende Verbesserung der im Computer berechneten und in ihren späteren Eigenschaften im Rechner vorab realitätsgetreu simulierten photogrammetrischen *Objektive*. Diese bilden zur Zeit bereits nahezu ohne Verzeichnung ab. Dadurch folgt eine exakte Zentralperspektive im Rahmen der zur Zeit erzielbaren Meßgenauigkeit von knapp besser als 2 µm, also etwa der Korngröße hochauflösender Filme [Hakkarainen, 1983].
- Die erforderliche Verbesserung des Modelles der Ausgleichung erfolgte durch die Berücksichtigung von *systematischen Fehlern* im Ausgleichungsprozeß und der Simulation ihres Verhaltens in Blöcken unterschiedlicher Konfiguration [Kubik, 1971; Ebner, 1974, 1976].
- *Elimination grober Fehler* aus dem Datenbestand. Begonnen als Datasnooping durch Baarda

[1965, 1967], über viele Beiträge (u. a. Kubik [1984], Förstner [1978], Li [1987]) zur Theorie robuster Schätzverfahren und deren Einbeziehung in moderne Ausgleichungsverfahren mündend.

Ausgereifte Programme erlauben zur Zeit iterativ die Suche und *Elimination grober Fehler*, danach die Berücksichtigung *systematischer Fehlerinflüsse* und die Ausgleichung der dann übrigbleibenden *zufälligen Fehler* nach der Methode der kleinsten Quadrate.

- Die *Kontrolle* und abschließende Beurteilung der Ergebnisse von Blockausgleichungen blieb weiter ein mit viel Erfahrung lösbares Problem. Die Anschaulichkeit verlangt eine *graphische Darstellung* der Restfehler nach der Ausgleichung [Kröll, 1981], für die Programme lange Zeit kaum verbreitet waren. Bedingt ist diese Tatsache durch eine zunächst fehlende Normung bzw. Vergleichbarkeit der Steuerungen von Zeichenanlagen verschiedener Hersteller und geeignet genormter Schnittstellen für eine einfache Portierung erstellter Zeichenprogramme.
- Der skizzierte Ablauf der Entwicklung war im wesentlichen auf den *Vertikalfall* topographischer Anwendungen beschränkt, wo die Gewinnung von Näherungen zur Linearisierung der Komplanaritätsbedingung (als zentrales Problem aller Berechnungen) grundsätzlich keine Probleme liefert. Daß dieser Normalfall der Vertikal Aufnahme in der Praxis ohne unverantwortlichen Aufwand nicht exakt einhaltbar ist, führt ja nur zur vertretbaren Notwendigkeit einer iterativen Verbesserung einmal erzielter Ergebnisse der Ausgleichung. Dieser Prozeß ist praktisch immer nach der ersten Iteration stabil, was man nach der zweiten sicher weiß.
- Weitere erhebliche Erweiterungen des Modells der Aerotriangulation waren notwendig für ihre erfolgreiche Anwendung in der Ingenieurphotogrammetrie (close range) mit Erzielung vorher-sagbarer Genauigkeiten im Submillimeter-Bereich (s. a. Reichenbach, Kröll [1982]).

Abwandlungen und Verfeinerungen der Modelle und Konzepte haben also zusammen mit den Möglichkeiten moderner Rechnertechnologie zu einem Instrumentarium an photogrammetrischen Methoden in komfortabel anwendbaren Programmsystemen geführt, mit dem nahezu beliebige Vorgaben zu erzielender Genauigkeiten sicher einhaltbar sind. Die Überprüfung erzielter Genauigkeiten – vor allem bei Deformationsmessungen – ist jedoch ebensowenig trivial wie die richtige Wahl geeigneter Parameter zur möglichst objektiven und zutreffenden Beschreibung tatsächlicher Verhältnisse während Aufnahme und Messung. Vor allem gilt dies,

wenn das erreichbare Genauigkeitspotential des Prozesses ausgeschöpft werden muß, was aus Kostengründen immer der Fall sein wird. Hierbei hilft auch nicht die Tatsache, daß mit modernen Programmsystemen rasch die Auswirkung vieler Varianten der Zusammenstellung von Parametern untersuchbar wird, solange man nicht weiß, welche Modelle die Realität optimal beschreiben. Je mehr man rechnen kann, um so mehr Denk- und Bewertungsprozesse muß man anschließen, was zwar häufig mühsam ist, aber die Tätigkeit des Ingenieurs trotz aller Rechner und Programme interessant bleiben läßt.

3.2 Interpolation und Extrapolation

Jeder Ingenieur, sicher aber jeder Geodät lernt schon zu Beginn seines Studiums über die Gefahren/Unsicherheit einer Extrapolation gesammelter Daten. Das Gegenteil, die Interpolation in den Datenbestand hinein stellt man sich dabei zumeist als sicher zu bewältigende Aufgabe vor. Grundsätzlich basiert aber auch jede Interpolation auf Modellvorstellungen. Ob diese dem Problem angepaßt sind oder zu nicht erwarteten oder nicht tolerierbaren Fehlern führen, hängt vom Datenmaterial selbst und von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Hierzu folgende Definitionen:

- *Interpolation* ist die Berechnung von Zwischenwerten zu gegebenen Einzelwerten einer Funktion ohne Kenntnis ihres genauen Verlaufes. Das Problem besteht in der Wahl eines in Abhängigkeit von dem vermuteten Funktionszusammenhang zumindest stückweise glatten Verlaufes der Funktionskurve [Knerr, 1988, S. 153ff.]. Die Interpolation kann deshalb nur eine Näherung sein, weshalb die interpolierten Werte grundsätzlich ungenau sind. Meßfehler in den Stützwerten vergrößern die Ungenauigkeit.
- Als *Extrapolation* bezeichnet man ein Fortsetzen einer Meßreihe über den eigentlichen Meßbereich hinaus. Sie soll häufig aus gegebenen bzw. gemessenen Werten den zukünftig zu erwartenden Verlauf vorherbestimmen. Als Trendanalysen sind Extrapolationen zwar weit verbreitet, ohne zusätzliche genaue Kenntnis der Charakteristika eines Prozesses jedoch gefährlich und immer umso ungenauer, je weiter sie in die Zukunft sehen sollen [Knerr, 1988, S. 153ff.] bzw. je weiter man sich vom gesammelten Datenmaterial entfernt.

3.3 Modelle für Genauigkeiten

Alle geforderten Genauigkeiten müssen für ihre wirtschaftliche Einhaltung grundsätzlich sorgfältig

und dem zu lösenden Problem angepaßt gewählt werden. Ein besonderes Problem ist die Überprüfung der Einhaltung geforderter Genauigkeiten. Sie verursacht immer zusätzlichen Aufwand und damit Kosten. Verwendet man beispielsweise bei einer Aerotriangulation nicht alle Paßpunkte in der Ausgleichung, sondern hält einige als Kontrollpunkte zurück, so erhält man zwangsläufig ein besser kontrollierbares, aber schlechteres Ergebnis. Besonders gilt dies, wenn die Kontrollpunkte für die Ausgleichung zur Stützung der Lage (am Blockrand angeordnet) und der Höhe (über das Interessensgebiet verteilt) eigentlich unverzichtbar sind.

Zu beachten sind die folgenden Rahmenbedingungen und Strategien:

- Es ist genau zu überlegen, ob eine nur mit statistischer Wahrscheinlichkeit ermittelte Freiheit von Fehlern im Projekt ausreicht. Ebenso die Folgen, wenn für ein Projekt oder für besonders kritische Teile davon die erzielten Fehler an der oberen Grenze und damit im Bereich statistisch nur selten zu erwartender Fehler liegen. Gelegentlich fordert man zusätzlich zu mittleren auch maximale Fehler oder Fehlerfreiheit – was praktisch nur durch sehr kleine mittlere Fehler realisierbar ist. Grundsätzlich muß sich jeder Berechnung eine Untersuchung des statistischen Verhaltens aller am Rechenprozeß beteiligten Beobachtungen und deren Fehler anschließen. Das ist sicher nicht immer gängige Praxis. Aber nur nach Elimination aller großen und möglichst auch der kleinen groben wie auch der systematisch wirkenden Fehleranteile des Beobachtungsmaterials sind die erzielten Ergebnisse wirklich realistisch beurteilbar.
- Jeder Auftragnehmer muß nicht nur mit statistischer Wahrscheinlichkeit Fehler vermeiden, sondern für jedes Projekt gut überlegen, welchen Schaden im ungünstigen Fall nicht entdeckte Fehler anrichten können. Häufig steht beispielsweise ein nur geringer Erlös einer Planherstellung in keinem gesunden Verhältnis zu dem Wert darauf basierender Baumaßnahmen durch den Auftraggeber. Eine Haftung für wesentlich höhere Schäden als der erzielte Erlös wäre deshalb unzumutbar und völlig unwirtschaftlich. Um mögliche Schwachpunkte frühzeitig aufzudecken oder durch Nach- und Ergänzungsmessungen zu beheben, bevor sie hohen Schaden anrichten können, muß der Planer den Prozeß und die Charakteristika der Planherstellung gut kennen, der Planhersteller jedoch die Anforderungen der nachfolgenden Maßnahmen.
- Die technischen Voraussetzungen elektronisch gesteuerter Rechner und zugehöriger riesiger Da-

tenspeicher mit schnellen Zugriffen erleichtern es uns, viele Vorgänge, Prozesse und Sachverhalte rechnerisch zu kontrollieren, zu beeinflussen oder ihr Verhalten durch Simulation zu ergründen. Notwendig ist hierfür jedoch die Abbildung der Realität in ein – möglichst naturgetreues – Modell und die Entwicklung von Algorithmen zur Beschreibung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten durch geeignet gewählte Parameter, die den Prozeß optimal beschreiben.

Der entstehende Grad an *Wirklichkeitstreue* (model fidelity) des numerisch modellierten Abbildes bestimmt die Güte seiner Übereinstimmung mit der Realität. Um diese zu messen bzw. zu beschreiben, haben wir entsprechende Kriterien zu entwickeln. Zumeist sprechen wir von *Genauigkeit* (accuracy). Geodäten denken dann sofort an *mittlere Fehler*, Beuingenieure an *Toleranz*. Seit mehreren Jahren verwendet man verstärkt auch die Begriffe *innere* und *äußere Zuverlässigkeit* und *Präzision* [Baarda, 1976] als weitere Genauigkeitsmaße (s. a. Torlegård [1981]). Es gelten folgende Definitionen:

- *Mittlere Fehler* sind ein Maß für die Verteilung *zufälliger Fehler*. Diese Verteilung wird für endliche, ausreichend große Stichproben durch die Glockenkurve nach Gauß angenähert und beschreibbar. *Toleranzen* jedoch stellen Grenzwerte dar, deren Überschreitung zu einem Verwerfen der Stichprobe führt. Bei Auftreten von ausschließlich zufälligen Fehlern ist man geneigt, zur Einhaltung der Toleranz im Prozeß einen mittleren Fehler von einem Drittel der Toleranz vorzusehen. Dies ist aber schon eine – theoretisch nicht erlaubte – Kombination und Vereinfachung der beiden zugrundeliegenden Fehlermodelle.
- Fehler kann man einteilen in *zufällig* (random) auftretende, *systematischen* Einflüssen (systematic) gehorchende und in *grobe* (blunders). Vor allem können sich viele systematisch wirkende und zeitabhängige Einflüsse überlagern und zufällige Fehler überdecken. Grobe Fehler kann man noch in kleine und in große grobe Fehler aufteilen, je nachdem, wie weit sie außerhalb des dreifachen und damit schon mit verschwindender Wahrscheinlichkeit auftretenden mittleren Fehlers liegen und als solche mit kleinerer oder größerer Zuverlässigkeit aufdeckbar sind. Die Separation der im Datenmaterial enthaltenen Einflußgruppen und ihrer Anteile ist nur mit guten Modellvorstellungen möglich.
- *Präzision* mißt die *Standardabweichung* (Varianz) der Unbekannten von ihrem Mittelwert.
- *Zuverlässigkeit* hängt in der Statistik zusammen mit dem Schätzen, dem Vorhersagen und dem

Optimieren von Wahrscheinlichkeiten, hier aber mit der Möglichkeit, grobe Fehler zu entdecken und zu eliminieren. Hierzu trägt in der Photogrammetrie die geometrische Bestimmtheit der Messungen in sich überdeckenden Bildern bei.

- *Modelltreue* kann auch als Fehlen von anderen Einflüssen (bias = Schiefe einer Verteilung) als die Gesetzmäßigkeit zufälliger Fehler auf die Schätzwerte definiert werden.
- *Innere Zuverlässigkeit* ist hoch, wenn eine gleich gute Kontrolle aller Beobachtungen gegeben ist. Hierzu kann in der Photogrammetrie eine geeignete Anordnung der Modelle oder Bilder und deren Überdeckungen bzw. das Meßverfahren stark beitragen.
- *Äußere Zuverlässigkeit* ist hoch, wenn unentdeckte Fehler nur einen geringen Einfluß auf das Ergebnis eines Schätzverfahrens haben.
- Einer griffigen Modellvorstellung zufolge setzt sich *Genauigkeit* (accuracy) zusammen aus *Präzision* (innere Genauigkeit) plus *Modelltreue* (model fidelity) plus *Zuverlässigkeit* (reliability).
- Die *Wirtschaftlichkeit* (economy) eines Verfahrens läßt sich ausdrücken als Risiko/Kosten für den Produzenten/Käufer durch die zufolge von Fehlern im Resultat entstehenden Schäden bei nicht eingehaltener oder fehlender (innerer) Genauigkeit, Modelltreue und Zuverlässigkeit.

Will man Abweichungen von einem exakten Algorithmus beschreiben, so sind diese vorgenannten Begriffe angebracht.

Schwieriger wird es, wenn der Kartograph den Begriff Genauigkeit verwendet. Für ihn ist eine Karte genau, wenn sie die Umwelt im Kartenmaßstab *bestmöglich* darstellt. Dazu muß sie wichtige auf Kosten weniger wichtiger Einzelheiten hervorheben. Dadurch soll das Lesen der Karte, also deren Interpretation erleichtert werden. Die Abbildungsgesetze sind somit für die Karte nicht homogen, sondern abhängig von der Bedeutung darzustellender Einzelheiten, ihrer lokalen Anhäufung und gegenseitigen Beeinflussung, ihrem Kontext. Die hierfür anzuwendenden Regeln und Genauigkeiten sind als Grundlage einer Automatisierung der Tätigkeit des Kartographen nur schwierig algorithmisch zu modellieren.

4. Datentypen und Datenmenge

Die Speicherung der uns interessierenden Information bedingt die Unterscheidung der folgenden Datentypen mit jeweiligen Vor- und Nachteilen:

- *Diskretisierung von Kontinua* vieler in erster Näherung kontinuierlicher Erscheinungen unserer Umwelt. Die Erde, auf der wir leben, ist allseits in sich geschlossen. Viele Prozesse laufen zumindest in überschaubaren Zeitintervallen kontinuierlich ab. Zusätzlich gibt es mehr oder weniger plötzlich und mehr oder weniger scharf abgegrenzte Veränderungen der Zustände eines Prozesses oder Kontinuums und weiche, fließende Übergänge. Die Schärfe der Abgrenzung hängt von den gewählten oder benötigten Genauigkeiten und von der Auflösung der Modelle ab.
- Die meßtechnische Erfassung unserer Umwelt und uns interessierender Prozesse kann *kontinuierlich und analog*, aber auch *diskret und digital* in entsprechenden Zeittakten erfolgen. Seit ihren Anfängen zerlegen geodätische Messungen von Winkeln, Strecken und Höhenunterschieden unsere kontinuierliche Umwelt in diskret verteilte Einzelpunkte. Das dadurch entstehende geometrische Gerüst füllt der Kartograph zur Erzeugung eines kontinuierlichen Abbildes mit interpolierender Information.
- Eine Grundlage des Erfolges der Photogrammetrie war seit ihren Anfängen die *analoge Aufzeichnung riesiger Datenmengen* und deren geometrische Verarbeitung in mathematisch definierten Modellen, ohne Rechnungen ausführen zu müssen. Einige Angaben mögen die hierdurch vermiedenen Datenmengen verdeutlichen:
 - Bei einer Auflösung von 2 μm in nur 64 Grauwertstufen enthält das *Bild einer photogrammetrischen Aufnahmekammer* im Format 23 x 23 cm² eine digital nur in 846 Gbyte speicherbare Informationsmenge. Wählt man ein Byte zur Darstellung eines Grauwertes, so benötigt man hierfür mehr als 13 Gbyte Speicherplatz. Für Farbbilder sind diese Zahlen zu verdreifachen. Digitalisiert man ein monochromes Bild mit einer geometrischen Auflösung von 15 μm , erhält man 256 Mbyte an Informationen, die man in etwa eineinhalb Stunden von einem Exabyte-Band in eine SUN Sparc-Station einlesen und in einer dreiviertel Stunde im Ethernet verschicken kann, wenn keine Daten-Komprimierung erfolgt. Für eine auf 30 μm reduzierte geometrische Auflösung reduzieren sich die genannten Werte jeweils auf ein Viertel.
 - Die moderne Satellitentechnik beschert uns noch viel größere Datenmengen. *Landsat* konnte seine ursprüngliche geometrische Auflösung des *Multi-Spektral-Scanners* (MSS) von etwa 80 x 56 m² in 7 Kanälen für Szenen von 185 x 185 km² und damit einem Informationsgehalt von 7,6 Mbyte je Kanal durch den *Thematic Mapper* (TM) auf 30 x 30 m² entsprechend 38 Mbyte je Kanal für die gleiche Fläche steigern.
- *SPOT* liefert für Color-Szenen in drei Kanälen von etwa 60 x 60 km² eine geometrische Auflösung von 20 x 20 m² und damit 9 Mbyte je Kanal. Für einen panchromatischen Kanal liefert SPOT eine geometrische Auflösung von 10 x 10 m² und damit 36 Mbyte.
- Gemäß einer Dornier-Produktinformation vom 17.06.1993 steigert *Landsat 6* mit dem *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) durch einen zu den bisherigen 7 Spektralkanälen zusätzlichen panchromatischen Kanal von 0,50-0,90 μm Wellenlänge die geometrische Auflösung auf 13 x 15 m² und damit die Datenmenge für diesen Kanal auf 175 Mbyte.
- Der *Radar-Satellit ERS-1* liefert in den *Fast Delivery SAR Images* mit etwa 6300 Zeilen mit 5000 Spalten mit einer geometrischen Auflösung von 20 x 16 m² von Szenen einer Ausdehnung von 100 x 100 km² etwa 63 Mbytes an Informationen. Als *Precision SAR Image* verarbeitete Szenen der gleichen Ausdehnung haben die geometrische Auflösung 12,5 x 12,5 m² und damit die Datenmenge 82-144 Mbytes bei einer radiometrischen Auflösung von einem Byte, für die auch erhältliche radiometrische Auflösung von zwei Bytes jedoch die doppelte Menge [*Proud und Battric, 1992*]. Im knapp ersten Jahr seines Umlaufes produzierte ERS-1 mehr als 200 000 Allwetter-Radarbilder [*Mc Cay, 1993*]. Wären sie alle absetzbar, stellten sie gemäß der Preisliste vom Sommer 1993 als einfaches Produkt einen Wert von DM 250 Millionen dar, als geokodierte Szenen jedoch von DM 650 Millionen.
- *Mengenlehre und Fuzzy Logic*: unsere Algebra und die daraus folgenden Rechenregeln gehen davon aus, daß Werte entweder zu einem Wertevorrat, einer Menge gehören oder nicht. Scharfe Abgrenzungen von Zugehörigkeiten lassen sich dadurch gut algorithmisch verarbeiten. Die numerische und/oder statistische Verarbeitung der unscharfen Zugehörigkeiten bedingt entsprechend angepaßte Modelle. Sie sind seit etwa 1995 als *Fuzzy Logic* bekannt geworden und durch *Zadeh [1965]* eingeführt [*Bandemer, 1990*]; s. a. *Kandel [1986]* und *Tilli [1992]*. Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie suchen noch nach Umsetzungen dieses Modelles für ihre Anwendungen. (Untersuchungen zur Anwendung der Regeln der *Fuzzy Logic* für GIS erfolgten am ITC, Enschede, durch *Drummond [1988]*).

- *Vektordaten* entstehen durch Messungen bzw. Ableitung von Koordinaten diskret verteilter Punkte und deren Verbindung. Bereits während der Messung interpretiert und klassifiziert man die Umwelt und ihre Erscheinungen. Die Punkte selbst interpretiert man als Vektoren der Ausdehnung null. Verbindungen je zweier oder mehrerer Punkte liefern Vektoren und schließlich offene oder geschlossene Polygone.
- *Gekrümmte Linien* sind mit geodätischen Mitteln nur aufwendig aufzunehmen, photogrammetrisch jedoch einfach, kostengünstig und relativ genau durch eine kontinuierliche Erfassung und Registrierung.
- *Ebene und Räumliche Daten*: Methoden und Geräte der Geodäsie haben zu einer getrennten Betrachtung und Behandlung von Lage (zwei Dimensionen) und Höhen (eine Dimension) geführt. Ein Modell, das erst durch GPS-Messungen in dreidimensionalen, also räumlichen Modellen überwunden wird. Die Photogrammetrie hingegen liefert, seit es analoge Stereoauswertegeräte gibt, ohne Mehraufwand Koordinaten in drei Dimensionen. Dadurch sind die Modelle der Photogrammetrie seit jeher dreidimensional.
- Aus praktischen Gründen der Darstellung der Information in Karten und wegen der entstehenden Datenmenge hat die Photogrammetrie jedoch ihr Modell in sogenannte *zweieinhalb Dimensionen* (zweidimensionale und an ausgewählten Stellen dreidimensional ergänzte Darstellungen) unterteilt.
- *Dreidimensionale Daten* erfordern die Speicherung der zu sammelnden Information in Datenbanken (GIS/LIS) für beliebigen Zugriff und Weiterverarbeitung.
- Erweiterungen für *mehrdimensionale Daten* (z. B. Stockwerkhöhen oder geologische Horizonte in Vertikalsonden) sind vorzusehen. Photogrammetrische Methoden müssen hierzu nicht geändert werden. Weitere Dimensionen in GIS/LIS wären für die Speicherung von Zeit und/oder Genauigkeit erfaßter Information vorzusehen.
- *Punkt-, Linien- und Flächendaten* erzeugt man aus Vektordaten für kartographische Zwecke. Flächen können in diesem Modell nur durch ihre (zumeist scharfe) Abgrenzung definiert werden. Ob Punkte innerhalb oder außerhalb einer Fläche liegen, muß im Rechner zeitaufwendig getestet werden. Das Auge des Menschen kann diese Entscheidung zweifelsfrei und »augenblicklich« treffen.
- Zu den Vorteilen der Vektordaten zählen ihr *geringer Speicherbedarf* gegenüber Rasterdaten und eine vorzügliche Eignung zur Speicherung beliebiger Information in GIS/LIS (s. a. *Maguire [1991]*).
- *Rasterdaten* liefert die Fernerkundung mit Satelliten und entsprechenden Sensoren direkt von in Spektralkanälen (definierten Bereichen des elektromagnetischen Spektrums) aufgezeichneter radiometrischer Information in geometrischer, rasterförmiger Anordnung.
- Die Szene wird hierbei in *Bild-Elemente*, sogenannte *Pixel*, zerlegt, für die je Spektralkanal ein Grau- oder Farbwert entsprechend der radiometrischen Auflösung des Sensors gespeichert wird.
- *Multi-Spektral-Scanner* (MSS) erweitern den radiometrischen Aufnahmebereich vom panchromatischen über sichtbare Farbe des elektromagnetischen Spektrums in dessen thermalen Bereich mit nahem, mittlerem und fernem Infrarot zur Gewinnung zusätzlicher Information.
- *Radar* zur Registrierung reflektierter Signale im Mikrowellenbereich dient auch zur Gewinnung zusätzlicher Information.
- Die Ausweitung des Informationsgehaltes bedingt die bereits beschriebene Datenflut. Muß man doch die gesamte Raster-Szene mit Werten für alle Pixel füllen, speichern und verarbeiten. Vektordaten hingegen speichern Information nur dort, wo diese gesammelt ist.
- *Kompression* der Daten und deren *Laufängerkodierung* verringern den Speicherbedarf, bedingen aber vor Zugriffen auf die Daten Rechenzeiten für die Dekompression.
- *Klassifizierung* ist die *Interpretation* von Rasterdaten. Sie ist mit oder ohne Musterdaten als *überwachte* bzw. *nicht überwachte* Klassifizierung programmgesteuert möglich. Bei ersterer sucht man nach Pixeln, die mit angebbaren Wahrscheinlichkeiten (*Maximum Likelihood*) zu einer Klasse, einem Muster gehören. Bei der zweiten Methode zerteilt man die Szene nach numerischen Regeln in sogenannte Cluster, woher der Ausdruck *Cluster-Analyse* (s. a. *Dubes [1976]* und *Späth [1977]*) kommt. Danach muß man feststellen, welche Klassen von Information in den Clustern abgebildet sind und ob diese so gefundenen Klassen überhaupt brauchbar sind. Die Klassifizierung liefert über Informationsmuster (samples) direkt Flächen gleicher Klassen, deren Abgrenzung danach ermittelt werden muß.
- *Hybride Daten* (sowohl Raster- wie auch Vektorstrukturen) sind für eine Kombination der Vorteile und Vermeidung ihrer Nachteile mit modernen Systemen aus Geräten und Programmen zur

Bildverarbeitung vorgesehen. Dabei sollen die speichergünstigen Vektorstrukturen für Zugriffe auch nach Operationen der Bildverarbeitung erhalten bleiben und aus Rasterdaten Vektoren ableitbar, in die Vektorwelt integrierbar und Darstellungen symbolisierter Vektoren den Rasterbildern so überlagerbar sein, daß der Informationsgehalt der Rasterdaten erhalten bleibt. Der Bearbeiter soll beliebige Übergänge von Raster- in Vektordaten und umgekehrt möglichst nicht besonders merken.

- *Datenkonversion* von Vektor in Raster gestatten triviale und eindeutige Rechenmodelle. Allerdings muß hierzu jeder durch seine Endpunkte gegebene Vektor in eine lückenlose Folge von aneinandergrenzenden Grauwerten – die all ihre Nachbarn nicht kennen – umgewandelt werden. Die umgekehrte Operation ist nicht so trivial auszuführen, da wegen der flächenhaften Strukturen von Rasterdaten oftmals nur undeutlich vorhandene Kanten gesucht, gefiltert und in Vektoren umgewandelt werden müssen. Für häufig vorkommende sanft ansteigende Grauwerttrampen als Grenze zwischen homogenen Flächen muß mit *Schwellenwerten* (thresholds) die Grenze festgelegt und meist auch auf ein Pixel Dicke skelletiert werden.

5. Ausgewählte Beispiele zum Problem der Interpolation

Die folgenden Beispiele sind dem Geodäten längst vertraut und zumeist lästige, manuell auszuführende, ermüdende und meist auch uninteressante und deshalb durch Einsatz von Digitalrechnern und Entwicklung entsprechender Programme zu automatisierende Tätigkeiten. Hierzu sind antrainierte Arbeitsschritte, deren Folge und logisch variierte Zusammensetzung zu formalisieren, in Algorithmen umzusetzen und Kriterien für die Folge der Entscheidungen festzulegen. Es sind also geeignete Modelle – Formalisierungen – aufzustellen, aber nicht nur verbal für den Menschen erklärend, sondern angepaßt der auf Rechnern realisierten Logik und dort implementierten Sprache(n) mit deren Vorrat an Befehlen. Ohne bewußtem Ablauf langer Ketten von Entscheidungen, fügt der Mensch, ist er erst hinreichend trainiert, überwiegend die notwendigen Arbeitsschritte *richtig*, dem Detailproblem angepaßt, zusammen. Allerdings kann man sich darauf nicht unbedingt verlassen. Variable Tagesform, Ermüdung, Ablenkung sowie Grad und Aktualität des Trainings verändern Ergebnisse gleichartiger Aufgaben. Wegen imperfekter Modelle und deren Abbildung auf nur sequentiell statt wie not-

wendig vernetzt ablaufende Strukturen erzielt man auch mit programmgesteuerten Lösungen häufig nur mit zu geringen Wahrscheinlichkeiten die gewünschten richtigen Ergebnisse. Zur sicheren Erzielung bleibt nur eine mühevoll und fehleranfällige Suche nicht befriedigender Details und fehlerhafter Ergebnisse des programmgesteuerten Ablaufes sowie deren manuelle Verbesserung durch interaktive Eingriffe.

5.1 Interpolation für Digitale Geländemodelle

Ausgehend vom Englischen und dem dort verwendeten Begriff *Digital Terrain Model* wurde im deutschsprachigen Raum *Digitales Geländemodell* eingeführt, das besser *Digitales Höhenmodell* heißen sollte ([Stephani, 1975] aus der damals unter Leitung von E. DORRER stehenden Arbeitsgruppe Numerische Photogrammetrie der DGPF). Digitale Geländemodelle sind definiert als Speicherung einer *Menge von Geländepunkten* mit bekannten dreidimensionalen Koordinaten und *zugehöriger Rechenvorschriften* zur Ableitung/Interpolation nicht direkt gespeicherter Information.

Hierzu gehören zwei Problemkreise:

- die Interpolation (Schätzung) der *Höhen beliebiger*, durch ihre Lage definierter Punkte [Haendel, 1975; Miller, 1958; Schmutter, 1977; Schut, 1974, 1976; Wild, 1980, 1983; Winter, 1980; Wolf, 1980].
- je Höhenlinie die fortlaufende Schätzung der *Lage ihrer Stützpunkte* (mit gleicher Höhe) in der Ansammlung von Stützpunkten für die beliebig komplex ausgeformte Geländeoberfläche. Stützpunkte von Höhenlinien können nicht in beliebig dichter Folge geschätzt werden. In sie muß ein plausibler und das Gelände beschreibender Verlauf interpoliert werden [Boyle, 1970; Clenshaw, 1968; Cox, 1975; Davis, 1975; Falconer, 1971; Freedon, 1981; Gottschalk, 1972; Greville, 1972; Koch, 1971; Kratky, 1981; Lauer, 1976; Lyche, 1974; Markwardt, 1978; Masson d'Autume, 1976; Williams, 1978].

Für *beliebig angeordnete Stützpunkte* muß man dreidimensionale Koordinaten speichern. Für regelmäßig im Raster angeordnete Stützpunkte jedoch nur die Höhen, wenn man je Höhenmodell neben allgemeinen Angaben und Projektdaten auch Ausdehnung und Orientierung des Rasters und seine Intervalle speichert (s. a. Leberl [1973, 1975]). Dies führt zur:

- *Interpolation regelmäßig angeordneter Stützpunkte* in unregelmäßig verteilten, sofern Höhen nicht direkt in ihrer Wunschposition meßbar

sind, was wegen Bewuchs und Bebauung nicht immer möglich ist. Entweder werden dadurch die Rasterhöhen mit (Interpolations-) Fehlern behaftet oder sie werden – auch die Genauigkeit mindernd – durch Höhen von meßbaren Nachbarpositionen ersetzt.

- Lineare Interpolation in unregelmäßig verteilten Stützpunkten in durch sogenannte *Dreiecksvermaschung* zu findenden Dreiecken [Bauhuber, 1975; Koch, 1985; Powell, 1977]. Die Dreiecksvermaschung ist ebenso wie die Interpolation in regelmäßigen Rastern ein zeitaufwendiger Prozeß. Da das zu interpolierende Gelände durch Dreiecksflächen nur in erster Näherung approximierbar ist, hat man auch für diese Interpolation eine zusätzliche Berücksichtigung der den Dreiecken benachbarten Punkte – also nichtlineare Ansätze – vorgeschlagen und realisiert. Erst seit wenigen Jahren können Programme rechteckig und dreieckig angeordnete Strukturen von Stützpunkten gemeinsam verarbeiten.

Zahllose Modelle sind zur Interpolation entwickelt und in der Praxis eingesetzt. Die hierzu aufgeführte Literatur ist nur ein verschwindender Bruchteil der vorhandenen. Trotzdem ist eine optimale Strategie zur Interpolation nicht angebar. Auch ist nicht quantifizierbar, welche Art der Interpolation für bestimmte Geländetypen vorzuziehen ist. Alle Raster-Modelle jedoch erfordern Bruchkanten zur Abgrenzung der Flächen, in denen und über die hinaus nicht interpoliert werden darf (s. a. Hofmann-Wellenhof [1983]).

Zu den wesentlichen *Interpolationsmethoden* gehören:

- *Polynomapproximation* mit Vereinfachung auf *gleitende Schrägebene* [Koch, 1973].
- *Bikubische Polynome* mit der Vereinfachung auf *unvollständige bikubische, gewöhnliche bikubische, biquadratische bis bilineare Polynome*.
- *Stückweise Polynome* [Cox, 1971; Kubik, 1971].
- *Anwendung der Korrelation* (Mittelwertbildung nach der Methode der kleinsten Quadrate, Wiener-Prädiktion nach Moritz [1973]) durch Kraus [1972, 1974]. Dazu wird von den Stützwerten des Geländemodells durch ein stark überbestimmtes Polynom ein der *Deterministik*, dem *Trend* entsprechender Anteil der Geländeform abgespalten. Der verbleibende Rest wird in einen *korrelierten Anteil*, die Kleinformen, und in einen unregelmäßigen Anteil, das Rauschen (noise), zerlegt. Die Verwendung geeignet vorgegebener statistischer Rechengrößen der *Varianz* und *Kovarianz* sollen Maße für die Größe der

erwarteten Abweichung von der Trendfläche und für die Korreliertheit der Stützpunkte zufolge ihrer Entfernungen definieren. Das Rauschen kann als Geländerauhigkeit oder Meßfehler der Stützpunkte definiert werden [Grafarend, 1972; Hein, 1979; Kapokakis, 1984; Lauer, 1972; Wolf, 19074, 1981].

- *Multiquadratische Interpolation* nach Hardy [1975, 1977] und Göpfert [1977].
- Interpolation durch *gewogene* und *gleitende Mittel* [Koch, 1973].
- *Lineare* und *quadratische Interpolation in Dreiecken* [Bauhuber, 1975].
- Interpolation durch Anwendung der *Methode finiter Elemente* [Ebner, 1979; Strang, 1973].
- Interpolation durch *Spline-Funktionen* [Hayes, 1974; Masson d'Autume, 1976, 1978; Lelgeman, 1980, 1981].

5.2 Interpolation für Höhenlinien

Höhenlinien nach topographischen Aufnahmen des Geländes interpolieren Geodäten und Kartographen seit langer Zeit empirisch und manuell. Numerisch entspricht dieser Aufgabe der Schnitt paralleler horizontaler Ebenen mit zu findenden, durch die Stützpunkte des Geländemodells optimal gelegten, numerisch beschreibbaren Flächen. Dazu muß zuerst für geeignet auszuwählende Teilgebiete eine sie optimal beschreibende Fläche gefunden werden. Da alle genaueren Methoden das Gelände immer durch Flächen höherer Ordnung approximieren, erhalten die nebeneinander liegenden Schnittlinien – die Höhenlinien – notwendigerweise eine gute Nachbarschaftsgenauigkeit, die zumeist auch die gewünschte Scharungsplastik erzeugt. Stückweise sind die Schnittlinien zu berechnen und als Folge von Stützpunkten zu speichern. Die so entstandenen *Spaghetti-Linien* müssen für die Zeichnung geordnet und fortlaufend durch interpolierende Kurven verbunden werden. Weder manuell noch algorithmisch sind beliebig kleine Abstände der Stützpunkte interpolierbar. Deshalb sind zu ihrer optimalen Verbindung viele höherwertigere Modelle als Polygonzüge vorgeschlagen [Akima, 1970; Douglas, 1973; Ophiem, 1981, Späth, 1977].

5.3 Interpolation für geometrisch definierte Funktionen

Im System der Vektordaten bietet die Interpolation in geometrisch definierten Funktionen keine *algorithmischen* Probleme, oft aber solche der *Rechenzeit*:

- Die zu behandelnden Datenmengen sind üblicherweise gering im Verhältnis zur Verarbei-

tungsgeschwindigkeit moderner Rechner. Außerdem sind notwendige *numerische Genauigkeiten* für anschauliche Darstellungen mit entsprechend komplexen Modellen zumeist beliebig erzielbar.

- Die Darstellung *sehr vieler sehr kleiner Kreise* ist mit Vektorplottern allerdings ebenso wie die komplexer Signaturen/Symbole unwirtschaftlich. Die dafür notwendigen, eng beisammen liegenden Stützpunkte ermöglichen bei der Zeichnung keine ausreichenden, für lange gerade Linien optimierte Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Vektorplotter. Hier hilft nur der kostengünstigere Einsatz von Lichtzeichenköpfen (optical exposure head, OEH) und die Zeichnung auf lichtempfindlichen Film in Dunkelkammern.
- Für die Darstellung von Geraden, Kreisen, Ellipsen und ähnlichen glatten, mathematisch definierten Linien oder Kurven existieren an Rasterplottern keine *Makroroutinen* wie an Vektorplottern. Die dadurch entstehenden Probleme wachsen an, wenn diese geometrisch definierten Li-

nien gestrichelt, strichpunktiert oder symbolisiert dargestellt werden sollen. Die zu lösenden Probleme betreffen eine möglichst effiziente rechnerische Ermittlung aller zur anschaulichen Darstellung notwendigen Pixelpositionen und das *Aliasing*:

- *Aliasing* (Betteridge [1978]: »alias = falscher Name«, »alienate = entfremden«) bedeutet für die graphische Datenverarbeitung, daß beispielsweise horizontale und diagonal verlaufende, jeweils ein Pixel dicke Geraden nicht mit gleicher Helligkeit dargestellt werden können, da die jeweils resultierende Schwärzung von Papier oder Bildschirm nicht gleich ist. Ebenso entstehen unterschiedliche statt gleichabständige Unterteilungen für strichlierte und strichpunktierte Linien in Abhängigkeit von ihrer Steigung in der Rastermatrix.
- Als präzisere Definition findet man im Englischen für *Aliasing*: »introduction of error into the computed amplitude of the lower frequencies in a Fourier Analysis of a function carried out

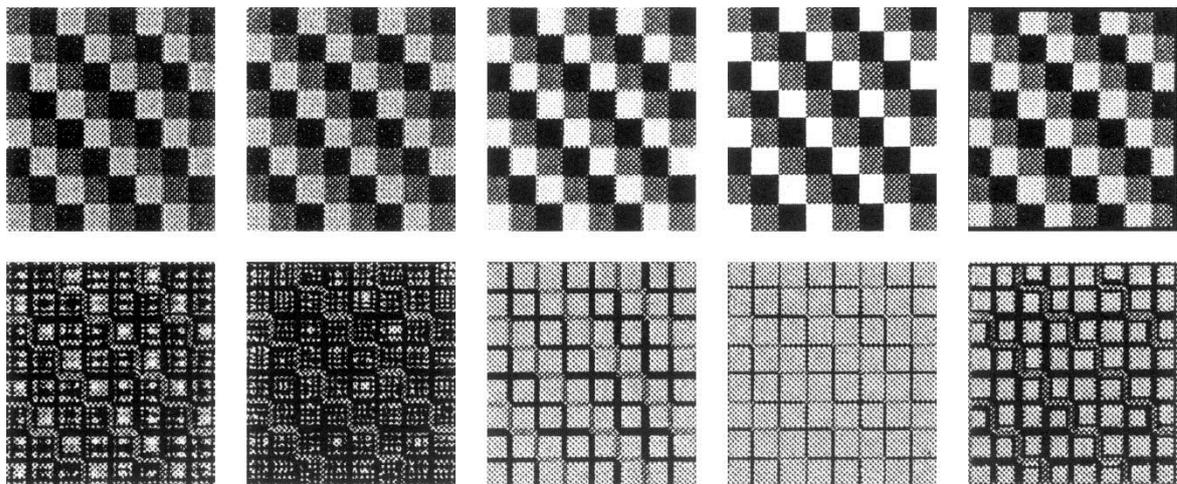
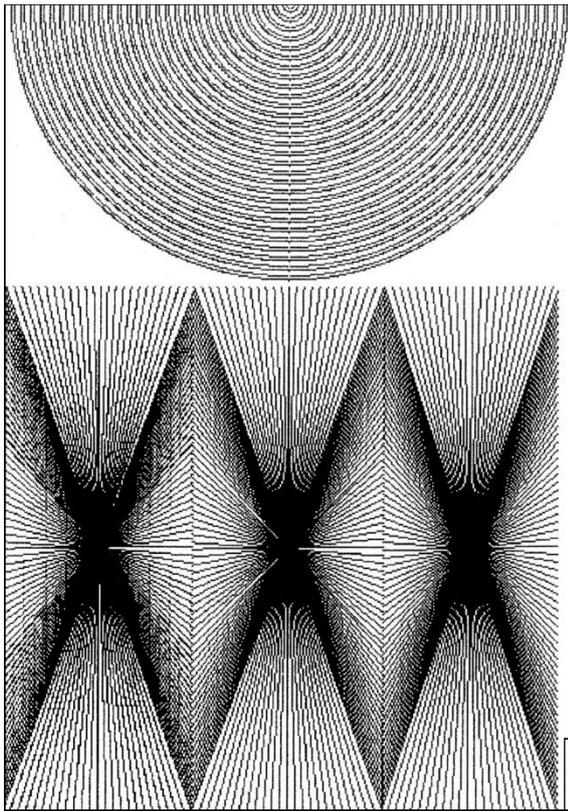


Bild 1¹: Generiert wurde ein schachbrettartiges Raster von 8 x 8 Feldern mit je 8 x 8 Pixel mit den alternierenden Grauwerten 25, 125 und 230. Danach wurde es mit den Faktoren 1,23 und 1,32 in Zeilen- und in Spaltenrichtung vergrößert.

Die anschließend notwendige radiometrische Interpolation erfolgte von links nach rechts mit der *Sinc-Funktion im Fenster 5 x 5*, danach im *Fenster 13 x 13*, weiter mit *bilinearer*, mit *Nächster Nachbar*- und mit *Langrange'scher Interpolation*.

Die sich ergebenden 5 Strukturen der oberen Bildreihe sind wohl auf einem hervorragenden Bildschirm, nicht aber in der hier möglichen Wiedergabequalität sichtbar. Deshalb wurden alle Ergebnisse jeweils mit gleicher Lichtrichtung (Neigung von 50 gon gegen Achsen und Vertikale) geschummert. Der *Nächste Nachbar* liefert hier das beste Ergebnis, *Sinc* das schlechteste, unabhängig von der Größe des Fensters. Deutlich sind anstatt homogen gefärbter Felder periodische Strukturen sichtbar. Die *bilineare* und die *Lagrange Interpolation* ergeben unterschiedlich breite Rampen zwischen den Feldern.

¹ Die Bilder 1 bis 3 zeigen *Aliasing-Effekte* nach Interpolationen in Rasterbildern bzw. nach der Rasterung von Kreisen und Geraden mit verschiedenen Strategien zur Umwandlung von Vektor- in Rasterdaten.

**Bild 2¹:**

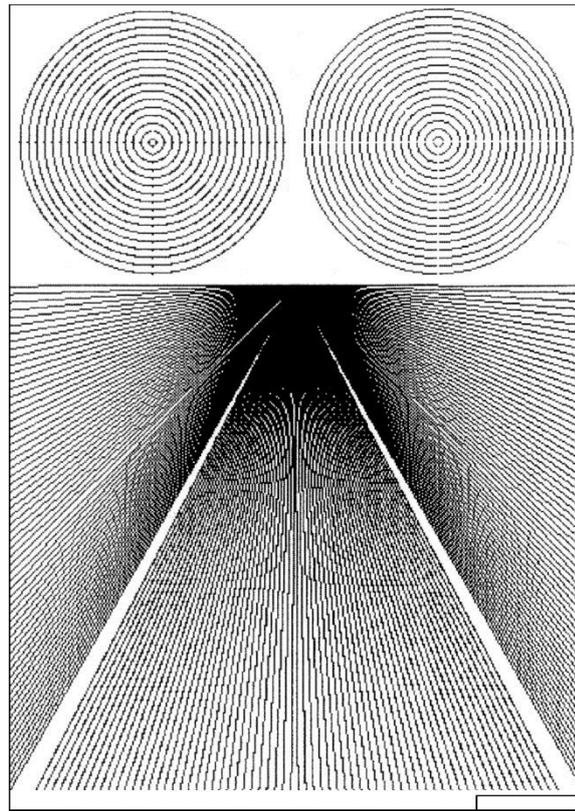
- oben:
konzentrische Kreise aus alternierender Anwendung der Methode *Bresenham* und *Digital Differential Analyzer (DDA)*.
- unten:
Gerade von links nach rechts generiert mit *symmetrischem* und *einfachem DDA* und nach *Bresenham*.

using discrete time samplings whose interval does not allow the proper analysis of the higher frequencies in the analyzed function» [Lapedes, 1978].

- Bei Bildrekonstruktionen nach geometrischen Transformationen führen Interpolationen mit einfachen Modellen (wie dem sehr rasch ermittelbaren *Nächsten Nachbarn*) häufig zu störenden Artefakten, die auch als *Aliasing* bezeichnet werden (siehe Bild 1, 2 und 3).

5.4 Interpolation radiometrischer Bildinformation der Fernerkundung

Nachdem geometrische Transformationen eine gegebene Pixelstruktur zur Anpassung an andere Darstellungen/Projektionen verändert haben, muß man in der neu entstandenen Geometrie die Strukturen wieder exakt rekonstruieren:

**Bild 3¹:**

- oben links:
konzentrische Kreise mit *DDA für Kreise*.
- oben rechts:
konzentrische Kreise nach *Bresenham*.
- unten:
Gerade von links nach rechts generiert nach *Bresenham* und mit *einfachem* und *symmetrischem DDA*.

- Für die Darstellung auf Bildschirmen oder mit Rasterplottern muß eine *neue Matrix* aus Grau- und Farbwerten ohne Lücken oder Überschneidungen entstehen. Dazu muß man interpolieren und dies zweckmäßigerweise im *Originalbild*.

- Anstatt das gegebene Bild durch eine geometrische Transformation rechnerisch zu entzerren, ermittelt man hierzu die *inverse Transformation* des entzerzten in das gegebene verzerrte Bild. Mit den sich ergebenden Parametern der Transformation findet man für ganzzahlige, sequentiell fortlaufende Pixelkoordinaten im entstehenden (entzerzten) Bild korrespondierende, zumeist unrunde Koordinatenwerte im gegebenen Bild.

- Zu ihnen interpoliert man jene Grau- oder Farbwerte, die ein Scanner aufgenommen hätte, wäre der Mittelpunkt seines Sichtfeldes genau an die berechnete Stelle gefallen. Diese Interpolation

- setzt wieder geometrische Modelle voraus. Strategie der Interpolation kann eine Optimierung der Rechenzeiten oder der radiometrischen Genauigkeit der Interpolation sein.
- Die Literatur bietet zur Interpolation eine Vielzahl von sehr schnellen und ungenauen bis zu immer rechenintensiveren und deshalb teureren, aber präziseren Modellen (s. a. Bild 1).
 - Wünscht man schnelle Rechenzeiten und reicht eine geringe Genauigkeit im entstehenden Bild aus, so wählt man als Interpolator einfach den *Nächsten Nachbarn* zum gewünschten Grauwert. Dieser Nächste Nachbar ist gefunden, wenn man die gewünschte Position mathematisch rundet und den so gefundenen Grau-/Farbwert überträgt.
 - Wünscht man jedoch höhere Genauigkeiten, geht man zu *linearen* Faltungen (Convolutionen) mit zweidimensionalen *Dreiecksoperatoren* oder zu *bilinearen Interpolationen* in die umgebenden vier Pixelwerte über.
 - Mit steigendem Rechenaufwand verbessert sich das Ergebnis immer mehr, wenn man durch Konvolution mit dem *Sinc-Operator* interpoliert und hierzu die Größe der Konvolutionsmatrix zunehmen läßt. Man erkaufte die besseren Ergebnisse durch immer länger werdende Rechenzeiten.
 - Ab Konvolutionsmatrizen von 11 x 11 sind *Fast Fourier Transformationen* (FFT) und Filterungen im Spektralbereich trotz der erforderlichen Rücktransformationen schneller und genauer als Konvolutionen. Faltungen mit einem von Minus bis Plus unendlich laufenden Sinc-Operator restaurieren das gegebene Bild exakt und entsprechen auch exakt den Ergebnissen der FFT.

Literatur allgemein

- Ackermann, F. et al. [1970]:* Aerotriangulation mit unabhängigen Modellen. Bildmessung und Luftbildwesen, 38. Jahrgang, Heft 4, Karlsruhe, S. 198-206
- Ackermann, F. et al. [1973]:* Block Triangulation with Independent Models. Photogrammetric Engineering, Vol. 39, No. 9, Washington, D.C., S. 967-981
- Akima, H. [1970]:* A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. ACM Journal, Vol. 17, No. 4, New York, S. 589-602
- Akima, H. [1972]:* Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. Communications of the ACM, Vol. 15, Baltimore, S. 914-918
- Baarda, W. [1965]:* Precision, Accuracy and Reliability of Observations. Technische Hogeschool Delft, Computing Centre of the Delft Geodetic Institute, Laboratorium voor Geodetische Reken-techniek, Delft, 63 S.
- Baarda, W. [1967]:* Statistical Concepts in Geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Vol. 2, New Series, No. 4. Waltman, Delft, 76 S.
- Baarda, W. [1976]:* Reliability and Precision of Networks. Technische Hogeschool Delft, Computing Centre of the Delft Geodetic Institute, Laboratorium voor Geodetische Reken-techniek, Delft, 11 S.
- Bandemer, H., Gottwald, S. [1990]:* Einführung in FUZZY-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen. Deutsch-Taschenbücher, Band 73. Verlag Harry Deutsch, Thun/Frankfurt a. M., 173 S.
- Betteridge, H. T. (Hrsg.) [1978]:* Cassell Wörterbuch Deutsch – Englisch, Englisch – Deutsch. Compact Verlag, München, Sonderausgabe, 646 u. 632 S.
- Chaikin, G. M. [1974]:* An Algorithm for High-Speed Curve Generation. Computer Graphics and Image Processing, No. 3, San Diego, CA., S. 346-249
- Douglas, D. H., Peucker, T. K. [1973]:* Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature. Canadian Cartographer, Vol. 10, No. 2, Downsview, Ontario, S. 112-122
- Dubes, R., Jain, A. K. [1976]:* Clustering Techniques: The User's Dilemma. Pattern Recognition, Vol. 8, Oxford, S. 247-260
- Drummond, J. [1988]:* Fuzzy Sub-Set Theory Applied to Environmental Planning in GIS. Proceedings of Eurocarto Seven, Enschede, The Netherlands, 20-22 September 1988, »Environmental Applications of Digital Mapping«. ITC Publications No. 8, Enschede, S. 11-22
- Ebner, H., Schneider, W. [1974]:* Simultaneous Compensation of Systematic Errors with Block Adjustment by Independent Models. Bildmessung und Luftbildwesen, 42. Jahrgang, Heft 6, Karlsruhe, S. 198-203

- Ebner, H. [1976]:* Self Calibrating Block Adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 44. Jahrgang, Heft 4, Berlin, S. 128-140, und *Proceedings of the XIIIth International ISP Congress, Commission III*, Helsinki, 1976. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 21, Part 3, Helsinki
- Fischer, E.-U. [1982]:* Optimalfilterung zur Vereinfachung stückweise glatter Linien. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 89. Jahrgang, Heft 10, Karlsruhe, S. 394-405
- Förstner, W. [1978]:* Die Suche nach groben Fehlern in photogrammetrischen Lageblöcken. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen*, Heft Nr. 240. Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 98 S.
- Hakkarainen, J. [1983]:* Radial and Tangential Distortion of Aerial Cameras. *Reports of the Finnish Geodetic Institut*, No. 83:3, University of Joensuu, Joensuu, 47 S.
- Jerie, H. G. [1958]:* Analogue Computer for Block-Adjustment. *Instructions for the Planimetric Adjustment and Instructions for the Height Adjustment*. ITC Publications, Delft
- Jerie, H. G. [1959]:* Block Adjustment by Means of Analogue Computer. *Photogrammetria*, Vol. 14, No. 4, Amsterdam, S. 161-176
- Kandel, A. [1986]:* Fuzzy Mathematical Techniques with Applications. Verlag Edward Arnold, London, 325 S.
- Knerr, R. [1988]:* *Knaurs Lexikon der Mathematik für Schule und Beruf*. Droemer Knaur, München, 527 S.
- Kröll, F. S. [1981]:* Interaktive graphische Darstellungen für Aerotriangulation und Blockausgleichung. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 49. Jahrgang, Heft 2, Karlsruhe, S. 55-63
- Kubik, K. [1971]:* The Effect of Systematic Image Errors in Block Triangulation. *ITC Publications, Serie A*, No. 49, Enschede, 143 S.
- Kubik, K., Weng, W., Frederiksen, P. [1984]:* Oh, Grosserrors! *Proceedings of the XVth International ISPRS Congress, Commission III*, Rio de Janeiro, 1984. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXV, Part A 3a, Rio de Janeiro, S. 278-289
- Lapedes, D. N. (Hrsg.) [1978]:* *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. McGraw-Hill, New York, 2nd Edition, 1771 S., App. 58 S.
- Li, D. [1987]:* Theorie und Untersuchung der Trennbarkeit von groben Paßpunktfehlern und systematischen Bildfehlern bei der photogrammetrischen Punktbestimmung. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen*, Heft Nr. 324. Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 122 S.
- Leberl, F. [1973]:* Interpolation in Square Grid. *The ITC Journal*, No. 5, Enschede, S. 756-807
- Louet, J., Zobl, R. [1993]:* The ERS-1 Satellite – Approaching Two Years in Orbit. *ESA Bulletin*, No. 74, Neuilly-sur-Seine
- Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D. W. [1991]:* *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. 2 Volumes. Longman Scientific & Technical, Harlow, 649 S. und 447 S.
- Marckwardt, W. [1974]:* Die mathematische Behandlung digitalisierter gekrümmter Linien. *Vermessungstechnik*, 22. Jahrgang, Heft 4, Berlin
- Marckwardt, W. [1985]:* Interpolations- und Glättungsalgorithmen für die automatische Zeichnung von Höhenlinien. *Vermessungstechnik*, 33. Jahrgang, Heft 3, Berlin, S. 85-87
- McCay, M. [1993]:* A Year of ERS-1 Operations. *ESA Bulletin*, No. 73, Neuilly-sur-Seine
- Ophiem, H. [1981]:* A New Method for Data Reduction of a Digitized Curve. *Norwegian Comp. Center*
- Peucker, T. K. [1980]:* The Impact of Different Mathematical Approaches to Contouring. *Simon Fraser University of British Columbia, Vancouver, B.C.*
- Proud, L., Battric, B. [1992]:* ERS-1 User Handbook. *ESA Publications Division, ESTEC, esa SP-1148, Noordwijk*, S. 316-325
- Reichenbach, K., Kröll, F. S. [1982]:* Anwendungsgebiete der Photogrammetrie im Kraftwerks- und Industriebau. *Jahrbuch Bautechnik im Kraftwerksbau 1982/83, Kapitel IX/6 - Vermessung*. Vulkan Verlag, Essen, S. 468-476
- Schut, G. H. [1975]:* Development of Programs for Strip- and Block-Adjustment at the National Research Council of Canada. *Photogrammetria*, Vol. 30, No. 2, Amsterdam, S. 283-291
- Schwidefsky, K. [1936]:* Einführung in die Luft- und Erdbildmessung. Verlag B. G. Teubner, Leipzig, 1. Auflage, 109 S.

- Späth, H. [1973]:* Spline Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen. Oldenbourg, München/Wien, 134 S.
- Späth, H. [1977]:* Cluster-Analyse-Algorithmen zur Objektklassifizierung und Datenreduktion. Oldenbourg, München/Wien, 2. Auflage, 217 S.
- Stephani, M. [1975]:* Arbeitskreis Numerische Photogrammetrie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, 43. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 116-117
- Strathmann, F.-W. (Hrsg.) [1990]:* Taschenbuch zur Fernerkundung. Mit Beiträgen von R. Bill. Verlag Wichmann, Karlsruhe, 236 S.
- Tilli, T. [1992]:* Fuzzy Logik: Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software. Franzis Verlag, München, 2. Auflage, 256 S.
- Torlegård, K. [1981]:* Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. Schriftenreihe des wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen, Heft 5. Hochschule der Bundeswehr München, Neubiberg, 68 S.
- van den Hout, C. M. A. [1966]:* The Anblock Method of Planimetric Block Adjustment. Photogrammetria, Vol. 21, Amsterdam, S. 171-178
- Wagner, U. [1986]:* Zur programmgesteuerten Darstellung von Höhenlinien. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 68 S.
- Weber, W. [1978]:* Liniengeneralisierung und Datenreduktion unter dem Gesichtswinkel der mathematischen Optimierung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft 74. Institut für Angewandte Geodäsie, Berlin, S. 55-66
- Zadeh, L. A. [1965]:* Fuzzy Sets. Information and Control, No. 8, San Diego/London, S. 338-353
- Zeller, M. [1948]:* Traité de Photogrammétrie. Société de vente H. Wild, Heerbrugg, 316 S.
- Literatur zum DGM**
- Bauhuber, F., Erlacher, V., Günther, H. [1975]:* Ein Programmsystem für die Behandlung digitaler Höhenmodelle. Bildmessung und Luftbildwesen, 43. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 103-107
- Boyle, A. R. [1970]:* The Quantised Line. The Cartographic Journal, London, S. 90-94
- Clerici, E., Kubik, K. [1975]:* The Theoretical Accuracy of Point Interpolation on Topographic Surfaces. Proceedings of the Symposium of the ISP Commission III, Stuttgart, September 2-6, 1974. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 214. Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München
- Clenshaw, C. W., Hayes, J. G. [1968]:* Curve and Surface Fitting. Teddington: England National Physical Laboratory, Division of Numerical and Applied Mathematics, Vol. 11, London
- Cox, M. G. [1971]:* Curve Fitting with Piecewise Polynomials. Journal of the Institute of Mathematics and its Applications, Vol. 8, London, S. 36-52
- Cox, M. G. [1975]:* An Algorithm for Spline Interpolation. Journal of the Institute of Mathematics and its Applications, Vol. 15, London, S. 95-108
- Davis, P. J. [1975]:* Interpolation and Approximation. Dover Publications, New York, 393 S.
- Dorrer, E. [1975]:* Gedanken zum digitalen Geländemodell. Bildmessung und Luftbildwesen, 43. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 90-91
- Ebner, H. [1979]:* Zwei neue Interpolationsverfahren und Beispiele für ihre Anwendung. Bildmessung und Luftbildwesen, 47. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, S. 15-27
- Falconer, K. J. [1971]:* A General Purpose Algorithm for Contouring over Scatterd Data Points. Teddington: England National Physical Laboratory, Division of Numerical Analysis and Computing, Vol. 9, London, 44 S.
- Freedon, W. [1981]:* On Approximation by Harmonic Splines. Modern Geography Series, Vol. 6, London, S. 193-244
- Göpfert, W. [1977]:* Interpolationsergebnisse mit der multiquadratischen Methode. Zeitschrift für Vermessungswesen, 102. Jahrgang, Heft 10, Stuttgart, S. 457-460
- Gottschalk, H.-J. [1972]:* Die Generalisierung von Isolinien als Ergebnis der Generalisierung von Flächen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 97. Jahrgang, Heft 11, Stuttgart, S. 489-494
- Grafarend, E. [1972]:* Nichtlineare Prädiktion. Zeitschrift für Vermessungswesen, 97. Jahrgang, Heft 6, Stuttgart, S. 245-255

- Greville, T. N. E. [1972]:* Splinefunktionen, Interpolation und Numerische Integration. – In: *Ralston, A. (Hrsg.):* Mathematische Methoden für Digitalrechner. Oldenbourg, München/Wien, S. 249-267
- Haendel, B., Kluge, J., Luke, B. [1975]:* Digitales Flächenmodell und automatische Höhenlinienkartierung – methodische Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. Vermessungswesen und Raumordnung, 37. Jahrgang, Heft 2, Bonn, S. 107-120
- Hardy, R. L. [1975]:* Research Results in the Application of Multiquadratic Equations of Surveying and Mapping Problems. Surveying and Mapping, Vol. 35, No. 4. Falls Church, VA.
- Hardy, R. L. [1977]:* Least Squares Prediction. Photogrammetric Engineering, Vol. 43, No. 4, Washington, D.C., S. 475-492
- Hayes, J. G., Halliday, J. [1974]:* The Least Square Fitting of Cubic Spline Surface to General Data Sets. Journal of the Institute of Mathematics and its Applications, Vol. 14, London, S. 89-106
- Heap, B. R., Pink, M. G. [1969]:* Three Contouring Algorithms. Teddington: England National Physical Laboratory, Vol. 12, London
- Heap, B. R. [1972]:* Algorithms for the Production of Contour Maps over an Irregular Triangular Mesh. Teddington: England National Physical Laboratory, Division of Numerical Analysis and Computing, Vol. 3, London, 21 S.
- Hein, G., Lenze, K. [1979]:* Zur Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Interpolations- und Prädiktionsmethoden. Zeitschrift für Vermessungswesen, 104. Jahrgang, Heft 11, Stuttgart, S. 492-504
- Hofmann-Wellenhof, B. [1983]:* Aussparungsflächen und unregelmäßige Ränder bei der Ableitung von Höhenlinien aus einem Höhenraster. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, 71. Jahrgang, Nr. 2, Wien, S. 83-94
- Kapokakis, E. S. [1984]:* Least Squares Collocation in Digital Terrain Modelling. Photogrammetric Record, Vol. 32, London, S. 303-309
- Koch, K.-R., Lauer, S. [1971]:* Automation der Isoliniendarstellung mit Hilfe des Wiener- und des Kalman-Filters. Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn, Heft 2, Universitätsverlag, Bonn, 14 Bl.
- Koch, K.-R. [1973]:* Höhenlinieninterpolation mittels gleitender Schrägebene und Prädiktion. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 71. Jahrgang, Heft 12, Olten, S. 229-233
- Koch, K.-R. [1982]:* Kalman Filter and Optimal Smoothing Derived by the Regression Model. Modern Geography Series, Vol. 7, London, S. 133-144
- Koch, K.-R. [1985]:* Digitales Geländemodell mittels Dreiecksvermaschung. Vermessungswesen und Raumordnung, 47. Jahrgang, Heft 3/4, Bonn, S. 129-135
- Korchagin, Y. K. [1975]:* Mathematical Simulation of Topographical Surfaces. Geodesy, Mapping and Photogrammetry, Vol. 17, No. 2, Silver Spring, MD., S. 67-71
- Kratky, V. [1981]:* Spectral Analysis of Some Interpolation Methods. ISP Symposium, Ottawa, Commission IV. Photogrammetria, Vol. 37, Amsterdam, S. 61-72
- Kraus, K. [1972]:* Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, 40. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, S. 7-13
- Kraus, K., Mikhail, E. M. [1972]:* Linear Least Squares Interpolation. Photogrammetric Engineering, Vol. 38, No. 6, Washington, D.C.
- Kraus, K. [1974]:* Untersuchungen zur Interpolation nach kleinsten Quadraten. Zeitschrift für Vermessungswesen, 99. Jahrgang, Heft 5, Stuttgart, S. 198-205
- Kubik, K. (Hrsg.) [1971]:* The Application of Piecewise Polynomials to Problems of Curve and Surface Approximation. Rijkswaterstaat Communications No. 12, Staatsuitgeverij, The Hague, 90 S.
- Lauer, S. [1972]:* Anwendung der skalaren Prädiktion auf das Problem des DGM. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II, Heft 51, Institut für Angewandte Geodäsie, Berlin, S. 105-116
- Lauer, S. [1976]:* Automatische Höhenlinienzeichnung mit Darstellung von Geländeunstetigkeiten und DGM. Vermessungswesen und Raumordnung, 38. Jahrgang, Heft 1, Bonn, S. 1-14
- Leberl, F. [1973]:* Interpolation in Square Grid DTM. The ITC Journal, No. 5, Enschede, S. 756-807

- Leberl, F. [1975]:* Photogrammetric Interpolation. The ITC Journal, No. 2, Enschede, S. 205-229, und Photogrammetric Engineering, Vol. 41, Washington, D.C., S. 603-612
- Lelgemann, D. [1980]:* Kollokation und analytische Spline-Funktionen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 105. Jahrgang, Heft 10, Stuttgart, S. 466-478
- Lelgemann, D. [1981]:* On Numerical Properties of Interpolation with Harmonic Kernel Functions. Modern Geography Series, Vol. 6, London, S. 157-191
- Lyche, T., Schumaker, L. L. [1974]:* Procedures for Computing Smoothing and Interpolating Natural Splines. Communications of the ACM, Vol. 17, Baltimore, S. 463-467
- Makarovic, B. [1973]:* Progressive Sampling of DTM. The ITC Journal, No. 3, Enschede, S. 397-416
- Makarovic, B. [1984]:* Selective Sampling for Digital Terrain Modelling. Proceedings of the XVth International Congress of the ISPRS, Commission IV, Rio de Janeiro, 1984. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXV, Part A 4, Rio de Janeiro, S. 264-277
- Marckwardt, W. [1977]:* Zur Interpolation im digitalen Modell. Vermessungstechnik, 25. Jahrgang, Heft 7, Berlin, S. 230-232
- Marckwardt, W. [1978]:* Digital Filtering of Profile Data. Photogrammetria, Vol. 34, Amsterdam, S. 111-117
- Masson d'Autume, G. de [1976]:* Interpolation by a Flexible Rod (Spline). Proceedings of the XIIIth International ISP Congress, Commission III, Helsinki, 1976. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 21, Part B 3, Helsinki
- Masson d'Autume, G. de [1978]:* Surface Modeling by Means of an Elastic Grid. Proceedings of the ISP Commission III Symposium, Moskau, 1978
- Miller, C. L., Laflamme, R. A. [1958]:* The DTM-Theory and -Application. Photogrammetric Engineering, Vol. 24, Washington, D.C., S. 433-442
- Moritz, H. [1963]:* Statistische Methoden in der gravimetrischen Geodäsie. Zeitschrift für Vermessungswesen, 88. Jahrgang, Stuttgart, S. 409-416
- Moritz, H. [1973]:* Neuere Ausgleichungs- und Prädiktionsverfahren. Zeitschrift für Vermessungswesen, 98. Jahrgang, Heft 4, Stuttgart, S. 137-146
- Powell, M. J. D., Sabin, M. A. [1977]:* Piecewise Quadratic Approximation on Triangles. ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 3, New York
- Schmid, E., Schmid, H. H. [1971]:* Curve and Surface Fitting with Potential Functions. Zeitschrift für Vermessungswesen, 96. Jahrgang, Heft 11, Stuttgart, S. 488-497
- Schmutter, B. [1977]:* Non Polynomial Interpolation of Discrete Points. Proceedings of the XVth International FIG Congress, Stockholm, Paper 505.4
- Schut, G. H. [1975]:* Evaluation of Some Interpolation Models. Proceedings of the Symposium of the ISP Commission III, Stuttgart, September 2-6, 1974. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 214. Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München
- Schut, G. H. [1976]:* Review of Interpolation Methods for DTM. Canadian Surveyor, Vol. 30, No. 5, Ottawa, S. 389-412, und Proceedings of the XIIIth International ISP Congress, Commission III, Helsinki, 1976. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 21, Part B 3, Helsinki
- Strang, G., Fix, G. F. [1973]:* An Analysis of the Finite Element Method. Prentice-Hall Series in Automatic Computation. Prentice-Hall, London, 306 S.
- Wild, E. [1980]:* Interpolation with Weight Functions – A General Interpolation Method. Proceedings of the XIVth International Congress of the ISP, Hamburg, July 13-25, 1980. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIII, Part B 3, Commission III, Washington, D. C., S. 780-793
- Wild, E. [1983]:* Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 277. Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 139 S.
- Williams, C. M. [1978]:* An Efficient Algorithm for the Piecewise Linear Approximation of Planar Curves. Computer Graphics and Image Processing, No. 8, San Diego, CA., S. 286-293

Winter, R. [1980]: Vergleich Digitaler Geländemodelle. Proceedings of the XIVth International Congress of the ISP, Hamburg, July 13-25, 1980. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIII, Part B 4, Commission IV, Hamburg, S. 758-767

Wolf, F. M. [1980]: Zweckmäßigkeit von DGM im Straßenwesen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, S. 51-63

Wolf, H. [1974]: Über verallgemeinerte Kollokation. Zeitschrift für Vermessungswesen, 99. Jahrgang, Heft 11, Stuttgart, S. 475-478

Wolf, H. [1981]: Multiquadratische Methode und Kollokation. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 88. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 89-95

Eine unkonventionelle Anwendung der analytischen Photogrammetrie

Zum Aufsuchen luftunsichtbarer Punkte, deren Koordinaten gegeben sind, mit Hilfe von Stereobildpaaren

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zum Aufsuchen von Grenzpunkten vorgestellt, die in der Örtlichkeit durch Steine oder sonstige Kennzeichen vermarktet, aber mangels geeigneter Signalisierung in Luftbildern nicht erkennbar sind. Zu diesem Zweck wird ihre Lage aus der Katasterkarte mit Hilfe analytischer Photogrammetrie in ein geeignetes Luftbildpaar übertragen. Unter stereoskopischer Betrachtung werden die Punkte dann in der Örtlichkeit aufgesucht.

Summary

Boundary points which are not targeted and, therefore, not visible in aerial photographs shall be identified on site. For this purpose their positions can be transferred from cadastral maps into suitable stereo pairs of aerial photographs by analytical photogrammetry methods. Then the boundary points can be located on site under stereoscopic viewing of the images.

Einleitung

Ein Senkrecht-Luftbild gibt in zentralperspektiver Darstellung Schwärzungen entsprechend der Reflexionseigenschaften der luftsichtbaren Oberflächen wieder, unabhängig von der Bedeutung der so zur Darstellung gelangten Bilddetails für die spezielle photogrammetrische Aufgabe. Im Gegensatz dazu können kartographische Darstellungen einen Grad an Abstraktion erreichen, der keine sichtbare Beziehung zu irgendwelchen Details im Gelände aufweist. In diesem Extremfall sind zwischen Luftbild und Karte keine unmittelbaren Zuordnungsmöglichkeiten mehr gegeben. Dieser Fall tritt annähernd bei Katasterkarten auf, die keine topographischen Details enthalten. Ähnlich kann es z. B. bei Leitungsplänen sein. Sind nun über verlässliche Koordinatenangaben für Kartendetails und hinreichend

viele identische Punkte in Karten und Bildern grundsätzlich Transformationen von Karten- (Gelände-) koordinaten in Bildkoordinaten angebar, so kann man beliebigen Kartenpunkten homologe Bildpunkte zuweisen. Liegen von den Kartenpunkten dabei nur Grundrißkoordinaten vor, so können die fehlenden Höhenangaben aus einer Stereo-Auswertung gewonnen werden, woraus Bildkoordinaten für beide Bilder des Stereogramms zu berechnen sind. Für den nachstehend erläuterten Versuch wurde diese einfache, mit Mitteln der analytischen Photogrammetrie routinemäßig ablaufende Beziehung genutzt.

Aufgabenstellung

Von einem land- und forstwirtschaftlich genutzten Areal im Berchtesgadener Land lagen eine Kopie aus einer Flurkarte im Maßstab 1 : 5000 sowie ein Stereobildpaar (Normalwinkel) neueren Datums im mittleren Maßstab von 1 : 18000 vor. Er war anzunehmen, daß die Kartendarstellung aus einer hinreichend homogenen Messungsgrundlage entstanden war. Über topographische Details der Katasterkarte – im wesentlichen einzelne Höfe im Arbeitsgebiet – sowie über Höhenangaben aus der Topographischen Karte 1 : 25000 konnte das Stereomodell absolut orientiert werden.

Damit war die Voraussetzung gegeben, vermarkte Grenzpunkte (Grenzsteine, andere Grenzzeichen) in Bildkoordinaten umzurechnen. Diese Punkte waren in den Luftbildern zu markieren, und nach dieser Darstellung in den Bildern sollten die Grenzpunkte von nicht Ortskundigen im Gelände aufgesucht werden. Das Untersuchungsgebiet umfaßte mehrere, getrennt liegende Flurstücke mit einer Gesamtfläche von ca. 17 ha und maximalen Höhenunterschieden von ca. 500 m.

Von den aufzusuchenden vermarkten Punkten lagen etwa 20 in freier Feldlage, an Waldrändern und öffentlichen Wegen. Weitere rund 40 Punkte markierten Grenzen in extensiv bewirtschaftetem Berg-

wald. Schließlich erschien es sinnvoll, auch unvermarktete Grenzverläufe in die bildbezogene Darstellung mit aufzunehmen, so daß alle Grenzen im Stereogramm stereoskopisch betrachtet werden konnten. Auch diese Grenzverläufe sollten – wenn auch mit minderer Genauigkeit – in der Örtlichkeit angebbbar sein.

Photogrammetrische Arbeiten

Für die Lösung der Aufgabe standen zur Verfügung:

- Rechner Hewlett Packard HP 1000
- Planicomp Zeiss C 100
- Zeichentisch Zeiss DZ 6
- Kontaktkopiergerät Zeiss KG 30
- Entzerrungsgerät Zeiss SEG V

Die Luftbilder wurden routinemäßig orientiert, wobei Kartenpunkte – wie oben beschrieben – zur absoluten Orientierung verwendet wurden. Diese Punkte dienten im Grundriß auch dazu, Katasterkarte auf dem Zeichentisch und im Stereomodell im C 100 aufeinander einzupassen.

Für die nachfolgende Messung wurde ein eigenes Programm geschrieben, das folgende Schritte enthielt:

- 1) Alle vier Rahmenmarken beider Bilder anfahren und ihre Bildkoordinaten registrieren.
- 2) Die Lage der Grenzpunkte am Zeichentisch einstellen (Koordinaten X,Y). Die Geländehöhe Z des Punktes ist höchstens näherungsweise bekannt. Dadurch Umrechnung in näherungsweise Bildkoordinaten des Punktes in beiden Bildern und entsprechende Nachführung der Bildwagen im C 100.
- 3) Unter Beibehalten der Koordinaten X,Y des laufenden Punktes im C 100 Aufsetzen der Meßmarke auf die Geländeoberfläche. Damit ergeben sich Höhen Z im Gelände und endgültige Bildkoordinaten des Grenzpunktes in beiden Bildern.
- 4) Geländekoordinaten sowie Bildkoordinaten beider Bildpunkte speichern, dazu Linieninformationen über den Grenzverlauf von Punkt zu Punkt.
- 5) Fortlaufende Messung nach 2) bis 4) für alle Grenzpunkte.

Zeichenarbeiten

Die Bildkoordinaten von Rahmenmarken und Grenzpunkten wurden für beide Bilder am DZ 6 auf Klarsichtfolie kartiert und die Grenzen durch Linienzüge dargestellt.

Photographische Arbeiten

Diapositive beider Bilder und die Kartierungen der gewonnenen Bildpunkte wurden in genauem Kontakt am KG 30 kopiert, wobei die Einpassung über die kartierten Rahmenmarken geschah. Von den so entstandenen kombinierten Negativen wurden Kontaktkopien und am Zeiss ZEG V zusätzliche Vergrößerungen im mittleren Maßstab von 1:5000 angefertigt. Letzteres hätte jedoch (bei ausreichender Gerätedimension für die Vorlage!) auch mit einem normalen Vergrößerungsgerät geschehen können.

Feldarbeiten, Ergebnis und Wertung

Ohne Ortskenntnis wurden anhand der vorgenannten Luftbildvergrößerungen die Grenzpunkte in der Örtlichkeit aufgesucht. Dazu waren die Vergrößerungen (in Basisrichtung) in etwa zwanzig Zentimeter breite Streifen geschnitten worden, um mit einem einfachen Taschenstereoskop arbeiten zu können. Bei einer eindeutig vorhandenen Zuordnung der Bewirtschaftungsgrenzen zu den Katastergrenzen wäre dieser Vorgang sicherlich häufig durch Abgehen der örtlichen Nutzungsgrenzen möglich gewesen. Wegen der extensiven Nutzung der Flächen und häufig fehlender Identität von Kataster- und Nutzungsgrenzen war diese Zuordnungsmöglichkeit fast durchgehend nicht gegeben. Trotzdem gelang es, unter Einschluß der schwierigen Begehung des Bergwaldes praktisch alle Grenzverläufe in der Örtlichkeit anzugeben. In den wenigen Fällen, in denen Punkte nicht aufzufinden waren, konnte teilweise der Grund des Versagens angegeben werden. So lag z. B. ein Grenzstein nach der Kartierung in den Luftbildern eindeutig unter einem Komposthaufen.

Bei vorhandenem Programm für den C 100 waren für Orientierung und Punktmessung etwa drei Gerätetunden erforderlich. Hinzu kam etwa eine Stunde Arbeit im Photolabor.

Für alle Außenarbeiten benötigte eine einzelne Person etwa einen Kalendertag. Messungen im Gelände waren nicht erforderlich. Damit hat sich das Verfahren auch in diesem Abschnitt als praktikabel erwiesen.

Natürlich ist es nicht möglich, auf diese Weise einen rechtsverbindlichen Eigentumsnachweis zu führen. Doch dürfte das Verfahren ausreichen, in extensiv genutzten Gebieten Kenntnis über Grenzverläufe und Vorhandensein von Grenzzeichen zu erlangen.

Während mit diesem Konzept die Geländearbeiten minimiert werden können, erfordern die Vorbereitungsarbeiten im Büro die Bereitstellung hoch-

genauer und kostenintensiver Geräte. Dieser Aufwand dürfte bei vorhandener Software im Vergleich mit den Kosten eines Meßtrupps bei reiner Geländearbeit vertretbar sein.

Bernd J. Kurz

Target Design: A Simplifying Approach for Computer Vision

Als ich vor fast 25 Jahren von Stuttgart nach Kanada kam, um an der University of New Brunswick in Fredericton mein Studium fortzusetzen, wußte ich nicht, was mich dort alles erwarten würde – eine neue Umgebung, eine neue Sprache und ein neues Studiengebiet, die Informatik. Es hat nicht lange gedauert, bis ich Prof. Dr. Egon Dorrer kennengelernt habe und er mir mit Rat und Tat weitergeholfen hat. Dem folgte eine lange Zeit der Zusammenarbeit, wobei nun ich Egon Dorrer mit meinen elektrotechnischen Kenntnissen etwas weiterhelfen konnte – denn damals wurde überall und alles computerisiert, selbst die Photogrammetrie. Seit dieser Zeit konnte ich die akademische Zusammenarbeit mit Vermessern aller Sparten aufrechterhalten, was diesen Beitrag besonders geeignet erscheinen läßt. Auf dem Gebiet der Bildverarbeitung und Computer Vision liefert die Informatik heute nicht nur neue Technologien für Anwendungen im automatisierten Vermessen, sondern wendet auch selbst Methoden der Triangulation an, welche den Vermessern seit langem vertraut sind, wie es dieser Beitrag zeigt.

Ich freue mich, zu der Festschrift zum 60. Geburtstag von Egon Dorrer beitragen zu können, und wünsche dem Jubilar alles Gute und weiteren Erfolg in der Lehre und Forschung. Ich schließe mit dem Wunsch, daß der Meinungsaustausch und die Zusammenarbeit zwischen Vermessern und Informatikern weiterhin aufrechterhalten wird, zum Vorteil für beide Seiten.

Summary

A novel approach to computer vision is presented in this paper. Rather than developing ever more complex algorithms to extract given objects from images, the design of simple targets for given fast and robust algorithms is promoted. The mathematical nature of this approach leads to optimized target structures. A unifying model for vision algorithms is introduced which combines target primitive extraction and target structure matching. The usefulness of this approach is demonstrated by two practical examples. The performance of the vision systems are analyzed for the purpose of target location and pose estimation.

Zusammenfassung

In diesem Bericht wird eine neuartige Methode in der Bildverarbeitung vorgestellt. Anstatt immer komplexere Algorithmen für die Erkennung von vorgegebenen Objekten in Bildern zu entwickeln, wird der Entwurf von einfachen Zielmarken für bekannte, schnelle und robuste Algorithmen vorgeschlagen. Die mathematische Behandlung macht eine Optimierung der Zielmarken möglich. Ein umfassendes Modell für Bildverarbeitungsalgorithmen wird eingeführt, das die Erkennung von Ziel-

markenelementen und die Zielmarkenzuordnung kombiniert. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methode wird an zwei praktischen Beispielen gezeigt. Die Genauigkeit der Bildverarbeitungssysteme wird für den Zweck der Bestimmung der Zielmarkenposition im 2D-Raum und der Zielmarkenlage im 3D-Raum analysiert.

1. Introduction

Computer vision has matured into a technology that has proven itself as a useful and reliable tool in the manufacturing industry. However, because computer vision still remains much inferior to human vision in many aspects, its successful use is limited to selected tasks in industry where uncluttered and clean images are to be processed at a reasonably low rate in time. Typical examples are object detection for counting, shape evaluation for sorting and inspection, and measurement for quality control. Examples in other areas include motion detection in surveying applications and automated object tracking for military and space applications. In general, the more complex the objects are the lower the success rate or measurement accuracy becomes and the longer it takes for processing the images [Wallace, 1983; Russel and D'Arcy, 1986].

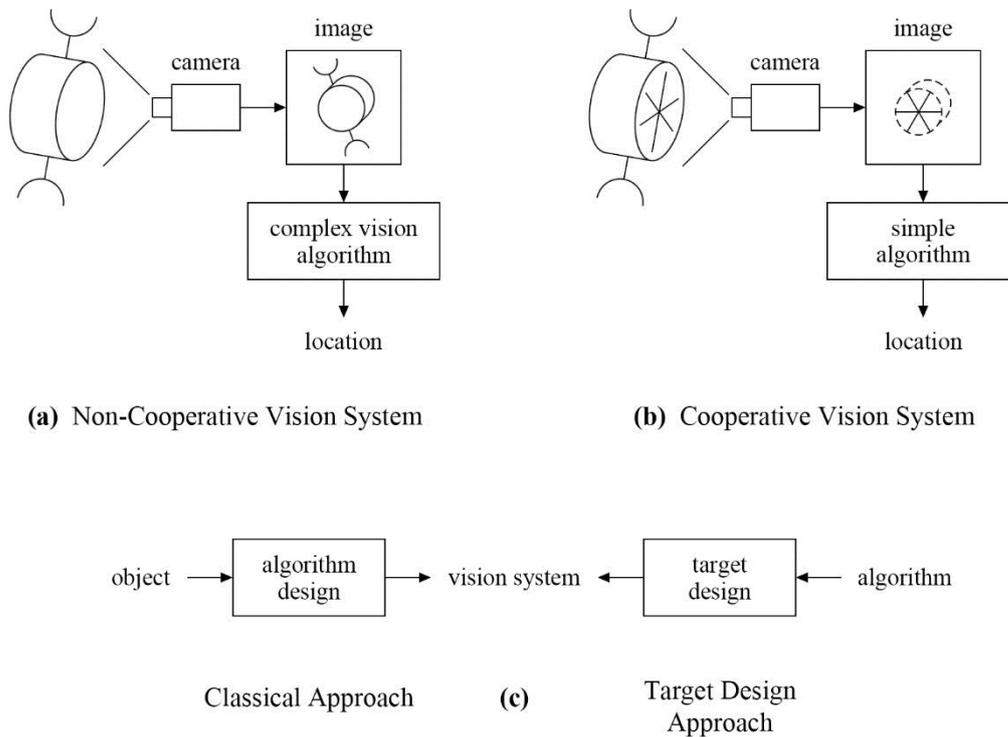


Fig. 1: Approaches of Computer Vision

Classical computer vision deals with the systematic or ad-hoc design of algorithms to process images in order to extract and evaluate desired objects. As a rule, an algorithm defines object features which are unique to the desired object and states ways how to manipulate these features to recognize an object and further process it (Fig. 1a). The more complex the object and the more cluttered the images are, the more difficult becomes the algorithm's task. Although theoretically there is no limit on the number of object features and the algorithm complexity, a practical limit is reached very quickly. This limit is due to the finite number of known mathematically definable object features, the loss of invariance of these features to image distortions and the prohibitively long processing time on today's sequential digital computers. This hard limit is advanced only slightly every year, mostly due to advances in computer technology rather than to novel algorithm design.

An alternative way to advance computer vision has been proposed previously by the author and his research group [Kurz, 1986; Harjoko and Kurz, 1990, 1992 and 1993]. Its progress is based on the idea of simplification of object manipulations. It was proposed to reserve the trend towards ever more complex algorithms designed for given objects, and to adapt the objects – or targets as recognizable

parts of the objects – to known robust and fast vision algorithms. We call this approach »Target Design«. The target design approach can be classified as a cooperative vision methodology as it enrolls the help of some external tools which simplify the vision process (Fig. 1b). Because of its mathematical modelling nature, this approach also lends itself readily for optimization in the target design phase. The ground work for the target design was prepared by the author [Kurz, 1986] and much of the research work was carried out by Harjoko for his graduate theses under the supervision of the author.

This paper combines the results achieved so far for the target design methodology. In previous work each different vision algorithm required the creation of its own dedicated model. A newly developed unifying model of vision algorithms is presented which is applicable for a wide range of vision algorithms and target structures by integrating the different modelling approaches into a single model. The target structures, given by the target primitives and their topology, suitable to the vision algorithms are outlined. By way of two examples the usefulness of the target design approach is demonstrated whereby computer vision is used to determine in 2D location or the 3D pose of a target in a scene. For the 2D case the well-known Hough Transform has been chosen

as line extraction algorithm with line clusters as targets. For the 3D case the Moment transform was selected as blob extraction algorithm with sets of circular blobs as targets. In both cases a geometric transformation exploits the redundancy inherent in the target features to estimate the desired location or pose of the target. The models of the vision algorithms are shown and the target structures are outlined. An optimization of the targets is developed for varying image acquisition and object distortions. In this paper the performance of the vision algorithms regarding the location or pose estimation accuracy is given based on simulation of the vision algorithm on a digital computer. Performance predictions based on an analytical modelling of the vision algorithms have also been established but are not included here.

2. A Unifying Model of Vision Algorithms

The target design methodology is based on a model of the vision algorithm and a structured target made up of target primitives in a certain constellation. The unifying model of vision algorithms integrates previously used different modelling approaches into a single model applicable to a wide range of vision algorithms and target structures. This is achieved by a two-step modelling approach of the central vision algorithms. The first step involves the target primitive extraction by a suitable algorithm which must be mathematically modellable. This step only requires the knowledge about the primitives the target is made up of, but not the target topology itself. The second step exploits a-priori knowledge about the target topology to resolve the matching

of extracted target primitives with the target structures itself.

For completeness of the vision model, the above two central steps are preceded by the image sensing process and followed by the geometric pose determination. The image sensing step models the behavior of the light-to-data conversion. The geometric pose determination process uses the raw information about the extracted target primitives to estimate the pose of the target in 2D or 3D space.

In any realistic computer vision system the inadvertent noise always degrades the accuracy in determining the target pose parameters in space. The more redundant information a properly designed geometric pose determination procedure is provided with, the better the estimation performance becomes. However, in order to provide this redundant information about the target, the more complex and cluttered the target itself becomes, which in turn leads to noisier information provided for pose determination. It is because of these contradictory requirements that a trade-off in target complexity is called for. This leads to an optimization of the target structure in a given vision environment.

For subsequent use the following notations are introduced. A right-handed 3D X, Y, Z coordinate system is used with the origin located in the camera's focal point and the positive Z-axis pointing towards the target.

2.1 Vision System Model

For target design a computer vision system consists of four modules: Image Sensor, Target Primitive Extraction, Image To Target Matching and Geometric Pose Determination (Fig. 2). The input to the model are the scene that contains the

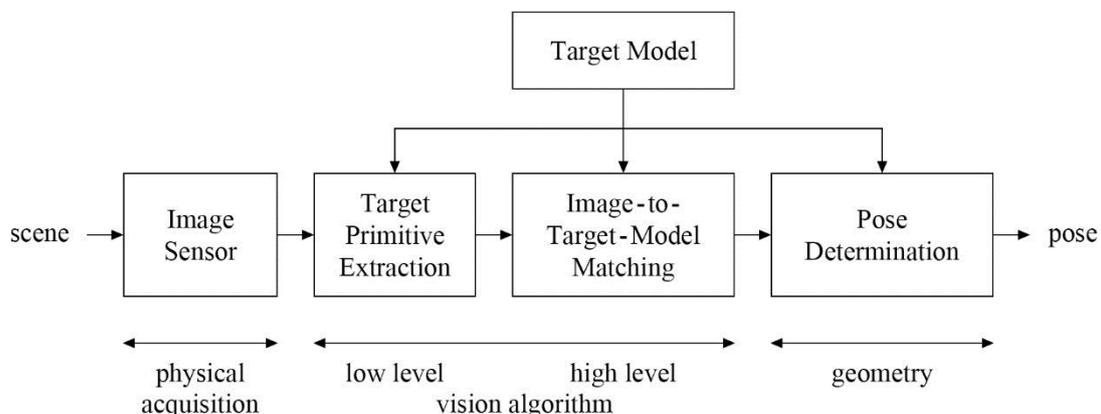


Fig. 2: Unifying Model of a Vision System for Pose Estimation

Target, the image acquisition system specifications and the description of the target structure. The output is the estimated target pose in 2D space or 3D space.

2.2 Target Structure

Target can be made up of a single or multiple primitives, such as lines or blobs. The primitives are related to the vision algorithm of the Target Primitive Extraction module. They must be reasonably easy to extract by the algorithm and must provide sufficient information required by the successive modules. Such information could be the location, orientation or size of the primitives, or other information derived from them. These primitives should be carefully arranged in a topology that suits the detection of the pose parameters. For example, if a planar target is considered, at least three »points« are needed to solve for the six position and orientation parameters of a target. Each »point« could be obtained from the intersection of two or more lines or from the center of a blob. For a non-planar target a minimum of 4 »points« are needed [Fischler and Bolles, 1981; Yuan, 1989] even though the solution may not be unique. Redundancy in information can be exploited for achieving better accuracy of the pose parameters by some best-fit procedure. Several examples of targets are shown in Figure 3.

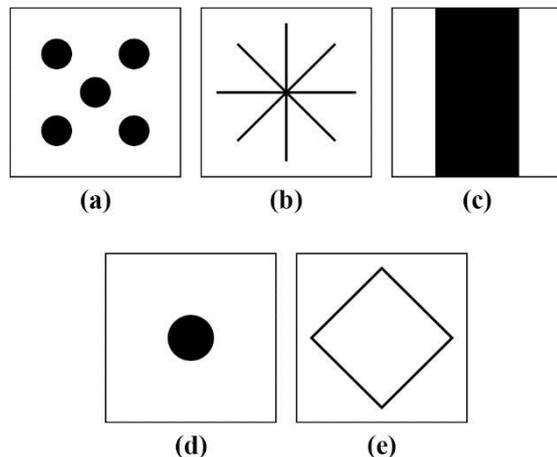


Fig. 3: Examples of Line Target Structures

2.3 Image Sensor

The Image Sensor Module is responsible for the acquisition of images of the target. It models the physical properties of the image acquisition system including aspects related to projection, geometric and radiometric distortions and noise injections due to sensor internal and external sources, as well as

sampling in space and quantization of light intensity values.

2.4 Target Primitive Extraction

This module extracts the target primitives. The extraction algorithm must be capable of extracting the primitives with minimum error as any errors will propagate through the subsequent modules. The algorithm does not use information about the target structure at all. Typical algorithms for targets made up of lines are given in [Chen and Tsai, 1988; Duda and Hart, 1972] and for targets made up of blobs [Dougherty and Giardina, 1987; Gonzalez and Wintz, 1987; Zhou, 1986]. In this paper the algorithms used are the Hough Transform for the extraction of line-based targets and the Moment Transformation for blob-based targets.

2.5 Image To Target Model Matching

In this model the correspondence between the extracted primitives and the primitives of the a-priori known target structure is established. This is essentially a matching process. Depending on the target topology selected and the pose parameters to be estimated, this matching process may or may not be required. A case where the matching procedure is not required occurs when a star-like target as shown in Figure 3b is employed for the estimation of its x, y location in 2D space only. In the case where all six pose parameters in 3D space are required, the matching procedure is generally required.

2.6 Pose Estimation

The pose of the target is estimated by means of the raw data supplied by the previous modules and a suitable geometric algorithm. This algorithm requires that the parameters of the extracted primitives and, in most cases, the match between them and the target model are given. Redundancy in data provided can beneficially be exploited to increase the accuracy of the pose determination. A large number of pose determination algorithms based on geometric triangulation principles in 2D or 3D space have been reported in Cornils and Goode [1987], Fischler and Bolles [1981], Haralick et al. [1989], Hung et al. [1985], Krishnan et al. [1992], Linnainmaa et al. [1988], Tsai and Chou [1991], Yuan [1989]. In this paper a simple Least Mean Squares Adjustment is used for the line-based 2D location estimate and a modified best-fit procedure with the Singular Value Decomposition (SVD) for the 3D pose estimation.

3. Hough Transform Based 2D Location Estimation

The Hough Transform is a very popular algorithm for the detection and parameter extraction of simple objects such as lines, circles and other parametrically definable primitives. It is a member of the class of parameter space transformations. Its advantages include the ability to detect multiple occurrences of primitives in the same image, robustness to distortions of the primitives and to noise, and the possibility for efficient parallel processing. The reader is referred to *Duda and Hart [1972]* for a detailed discussion of the transformation and its properties. In this paper the Hough Transform is used to detect straight lines.

3.1 Problem Definition

A planar target is affixed to an object and the vision system is to estimate the location of this target, i. e. of the object, in 2D x, y space. A line-based target is to be used. In order to reduce the number of degrees of freedom of the line topology, a star-like target is given and only the number of lines, N , is variable. If more than two lines are used redundant information is available about the location of the object. The optimal number of lines is sought which achieves the best location accuracy in a given vision environment.

The simplified model of the vision system is illustrated in Figure 4. The Hough Transform represents the Target Primitive Extraction module and the Least Mean Square Adjustment represents the Geometric Pose Determination module. The Image To Target Matching module is not necessary for this case and the Image Sensor module is replaced by its output, the acquired target image.

3.2 Target Structure

A typical line-based target may consist of $N = 2$ or more lines which intersect at a single point Q ,

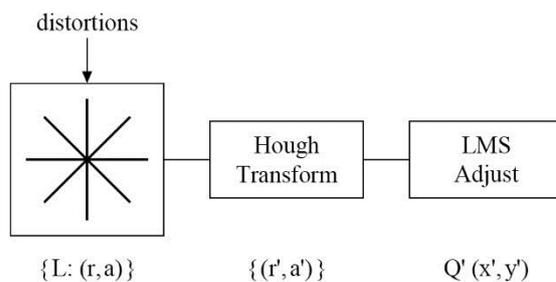


Fig. 4: Simplified Model of a Vision System Using Line Targets

which is defined as the target location (Fig. 5a). In any practical environment, the acquired target image will always be noisy as shown in Figure 5b. Therefore, a line cluster with $N > 2$ lines provides redundant information and should lead to increased location accuracy. However, because more lines cause the image to become more complex and cluttered, it is expected that the line parameter estimation accuracy decreases. Thus, an optimal target with N_{opt} lines can be designed.

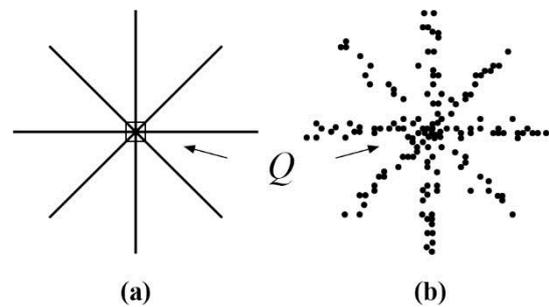


Fig. 5: Line Target Structures for the Simulation

3.3 Image Sensor

Since simulation results are reported in this paper the Image Sensor module does not actually capture the image of the target using a camera. Instead it generates an ideal binary target and introduces distortions due to vision system and environmental imperfections and due to sampling and quantization operations. The distortions are simulated by additive white noise along the x - and y -axes with varying noise variance. This degraded image, similar to Figure 5b, is input to the next module.

3.4 Target Primitive Extraction

The Hough Transform is applied to the line points of the acquired target image in (x, y) space. Each point is mapped to the parameter space (r, a) by the transformation equation for straight line detection, i. e. $r = x \cdot \cos a + y \cdot \sin a$, where r and a represent the line parameters in Hesse's form. Every point maps into a sine shaped curve $r(a)$ (Fig. 6). All $r(a)$ curves generated by collinear points of a line $L(r, a)$ intersect at a single location r, a . A computationally effective implementation of the Hough Transform utilizes a quantized parameter space (r, a) as accumulator array. Each cell of this array is incremented by one for every traversal of a sine-shaped curve, resulting in an array count distribution as shown in Figure 8. Occurrences of lines result in peaks in this array

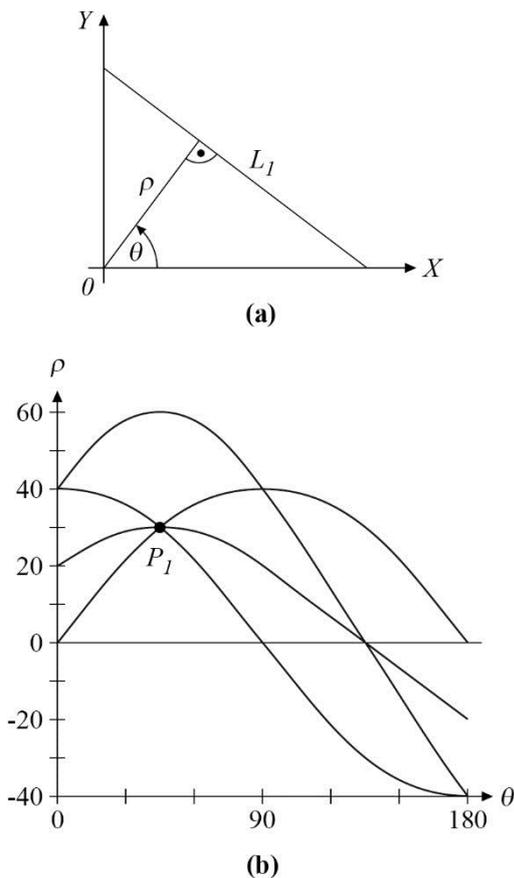


Fig. 6: Hough Transform: Mapping (x, y) to (r, a)

which are distinct for little or no image distortions (Fig. 8a), and spread out for existing distortions (Fig. 8b).

A K-means cluster seeking algorithm is used to obtain the centers of the line clusters in the (r, a) space using an area of interest (AOI) in which a peak is being sought. The AOIs are obtained following the idea of Voronoi diagrams with only one peak in each AOI. The detected line peak coordinates r, a are the parameters of the target primitives (lines) and are passed on to the next module.

3.5 Image To Target Model Matching

For the case at hand there is no need for a matching process as the sequence of the target primitives is irrelevant for the target location determination in 2D space.

3.6 Pose Determination

The location of the target Q is the intersection of all lines of the target. In reality the detected target lines will always be distorted by noise and will not

intersect at a single point. The point Q is obtained by estimating the common intersection point Q' using a best-fit procedure. The least mean squares (LMS) adjustment is chosen as the pose determination algorithm, which minimizes the squares of the residuals, i.e. the distances between Q' and the intersection points of any line pair [Michail and Gracie, 1981].

3.7 Performance Evaluation

A simulation was carried out to find the optimum number of lines, N , in a target for best location accuracy. It was assumed that the target fills the 512×400 point image space (x, y) , equivalent to $216 \text{ mm} \times 162 \text{ mm}$ viewed from a 200 mm distance, and consists of N lines of equal length. These lines are configured according to the design rules in Harjoko and Kurz [1992] and are not necessarily regularly spaced in angle. Tests were carried out for varying noise corruption of the target.

The result of the simulation is shown in Figure 7. The average combined bias and standard deviations of the target center Q' were computed as the root mean square (RMS) error. The diagram reveals that an optimal target made up of six lines offers the best performance for the two cases considered. In the noiseless case this target gives a location accuracy of 0.33 mm , and for the noisy case (with noise variance 4 pixels) an accuracy of 0.40 mm is achieved.

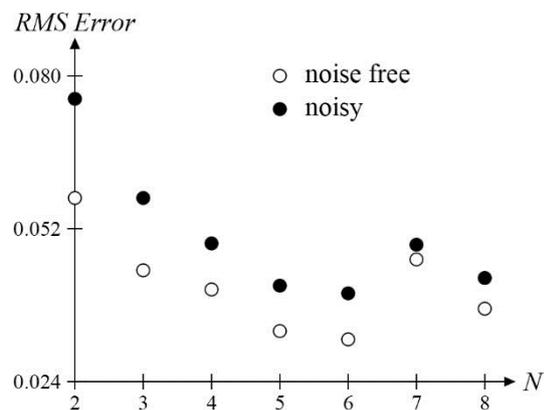


Fig. 7: Accuracy of the 2D Location Estimates Using Line Targets

4. Moment Transform Based 3D Pose Estimation

Targets made up of blobs are the second most frequently used targets, after line targets, in the literature. The Moment Transform is a well known

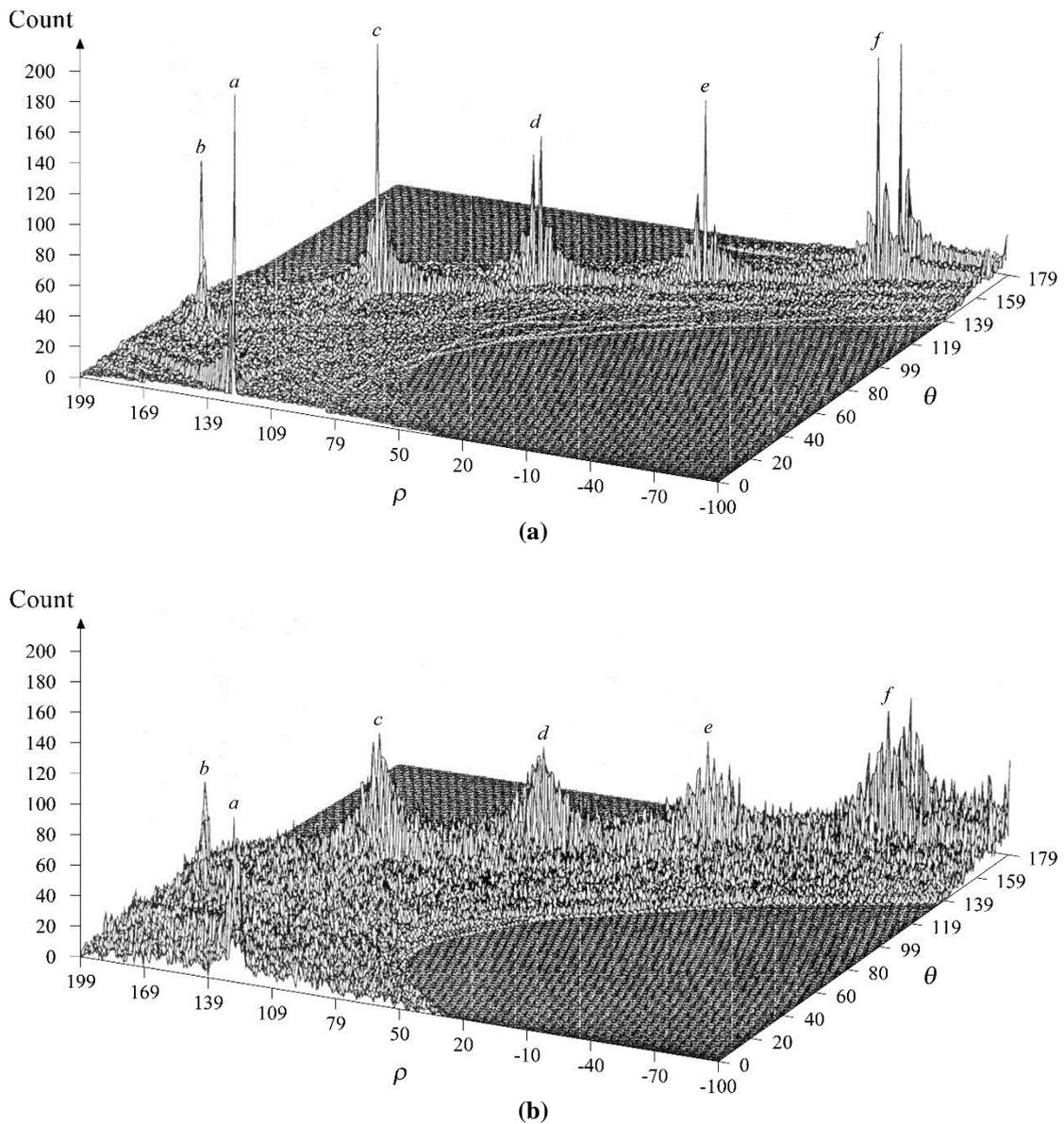


Fig. 8: Hough Transform: Parameter Space (r, α)

method for estimating the center of a circle, circular filled disk, or in general, a blob. It was selected as the primitive extraction method for blobs because of its robustness to distortions of the blobs and the possibility for efficient parallel processing.

4.1 Problem Definition

A planar target made up of N circular disks (blobs) is attached to an object. The six degrees of freedom of the pose of this target in 3D space, i. e. of the object, are to be estimated by a vision system. The Moment Transform is selected as primitive extraction algorithm. Because the loca-

tion of 3 blobs is sufficient to estimate all three pose parameters, any planar target with more than 3 blobs provides redundancy for improved pose parameter estimation. The optimal number of blobs is sought which achieves the best pose estimation accuracy in a given vision environment.

The simplified model of the vision system is shown in Figure 9. The Moment Transform represents the Target Primitive Extraction module and the SVD represents the Pose Determination module. The Image To Target Matching module is required in this case and the Image Sensor module is replaced by its output, the target image.

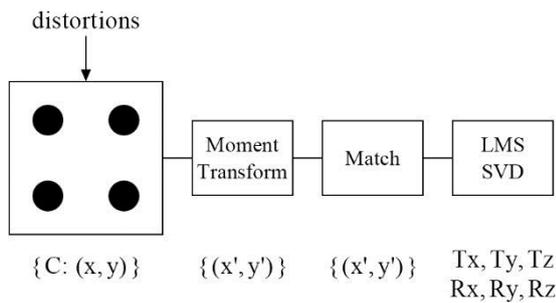


Fig. 9: Simplified Model of a Vision System Using Blob Targets

4.2 Target Structure

A planar target made up of N blobs is used. To reduce the number of degrees of freedom in the target structure, the blobs are identical circular filled disks and are equally distributed over the target image area (Fig. 10a). The center of each blob is defined as the blob's location »point«, and $N = 3$ »points« are needed to determine all six pose parameters. In practice, the acquired target image is always noisy as shown in Figure 10b. The number N of blobs is variable, and it is expected that $N > 3$ blobs provide redundancy and will lead to better pose estimation accuracy. However, as the target becomes more complex and cluttered the blob location estimate accuracy will decrease. Thus, an optimal target with N_{opt} blobs can be designed.

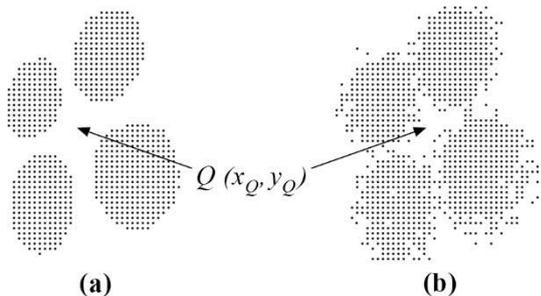


Fig. 10: Blob Target Structures for the Simulation

4.3 Image Sensor

For simulation purposes, the Image Sensor module is replaced by its output image, subject to distortions pertaining to a particular vision environment, as described in Section 3.3.

4.4 Target Primitive Extraction

The individual blobs are extracted in two steps. First an area of interest (AOI) is determined for each blob which contributes to the computations of

the center location of the blob. Second, the center of the blob is estimated by the Moment Transform within the AOI. The AOIs are built by fitting individual blobs into the AOI so that they fit best using region connectivity as criterion [Harjoko and Kurz, 1993]. This module returns the x, y center locations for each blob in the target in an unordered sequence.

4.5 Image To Target Matching

Each x, y point returned by the extraction module represents one target primitive, or blob. Since the sequence of target primitives is important for the pose determination algorithm, the detected target primitives have to be ordered in the same sequence as the target structure. The target matching procedure developed is based on two assumptions. The vision system is to be used for target tracking purposes and the distance between the centers of the same blob in any two consecutively acquired image frames is less than the distance to its nearest neighbor. Then a similarity measure based on Euclidean distances is sufficient to uniquely find a match if the starting condition is known. The nearest neighbor criterion is used as a match condition between an extracted target primitive and the target structure primitives.

4.6 Pose Determination

The six pose parameters (translation and rotation) of the target are estimated using a best fit procedure using the raw data from the previous module. A modified least mean squares adjustment using the SVD as tool to solve the overdetermined set of equations for $N > 3$ [Haralick et al., 1989] was chosen as the pose determination algorithm. In this modified version a point is given a weight to reflect its detection accuracy as obtained from the Primitive Extraction module [Michail and Gracie, 1981].

4.7 Performance Evaluation

A simulation was carried out to find the accuracy of the pose estimation and the optimality of the blob-based targets. It was assumed that the target fills the 512×400 point image space (x, y) , equivalent to $216 \text{ mm} \times 162 \text{ mm}$ viewed from a 200 mm distance, and consists of N circular blobs of equal size each one separated from the neighbors by a least 10% of its diameter. Thus, the only target parameter to be optimized remains the number of blobs, N . Tests were carried out for varying noise corruption of the target.

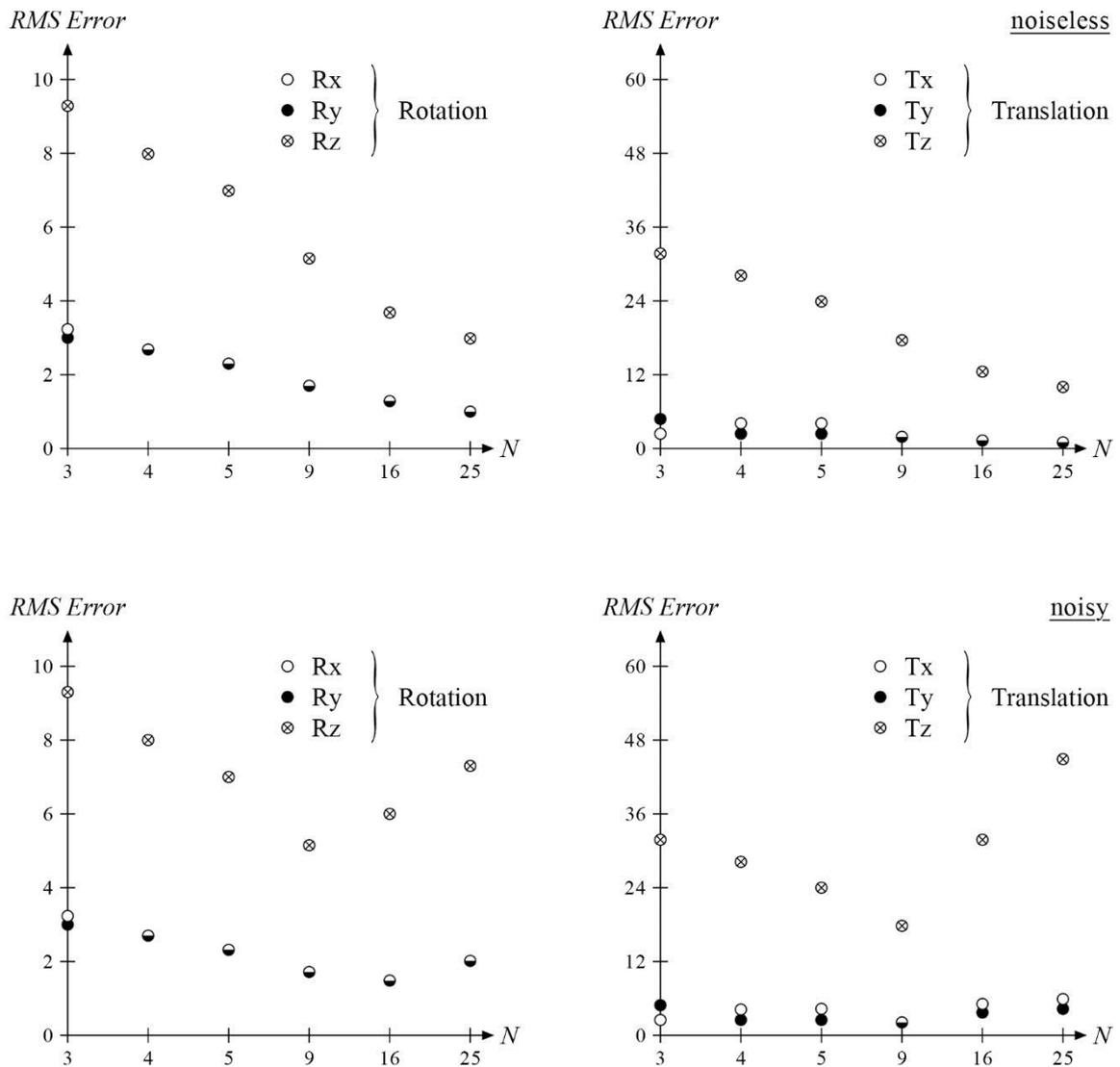


Fig. 11: Accuracy of the 3D Pose Estimates Using Blob Targets

The simulation results are shown in Figure 11. For the noiseless case the best performance is achieved for a target with at least 25 blobs with pose estimation accuracies of 1.1 to 11.5 mm for translation and 1.0 to 3.3 degrees for rotation. The position along the Z-axis is the least accurate as expected. This optimum is marginal. A well defined optimum occurs for the noisy case (noise variance 4 pixels) for a 9-blob target with pose accuracies of 1.9 to 18 mm and 1.4 to 5.3 degrees, respectively.

5. Summary and Conclusion

A simplification of computer vision systems is promoted. The tool for this simplification is called Target Design for algorithms. A unifying model of

the vision system is presented which is applicable to a wide range of vision algorithms and target structures. The mathematical modelling makes an optimization of the target structure possible.

The usefulness of the target design approach is demonstrated by two practical examples. One system employs the Hough Transform as target primitive extraction algorithm with line clusters as targets, whereas the other one utilizes the Moment Transform with a set of blobs as targets. Computer simulation has been used to obtain the performance results and optimization. For the line target it was found that in a typical noisy environment an optimized target of 6 lines performs best with a location estimate accuracy in the subpixel range of 0.4 mm. For the same noisy environment the optimal blob-based target consists of 9 blobs and

achieves an accuracy of 1.9 mm for the x,y location and 18 mm for the z location, and better than 5.3 degrees for the rotation estimates. All results were obtained for a simulated target image of size 216 mm x 162 mm viewed at a distance of 200 mm.

Several results recently reported in literature have created the belief that more and larger primitives in a target will lead to better pose estimation accuracy. Although this is true if the image area is also increased without decreasing the point resolution, these statements neglect the opposing effects of target primitive extraction and geometric pose determination on the pose estimation accuracy in a typical noisy environment. The results presented in this paper prove the above statements incorrect if an image area with fixed resolution is used to hold all possible variations of a certain target structures.

In this paper only a partial optimization of targets is reported by presuming a certain target primitive constellation and optimizing some parameters, such as the number of lines or blobs. However, research into a generalized optimization of target involving structure, primitive types and parameters has been underway and some initial success has already been achieved.

References

- Chen, L. H., Tsai, W. H. [1988]:* Moment-Preserving Line Detection. *Pattern Recognition*, Vol. 21, Oxford, pp. 45-53
- Cornils, K., Goode, P. W. [1987]:* Location of Planar Target in 3 Space from Monocular Images. *Proceedings of the Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence and Robotics*, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD., May 13-14, 1987. *Telematics and Informations*, Vol. 4, No. 4, New York
- Dougherty, E. R., Giardina, C. R. [1987]:* Image Processing: Continuous to Discrete, Vol. 2. Prentice-Hall, London, pp. 419-428
- Duda, R. O., Hart, P. E. [1972]:* Use of the Hough Transformation to Detect Lines, Curves in Pictures. *Communications of the ACM*, Vol. 15, No. 1, Baltimore, pp. 11-15
- Fischler, M. A., Bolles, R. C. [1981]:* Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications. *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, Baltimore, pp. 381-395
- Gonzalez, R. C., Wintz, P. [1987]:* Digital Image Processing. *Electrical & Computer Engineering Serie*. Addison-Wesley, Reading, 2nd Edition, pp. 122-134
- Haralick, R. M., Joo, H., Lee, C., Thuang, X. [1989]:* Pose Estimation from Corresponding Point Data. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-19, No. 6, New York, pp. 1426-1446
- Harjoko, A., Kurz, B. J. [1990]:* Target Design for the Hough Transform. *Proceedings of the 3rd Artificial Intelligence Workshop*, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., pp. 75-80
- Harjoko, A., Kurz, B. J. [1992]:* Design of Optimal Targets for Computer Vision. *Proceedings of the International Conference on Modelling, Simulation, Identification*, Vancouver, B.C., pp. 18-22
- Harjoko, A., Kurz, B. J. [1993]:* Pose Estimation with Optimized Targets. *Proceedings of the 5th UNB Artificial Intelligence Symposium*, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, pp. 73-84
- Hung, Y., Yeh, P. S., Harwood, D. [1985]:* Passive Ranging to Known Planar Point Sets. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA., April, 1986, pp. 80-85
- Krishnan, R., Sommer III, H. J., Spidaliere, P. D. [1992]:* Monocular Pose of a Rigid Body Using Point Landmarks. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 55, No. 3, San Diego, CA., pp. 307-316
- Kurz, B. J. [1986]:* Personal communications and unpublished material
- Linnainmaa, S., Harwood, D., Davis, L. S. [1988]:* Pose Determination of a 3D Object Using Triangle Points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-10, No. 5, New York, pp. 634-646
- Michail, E. M., Gracie, G. [1981]:* Analysis and Adjustment of Survey Measurements. Van Nostrand Reinhold Company, New York/London, 340 p.
- Russel, R. L., D'Arcy, A. J. [1986]:* Video-Based Satellite Attitude Determination. *The Society of Photographic Instrumentation Engineers Journal*, Vol. 729, Space Station Automation II, Redondo Beach, CA., pp. 231-235
- Tsai, W. H., Chou, S. L. [1991]:* Detection of Generalized Principal Axes in Rotationally Sym-

metric Shapes. *Pattern Recognition*, Vol. 24, No. 2, Oxford, pp. 95-104

Wallace, A. [1993]: Grayscale Image Processing for Industrial Applications. Image and Vision Computing, Vol. 1, Haywards Heath, Sussex

Yuan, J. S. C. [1989]: A General Photogrammetric Method for Determining Object Position and

Orientation. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-5, No. 2, Piscataway, NJ., pp. 129-142

Zhou, G. [1986]: Accurate Determination of Ellipse Centers in Digital Imagery. Technical Papers of the 1986 ACSM-ASPRS Annual Convention, Washington, D.C., March 16-21, Vol. 4, Falls Church, VA., pp. 256-264

Keren Li

Ein Programm-Modul zur analytischen MOMS-Modellauswertung

Zusammenfassung

Am analytischen Plotter Planicomp der P-Serie wurde ein Programm-Modul zur Auswertung von MOMS-02-Bildern (Modularer Opto-elektronischer Multispektraler/Stereo Scanner) implementiert, bei dem die Abweichungen zwischen der im Planicomp benutzten zentralperspektiven Geometrie und der Geometrie der Dreizeilenaufnahme durch Berechnung von Bildwagenkorrekturen berücksichtigt werden. Für die Stereoauswertung ermittelt ein Echtzeit-Korrekturprogramm aufgrund der aktuellen Position der Meßmarke ständig Korrekturwerte und leitet sie an das Planicomp weiter. Am simulierten Beispiel konnte die Leistungsfähigkeit der Auswertung von Dreizeilenaufnahmen demonstriert werden.

Summary

A software module for the compilation of MOMS-02 images (Modular Opto-electronic Multispectral/Stereo Scanner) with the Planicomp P-series analytical plotters was developed. The differences between central perspective geometry used in the Planicomp and the geometry of three-line images is taken into consideration by determining image carrier shifts during stereo compilation. These correction values are calculated in real-time in relation to the actual position of the measuring mark. The performance of the real-time algorithm could be demonstrated with simulated three-line image data.

1. MOMS-02 Dreizeilenkamera

Während der zehntägigen deutschen Spacelab-Mission D2 (26.4.-4.5.1993) wurde ein neuartiger Push-Broom Scanner, MOMS-02 (Modularer Opto-elektronischer Multispektraler/Stereo Scanner), im Weltraum eingesetzt. Eine wesentliche Neuerung dieses Systems gegenüber MOMS-01 (in zwei Space Shuttle-Flügen 1983 und 1984 eingesetzt) stellen drei panchromatische Stereokanäle

dar. Sie sind mit getrennten Objektiven für die Blickwinkel »Nadir« (Bodenpixel-Größe 4.5 m x 4.5 m) sowie für $\pm 21.4^\circ$ (»Forward« und »Backward« mit Bodenpixel-Größe 13.5 m x 13.5 m) ausgestattet.

Je nach Aufnahmemode (Abb. 1) ergibt sich die Streifenbreite: im Nadir bis zu 37 km – bei einer Brennweite von 600 mm und einem Bildmaßstab von 1:448000 aus nominell 296 km Bahnhöhe. Bei den beiden seitlichen, geneigten Objektiven beträgt die Streifenbreite bis 78 km – bei einer Brennweite von 237.2 mm und einem Bildmaßstab von 1:1345000. Während der D2-Mission konnten je nach Aufnahmemode ca. 8 bis 10 Mio. km² der Erdoberfläche erfaßt werden.

Gegenüber existierenden Aufnahmesystemen wie Landsat Thematic Mapper (TM) und SPOT werden die Eigenschaften von MOMS-02 gekennzeichnet durch die

- Möglichkeit der dreifachen Stereoaufnahme
- Along Track-Stereoskopie
- digitale Bildaufnahme mit höherer räumlicher Auflösung und verbesserter geometrischer Genauigkeit
- Kombination von Stereo- und Multispektralaufnahmen [Seige und Meissner, 1993].

Bezüglich der Aufnahmegeometrie ist zu beachten, daß in der durch das Objektiv und die Sensorzeile gebildeten MOMS-Bildebene eine zentralperspektive Abbildung der Erdoberfläche besteht. In Flugrichtung ist allerdings keine Zentralperspektive vorhanden. Die Orientierung jeder Zeile dieses Bildes im Raum kann durch die sechs Orientierungsparameter (X_0 , Y_0 , Z_0 , φ , ω , κ) beschrieben werden.

Mit Dreizeilenbildern im panchromatischen Bereich soll photogrammetrische Objektauswertung hoher Auflösung ermöglicht werden. Neben der Entwicklung und Erprobung eines vollständig digitalen photogrammetrischen Auswertesystems ist von Interesse, eine Stereoauswertung von MOMS-Bildern an analytischen Plottern vorzunehmen. Hierfür werden analoge Kopien der digitalen Bilder auf Film verwendet.

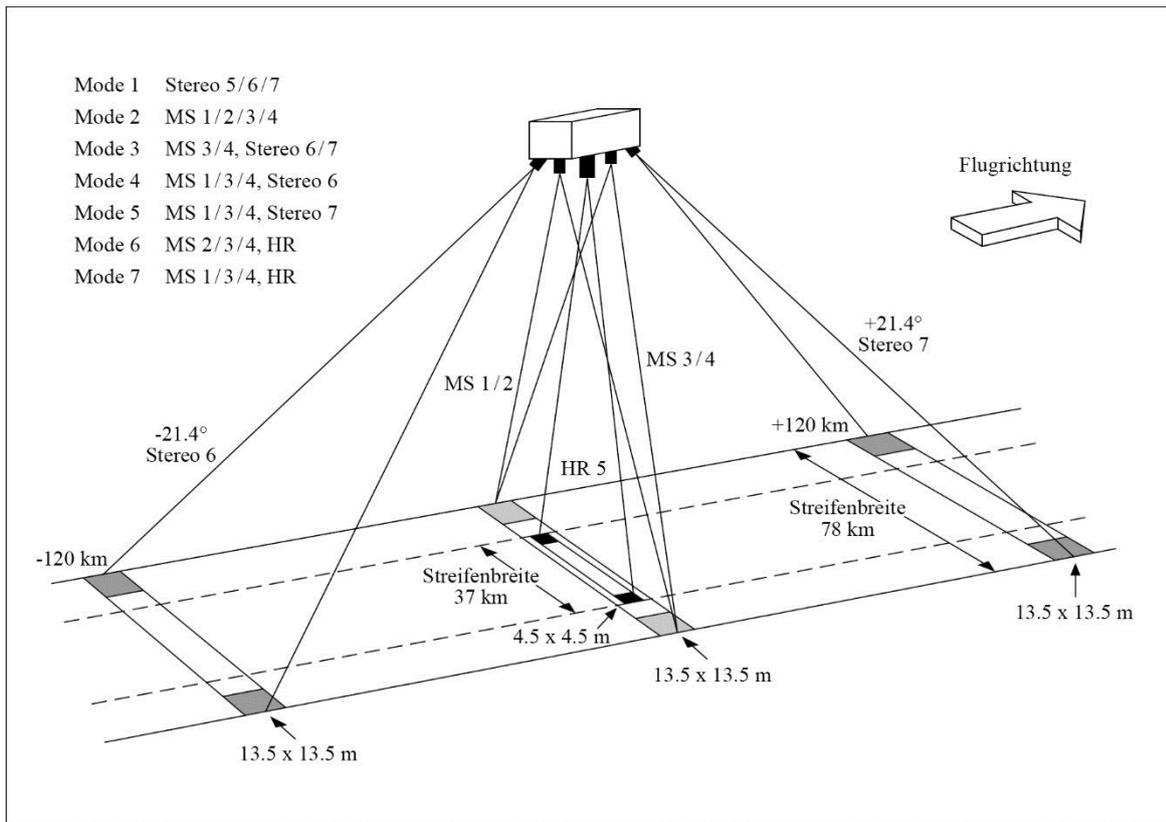


Abb. 1: Schematische Darstellung der MOMS-02 Aufnahmegeometrie (nach DLR [1991])

2. Das mathematische Modell der MOMS-02-Aufnahmen

2.1 Geometrie der Zeilenabstasteraufnahme

Um Lage und Form von Objekten aus MOMS-Aufnahmen rekonstruieren zu können, müssen die geometrischen Abbildungsgesetze bekannt sein. Ein erstes, einfaches mathematisches Modell zur Orientierung von Zeilenabstasteraufnahmen wurde bereits in den sechziger Jahren angegeben [Derenyi und Konecny, 1966]. Die weltweit steigende Verwendung von Zeilensensoren in digitalen opto-elektronischen Kameras führte dazu, daß weitere Modelle für die Orientierung und Auswertung von Zeilenabstasteraufnahmen entwickelt wurden [Hofmann, 1986], Gagan [1987], Konecny et al. [1986]). Diese Modelle beziehen sich auf Orbitparameter in Verbindung mit photogrammetrischen Lösungen.

Die grundlegende geometrische Bedingung für die Rekonstruktion des Geländes aus Zeilenabstasteraufnahmen stützt sich darauf, daß die Abbildung einer jeden Sensorzeile eine Zentralperspektive ist und die jeweils zu einem Objektpunkt P gehörigen Bildstrahlen zum Schnitt zu bringen sind. Aus Abb. 2 ist der Zusammenhang zwischen den Bild-

koordinaten (x,y) eines Bildpunktes und den Objektkoordinaten (X,Y,Z) eines Objektpunktes P ersichtlich. Er kann durch folgende Gleichungen mathematisch formuliert werden:

$$x = x_0 - c \cdot \left[r_{11}(i) (X - X_{pz}(i)) + r_{21}(i) (Y - Y_{pz}(i)) + r_{31}(i) (Z - Z_{pz}(i)) \right] / N$$

$$y = y_0 - c \cdot \left[r_{12}(i) (X - X_{pz}(i)) + r_{22}(i) (Y - Y_{pz}(i)) + r_{32}(i) (Z - Z_{pz}(i)) \right] / N$$

mit:

$$N = r_{13}(i) (X - X_{pz}(i)) + r_{23}(i) (Y - Y_{pz}(i)) + r_{33}(i) (Z - Z_{pz}(i)) \quad [1]$$

wobei:

- x,y Bildkoordinaten des Punktes P in der Sensorzeile (i)
- x₀,y₀ Koordinaten des Bildhauptpunktes

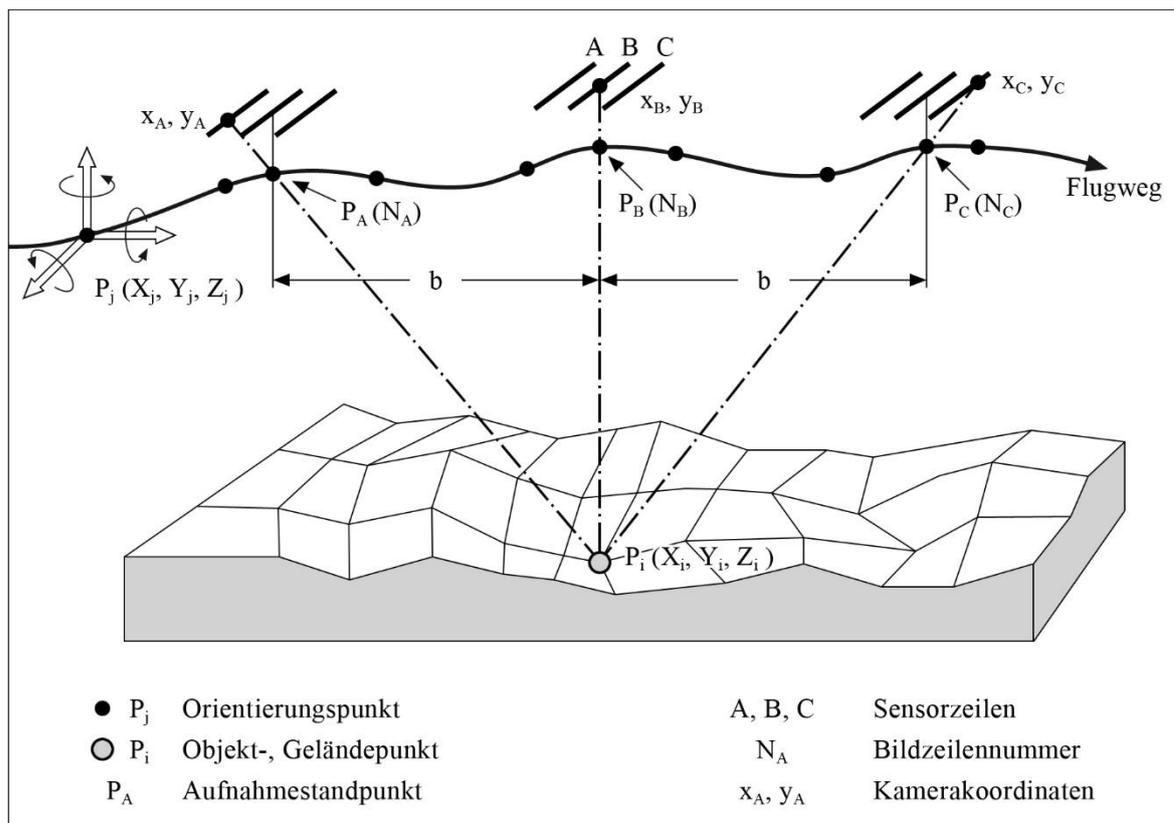


Abb. 2: Auswerteprinzip der Dreizeilenabtaster -Aufnahmen [Hofmann et al., 1993]

c	Kammerkonstante
X, Y, Z	Objektkoordinaten des Punktes P
$X_{pz}(i), Y_{pz}(i), Z_{pz}(i)$	Objektkoordinaten des Aufnahmeortes, zugehörig zur Sensorzeile (i)
$r_{11}(i), \dots, r_{33}(i)$	Elemente der Drehmatrix des Stereoabtasters mit drei Drehparametern $\varphi(i), \omega(i), \kappa(i)$

Bei der Auswertung von MOMS-Aufnahmen wird angenommen, daß sich die sechs Orientierungsparameter jeder Sensorzeile nach einem vorgegebenen Modell innerhalb eines begrenzten Zeitraumes ändern. Im einfachsten Fall könnte man z. B. lineare Interpolationsfunktionen benutzen, um den Verlauf der Orientierungsparameter anzunähern. Die Aufnahmeorte mit momentanen Orientierungsparametern werden als Orientierungspunkte bezeichnet.

2.2 Koordinatensysteme und MOMS-Modellorientierung

Das mathematische Modell ([1]) setzt ein im Objektraum definiertes dreidimensionales kartesisches

Koordinatensystem voraus. Bei der Stereoauswertung von MOMS-Bildern an analytischen Plottern beziehen sich die Orientierungsparameter und die Koordinaten auf verschiedene Bezugssysteme. Folgende Koordinatensysteme werden benutzt: Weltsystem (Landeskoordinatensystem) X^W , Modellsystem X^M , Kamerasystem X^C , Bildkoordinatensystem X^P und Bildwagenkoordinatensystem X^S [Hoch, 1994].

Nach dem Plan des MOMS-02 Science-Teams wird im Zuge des photogrammetrischen MOMS-02-Testprojekts vorab eine Bildtriangulation mit dem Software-Paket CLIC [Ebner und Müller, 1986] durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Bündelausgleichung können zur Orientierung von MOMS-Modellen verwendet werden. Gegenüber der zweistufigen Modellorientierung (relative und absolute Orientierung) am analytischen Plotter führt das einstufige Orientierungsverfahren (Ableitung der Orientierungsparameter aus einer Bündelausgleichung) zu einer Zeitersparnis und zu einer Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Modellorientierung.

Zu beachten ist, daß eine direkte Verwendung der aus der Bündelausgleichung mit CLIC bekannten Orientierungsparameter nicht möglich ist, da

- die Drehreihenfolge zur Definition der Drehmatrizen zwischen CLIC (φ , ω , κ) und Planicomp (ω , φ , κ) nicht übereinstimmt und
- alle Transformationen in der Software des Planicomp von einem Modellkoordinatensystem ausgehen.

2.3 Berücksichtigung der Erdkrümmung

Die Erdkrümmung verursacht bei der Spacelab-Flughöhe von 296 km und der kleinen Brennweite von $c = 237.2$ mm (Forward- und Backwardobjektive) erheblich radiale Versetzungen in den MOMS-Aufnahmen. Berücksichtigt man sie nicht, so würde dies zu beträchtlichen Höhen- und Lagefehlern führen, besonders bei am Rand des Modells gelegenen Punkten.

Die maximalen, durch den Einfluß der Erdkrümmung bewirkten Höhen- und Lagefehler lassen sich wie folgt abschätzen (Abb. 3):

- maximale Höhenabweichung

$$dH = \frac{s^2}{2R} \quad [2]$$

- maximale Lageabweichung

$$ds = \frac{dH \cdot s'}{c} \quad [3]$$

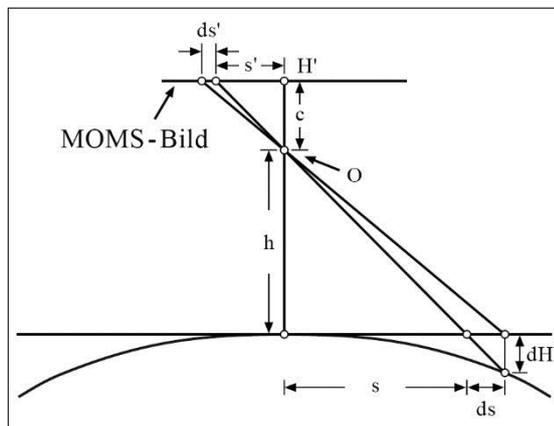


Abb. 3: Einfluß der Erdkrümmung auf Abbildungsfehler bei der MOMS-Bildaufnahme

Bei der photogrammetrischen Auswertung von MOMS-Bildern zur Herstellung oder Fortführung topographischer Karten (z. B. in den Maßstäben 1:25000 oder 1:50000) kann der Einfluß der Erdkrümmung durch eine Korrektur der Modellkoordinaten kompensiert werden. Die entsprechende Korrekturformel lautet [Kraus, 1984]:

$$\begin{aligned} \Delta X &= -\frac{dY \cdot Z}{R} \\ \Delta Y &= -\frac{dX \cdot Z}{R} \\ \Delta Z &= -\frac{dY \cdot dX}{2R} \end{aligned} \quad [4]$$

mit:

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Korrekturwerte der Modellkoordinaten
dX, dY	Landeskoordinaten, auf einen Nullpunkt in der Mitte des MOMS-Bildes bezogen
Z	Geländehöhe im Landesystem
R	Erdradius ($R = 6370$ km)

Dabei wird vorausgesetzt, daß Ursprung, Maßstab und Orientierung des Modell- und Landesystems sich entsprechen, so daß die Landeskoordinaten in [4] in guter Näherung durch die Modellkoordinaten ersetzt werden können.

3. Ein Programm-Modul zur MOMS-Modellauswertung am analytischen Plotter

Am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München steht eine DEC VAX station 3100/38 als Hostrechner für ein ZEISS Planicomp P2. Die Hardware-Konfiguration des stereoskopischen Auswertegeräts ist aus Abb. 4 ersichtlich.

Mit analytischen Plottern ist eine Auswertung von MOMS-Bildern nur möglich, wenn die besondere Geometrie der Zeilenaufnahmen und die Erdkrümmung berücksichtigt werden. Somit kann die bestehende Software eines analytischen Plotters nicht ohne weiteres eingesetzt werden. Es sind Anpassungen vorzunehmen, um der im wesentlichen orthographischen Bildgeometrie in Flugrichtung Rechnung zu tragen. Außerdem soll das Programm-Modul für Planicomp der P-Serie unter PHOCUS verfügbar sein, um die umfangreichen Graphikoperationen in PHOCUS (Abb. 5) voll ausschöpfen zu können. Letztlich muß der Echtzeit-Loop aufgrund der Geometrieigenschaften der MOMS-Aufnahmen in Flugrichtung neu programmiert werden.

Jede einzelne Zeile des MOMS-Bildes wird von einer anderen Position auf dem Weg des Plattformträgers aufgenommen. Die Abbildung innerhalb

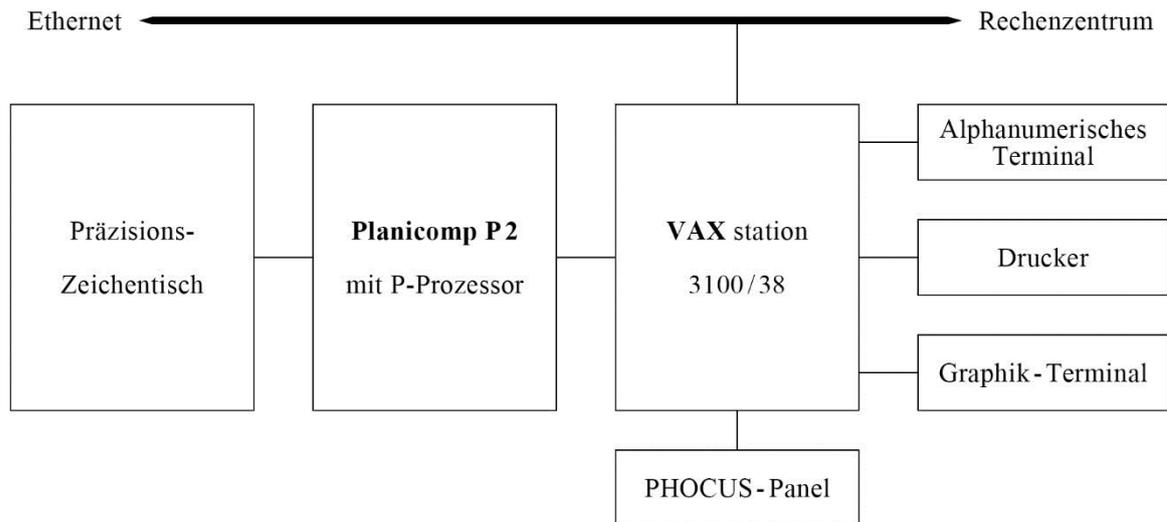


Abb. 4: Systemkonfiguration zur Stereoauswertung von MOMS - Bildern

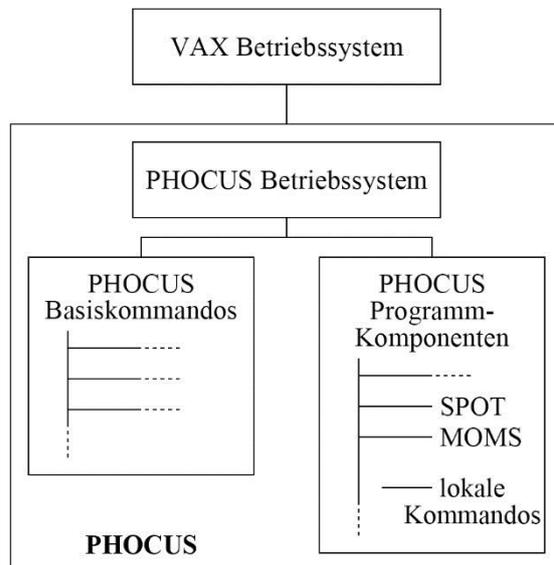


Abb. 5: Vereinfachte Struktur der PHOCUS-Software einschließlich Programm-Modul zur MOMS - Auswertung

einer Zeile entspricht der Zentralprojektion. Aufgrund dieser Eigenschaft wurde eine Lösung für die analoge Verarbeitung von MOMS-Bildern an analytischen Auswertegeräten vorgestellt [Konecny et al., 1986].

Am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der UniBw München wurde dagegen ein Programm-Modul zur direkten Lösung am Planicomp P2 entwickelt. Dabei werden Korrekturwerte durch Vergleich zwischen »Soll«-Bildwagenkoordinaten (MOMS-Geometrie) und »Ist«-Bildwagenkoordinaten (Zentralperspektive innerhalb der übli-

chen Planicomp-Software) ermittelt und angebracht.

Der Auswerteablauf wird im Blockschema der Abb. 6 und 7 gezeigt. Als Eingangsdaten für die Auswertung dienen die ausgeglichenen Orientierungsparameter aus dem Bündelprogramm CLIC [Müller, 1991] für alle Orientierungspunkte.

Dieses Verfahren setzt voraus, daß die äußere Orientierung für jede aufgenommene Zeile des MOMS-Bildes neu berechnet wird, da die Orientierungsparameter von der jeweiligen Zeilennummer (i) (Abb. 2) abhängig sind. Die projektiven Abbildungsgleichungen lassen sich als Kollinearitätsgleichungen ([1]) mit zeitabhängigen Orientierungsparametern formulieren und wurden in ein Programm-Modul umgesetzt. Zur inneren Orientierung der MOMS-Bilder auf den Bildwagen des Planicomp werden die Bildecken anstatt der Rahmenmarken – wie bei konventionellen Reihenmeßkameras – angefahren. Die Sollabstände der Bildecken lassen sich aus der bekannten Zeilen- und Pixelzahl sowie der Pixelgröße im digitalen Bild berechnen.

Werden nach dem Start eines lokalen Kommandos »ON« unter PHOCUS die Handräder bewegt, so berechnet das Loop-Programm aus den Impulsen für Punkt P die neuen Modellkoordinaten X^M und transformiert diese mit den auf das Modellsystem bezogenen Orientierungsparametern in Bildkoordinaten X^P und Bildwagenkoordinaten X^S (Ist-Wert) sowie mit den im Weltsystem gegebenen Orientierungsparametern in das Weltsystem X^W . Mit diesen neuen X^W und den Orientierungsparametern der Zeile (i) erhält man aus den Kollinearitätsgleichungen

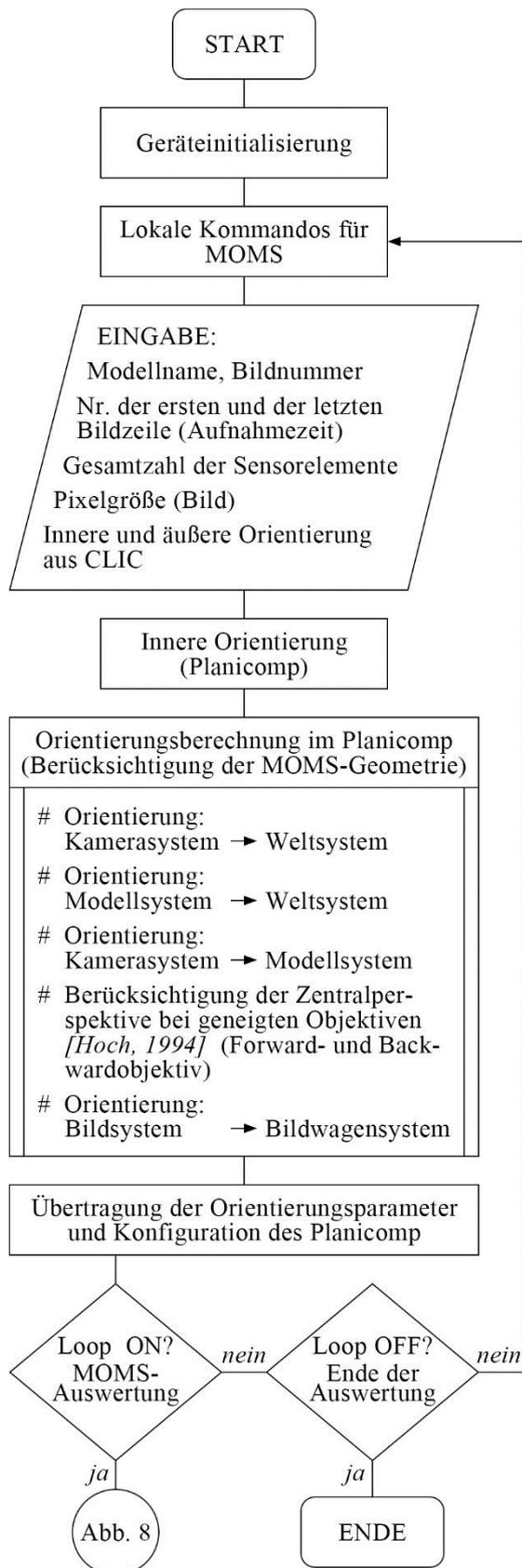


Abb. 6: Ablauf- und Datenflußplan zur stereoskopischen Auswertung von MOMS-Bildern am analytischen Plotter

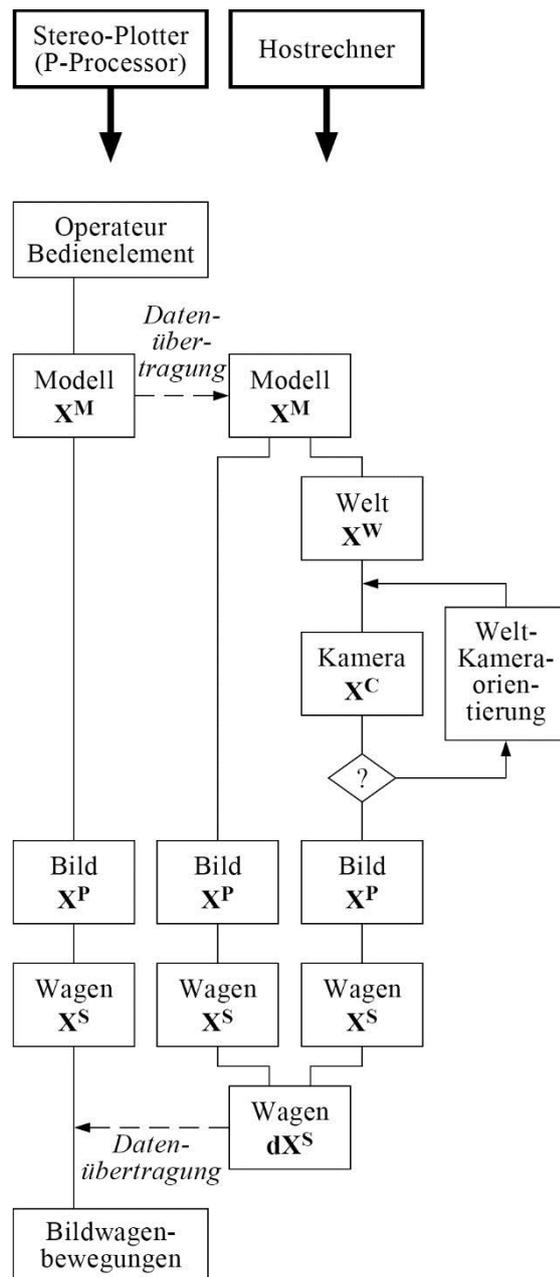


Abb. 7: Implementierung des Programms am analytischen Plotter [Hoch und Dorrer, 1992]

tätsgleichungen die Koordinaten \mathbf{X}^C (nämlich x, y) bezüglich der Zeile (i). Ergibt sich ein von einer Toleranzgrenze abweichender Wert x , muß die Berechnung von x iterativ erfolgen. Die verbesserten Zeilennummern ergeben sich aus $i' = i + \delta i$, und die Orientierungsparameter $\mathbf{X}_{pz}, \mathbf{R}$ werden entsprechend für neue Zeilennummern (i') interpoliert. Die Iteration setzt bei [1] wieder ein und kann abgebrochen werden, wenn $|x| < \delta$ (δ : Toleranzgrenze, z. B. $0.5 \times$ Pixelgröße).

Ist $|x| \leq \delta$, so hat man die zum Objektpunkt \mathbf{X} gehörende Zeilennummer, auf der der Punkt \mathbf{P} ab-

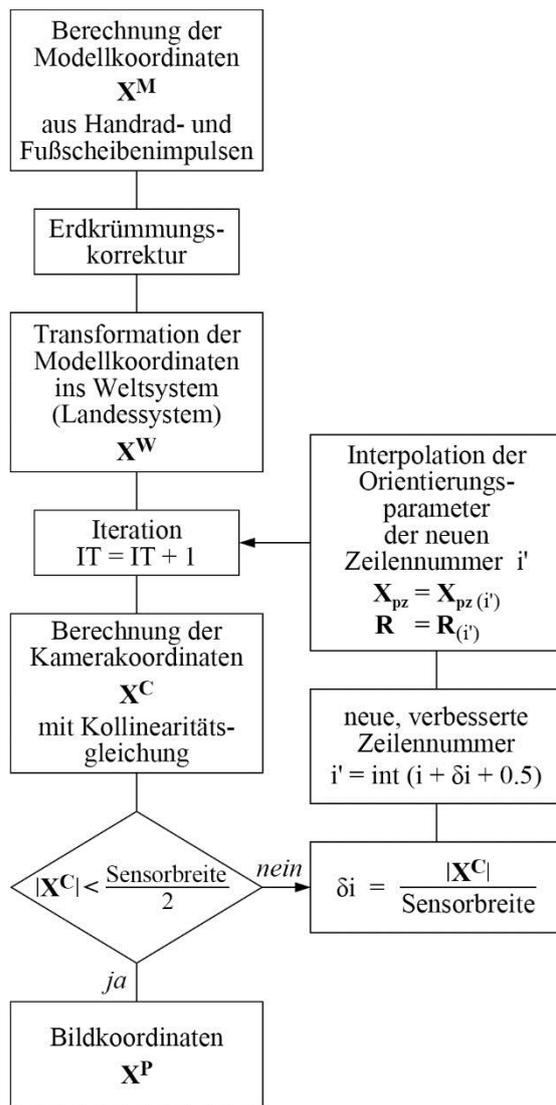


Abb. 8: Ablaufdiagramm des Echtzeit-Loop für MOMS-Modellauswertung

gebildet wird, und seine Bildkoordinaten x errechnet. Nun müssen noch die Bildkoordinaten x in die Bildwagenkoordinaten x (Soll-Wert) transformiert werden. Aus der Differenz der Soll- und Ist-Bildwagenkoordinaten berechnet das Programm-Modul Korrekturwerte für die Bildwagenpositionen. Abb. 8 zeigt den Echtzeit-Loop in einem Ablaufdiagramm [Hoch und Dorrer, 1992].

Mit drei synthetischen Bildpaaren von Zeilenaufnahmen (MOMS-Geometrie) wurde das Programm-Modul getestet, so daß erste Abschätzungen bezüglich des Zeitverhaltens, das bei diesem Vorgehen als das eigentlich kritische Merkmal betrachtet werden muß, möglich sind.

Es galten die folgenden Aufnahmebedingungen:

1. Bildpaar (ebenes Gelände, vollkommener Flug)
Gelände: völlig eben und gitterförmig
Flug: ideale Dynamik
 $V = (V_x, V_y, V_z)$
 $= (8000, 0, 0) \text{ m/s}$
2. Bildpaar (bewegtes Gelände, vollkommener Flug)
Gelände: gitterförmig, aber große Höhenunterschiede
Flug: ideale Dynamik
 $V = (V_x, V_y, V_z)$
 $= (8000, 0, 0) \text{ m/s}$
3. Bildpaar (ebenes Gelände, gestörter Flug)
Gelände: völlig eben und gitterförmig
Flug: $V = (V_x, V_y, V_z)$
 $= (8000, 0, 300) \text{ m/s}$

Es zeigte sich, daß mit dem jetzigen Programm-Prototyp die Verbindung zwischen Objektpunktkoordinaten, der zugehörigen Zeile (i) (und damit der Position des Projektionszentrums) und MOMS-Bildkoordinaten für beide Bilder hinreichend schnell ermittelt werden kann.

4. Schluß

Anhand des vorgestellten Programm-Moduls wurde die Möglichkeit der Stereoauswertung von Zeilenabtastreraufnahmen am analytischen Plotter Planicomp aufgezeigt. Somit könnten ohne Einschränkungen alle vorhandenen Auswerteprogramme von PHOCUS genutzt werden, und die Auswertung erfolgt wie bei zentralperspektiven Abbildungen. Eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Programm-Moduls anhand experimenteller MOMS-Daten von ausgewählten Testgebieten soll in naher Zukunft durchgeführt werden.

Literatur

- Derenyi, E. E., Konecny, G. [1966]: Infrared Scan Geometry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 32, No. 5, Washington D.C.
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) [1991]: Zweite Deutsche SPACE-LAB-Mission D-2. Informationsblatt der DLR, Oberpfaffenhofen, 4 S.
- Ebner, H., Müller, F. [1986]: Processing of Digital Three Line Imagery Using a Generalized Model for Combined Point Determination. Proceedings of the International ISPRS-Commission

- III Symposium »From Analytical to Digital«, August 19-22, 1986, Rovaniemi, Finland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 3/1, Rovaniemi, S. 212-222
- Gugan, D. [1987]:* Topographic Mapping from SPOT Imagery with the Kern DSR Analytical Plotting System. University College London
- Hoch, L., Dorrer, E. [1992]:* Real Time Processing of MOMS-02 Linear Array Imagery for Analytical Stereo Restitution. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission II, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B2, Washington D.C., S. 140-144
- Hoch, L. [1994]:* Ausgewählte Probleme der stereoskopischen Auswertung von Aufnahmen mit einer Dreizeilenkamera am analytischen Auswertegerät. – In: *Brunner, K., Peipe, J. (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Heft 46, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, S. 103-107
- Hofmann, O. [1986]:* Dynamische Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 54. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 105-122
- Hofmann, O., Kaltenecker, A., Müller, F. [1993]:* Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – Erste Erprobungsergebnisse. – In: *Fritsch, D., Hobbie, D. (Hrsg.):* Photogrammetric Week '93 (44. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, 1993). Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 97-107
- Konecny, G., Kruck, E., Lohmann, P. [1986]:* Ein universeller Ansatz für die geometrische Auswertung von CCD-Zeilenabtasteraufnahmen. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 54. Jahrgang, Heft 4, Karlsruhe, S. 139-147
- Kraus, K. [1984]:* Photogrammetrie, Band 2 – Theorie und Praxis der Auswertesysteme. Dümmler Verlag, Bonn, 389 S.
- Müller, F. [1991]:* Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 372, Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 82 S.
- Seige, P., Meissner, D. [1993]:* MOMS-02: An Advanced High Resolution Multispectral Stereo Scanner for Earth Observation. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 7, No. 1, London/New York

S. E. Masry, L. Mayer and J. Hughes Clarke

Integrating Geographic Information and Image Analysis Functionality into a Single Spatial Analysis System

Summary

The integration of a Geographic Information System and Image Analysis System functionality into a single spatial analysis system is a relatively new development. In 1992/93, Universal Systems Ltd. undertook the task of developing such a system. The work was completed in cooperation with the Ocean Mapping Group of the University of New Brunswick. It involved enhancing the raster functionality of the geographic information system CARIS and the integration of its raster and vector components.

The integrated system was used in an application project which involved georeferencing multiple data sets from a wide variety of sources. The project incorporated over 100 files from non traditional sources of data, such as EM 1000 side-scan backscatter data, scanned aerial photographs and satellite imagery into a hydrographic database. The end product was a geographical data set with continuous coverage of the land and marine zone. The results proved to be very promising in terms of marine science applications as well as applications from other disciplines.

Zusammenfassung

Die Funktionalität eines Geographischen Informationssystems und eines Bildverarbeitungssystems in ein einziges räumliches Analysesystem zu integrieren, ist eine relative neue Entwicklung. In den Jahren 1992/93 übernahm Universal Systems Ltd. die Aufgabe, solch ein System zu entwickeln. Die Arbeit wurde in Kooperation mit der Ocean Mapping Group der Universität von New Brunswick ausgeführt. Enthalten waren eine Erhöhung der Rasterfunktionalität des Geographischen Informationssystems CARIS und die Integration seiner Raster- und Vektorkomponenten.

Das integrierte System wurde in einem Projekt eingesetzt, das die Georeferenz multipler Datensätze aus einer großen Vielfalt von Quellen enthielt. Das Vorhaben vereinigte mehr als 100 Files aus nicht-

traditionellen Datenquellen, wie z.B. EM 1000 Sonardaten, gescannte Luftbilder und Satellitenbilder in einer hydrographischen Datenbank. Das Endprodukt war ein Satz geographischer Daten, die Land- und Meeresgebiet kontinuierlich überdecken. Die Ergebnisse erwiesen sich als vielversprechend für Anwendungen in der Meereswissenschaft und ebenso in anderen Disziplinen.

Introduction

The integration of a Geographic Information System (GIS) and Image Analysis System (IAS) into a single spatial analysis system is a relatively new development. Traditionally vendors have developed software programs for transferring data files from one system to another. While this was a relatively simple process, it still required the user to have both a GIS and an IAS in order to perform the analysis that was needed.

In the spring of 1992, Universal Systems Limited was awarded a project with the Canadian Space Agency and the Province of New Brunswick Department of Economic Development and Tourism to utilize an integrated GIS and IAS. The project required that the system should also provide the ability to import, display, analyze and output raster data along with having the full traditional vector functionality available in a GIS. A demonstration project was carefully chosen that would fully exercise the integrated functionality of the system. The criteria for choosing the project was that it must make full use of the functionality of the integrated system, it should demonstrate an enhancement to existing CARIS¹ applications and it should be an innovative application that requires the existence of a fully integrated GIS/IAS in order to accomplish the desired results.

¹ CARIS, the Computer Aided Resource Information System, is a Geographic Information System (GIS for creating, managing and integrating databases for marine, topographic, forestry, agriculture, geosciences, land management and other spatially related disciplines.

It was decided that the application should be in the marine sciences sector due to the importance that this sector plays in the business of the company. To help in accomplishing the goals of the functionality available, the Ocean Mapping Group at the University of New Brunswick was encouraged to test and evaluate the integrated system using the demonstration project.

Prior to the project, CARIS vector and raster functionality lacked the complete integration to meet the project's requirements. In addition, due to the extensive functionalities available to handle both the raster and vector data, there existed some inconsistencies. Therefore, the first task was to fully integrate the image processing and GIS functions of the system. This ensured that command syntax and functionality was consistent throughout the system.

Once the software was integrated, further enhancements were made to the integrated system. These included image mosaicing, overlaid raster and vector plotting, and the development of a client/server interface that permitted users to access CARIS functionality through third party software programs.

Integrated System Highlights

Existing vector and raster capabilities available in CARIS included data input, interactive and batch editing, topological creation, interactive and batch database analysis (including raster analysis using raster objects), digital terrain modelling, network analysis, 3 D data quality assurance and semi-automated raster to vector map conversion. The newly integrated image processing commands within CARIS include:

- Turning on and off the raster image backdrop
- Selection of multiple raster image layers or files
- Drawing the raster image data individually or with vector data
- Display of pixel values individually or in a histogram
- Incremental geometric correction (Shift, Scaling, Rotation, Skew)
- Trial Classification and training set selection
- Image Classification
- Image modification which includes:
 - histogram equalization
 - direct histogram specification
 - piecewise linear stretch

- neighbourhood averaging
- bi-directional gradient
- HIS to RGB colour space transformation
- Generate a profil of image values from a user defined profile line
- Write out a selected area of the image
- Create a raster object from a range of raster pixel values
- Image Mosaicing
- Digital Orthophoto generation
- Mono photo digitization
- CARIS Raster Image client/server interface

Project Objectives

In the Marine Sciences Sector there has not been a commercially available system that could import, export and manipulate the many different types of hydrographic and marine image data. This project saw the development of an application that incorporated non traditional sources of data, such as EM 1000 side-scan backscatter data, scanned aerial photographs and satellite imagery into a hydrographic database. The database included soundings, contours, and coastlines. A challenging aspect of this application was the determination of how well the system would handle the large number of data sets and the resulting large physical size of the data files. As opposed to satellite images that cover a great deal of area, the sonar images were much smaller and, therefore, required more image files to cover the project area (46 square kilometres).

The project involved also a longer term objective that was to develop procedures which could assist hydrographic ground trothing. In the ground trothing, sonar imagery, and in intertidal regions, airborne remote sensing data would be used to assist in the remote identification and classification of seafloor materials using sweep and swath-map data.

Project Outline

The project area selected was in Minas Channel, Parrsboro, Nova Scotia, Canada (Fig. 1). The criteria for selecting the site was primarily based on the immediate availability of data for both the marine and land areas of interest. The required functionality identified by the Ocean Mapping Group included the ability to import side-scan sonar data, mosaic multiple data sets (of differing

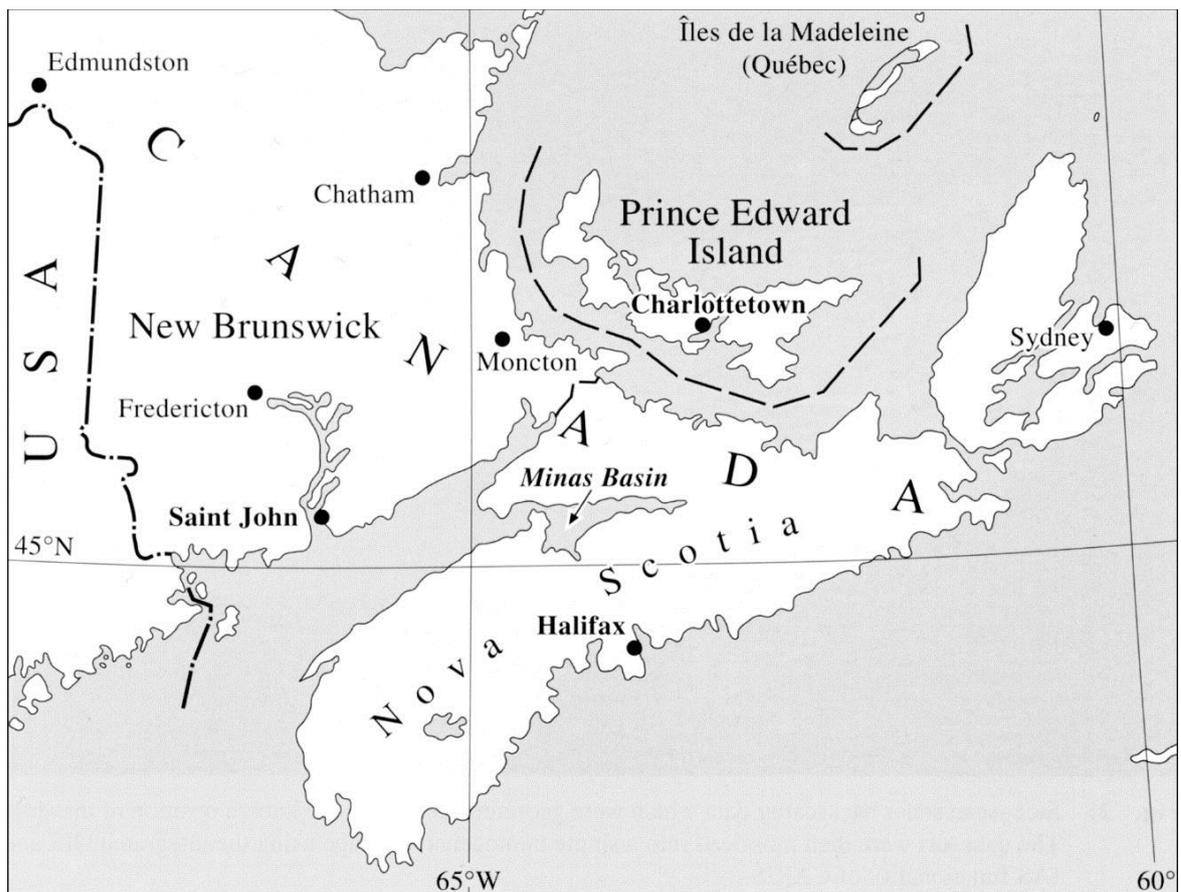


Fig. 1: Project area located on the coast of Canada in the Minas Basin, Nova Scotia

sources) together into a homogeneous file for display and analysis and the output of the data sets to a hard copy (paper plot) format.

Data was collected from a wide variety of sources. The side-scan sonar data was collected by mid August, 1992 using the SIMRAD EM 1000 Multibeam Echo Sonder instrument on the Canadian Hydrographic Service ship F. G. CREED. At the same time, a digital data search was carried out at the Canada Centre for Remote Sensing to determine what other data sources were available. The final data sets used included:

- EM 1000 Side Scan Sonar
- EM 1000 Bathymetry
- Airborne Infra Red Photography
- ERS 1 SAR Satellite Imagery
- Topographic Data (Digital and Paper).

File conversion programs were developed to read in the EM 1000 and ERS 1 data into CARIS. The sonar data was georeferenced based on the recorded ship position. A transformation algorithm was

added to the registration command that allowed for the shift, rotation and scaling of the sonar imagery. The aerial photographs and ERS 1 imagery were registered using ground control points collected from the topographic data files.

After the data sets were georeferenced to a common coordinate system, they were mosaiced into a single homogeneous image (Fig. 2). A challenge was presented by the large number (>100) and size of the sonar imagery files. The processing of such files required more computer memory resources than was available. The files were, therefore, processed in smaller groups of ten.

The image data was then combined with the vector topographic file (Fig. 3) so that it could be analyzed and enhanced as a single homogeneous data set using the newly integrated image processing commands. In particular, the new functionality was tested in terms of analyzing the seafloor bottom characteristics. Once the data had been fully analyzed, paper plots were created of the vector data overlaid onto the mosaiced raster imagery.

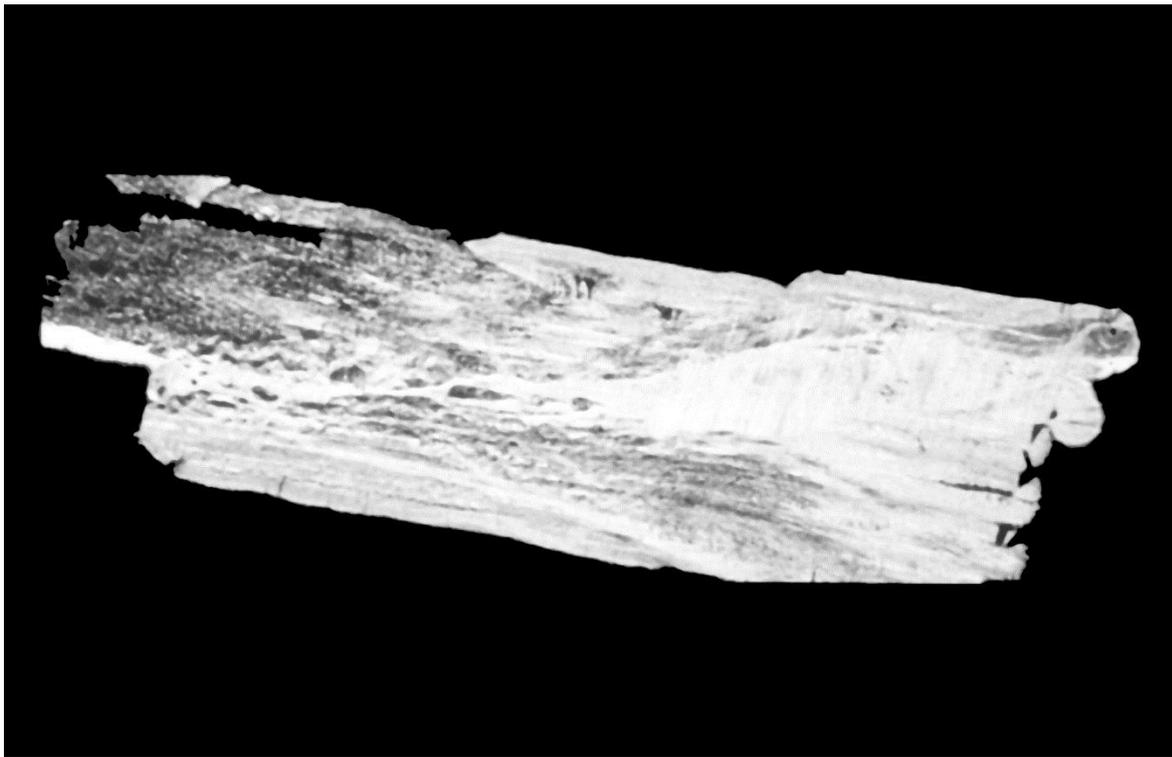


Fig. 2: Side-scan sonar backscatter data which were georeferenced using the known position of the ship. The data sets were then mosaiced into a single homogeneous image using the integrated GIS and IAS functionality of CARIS.

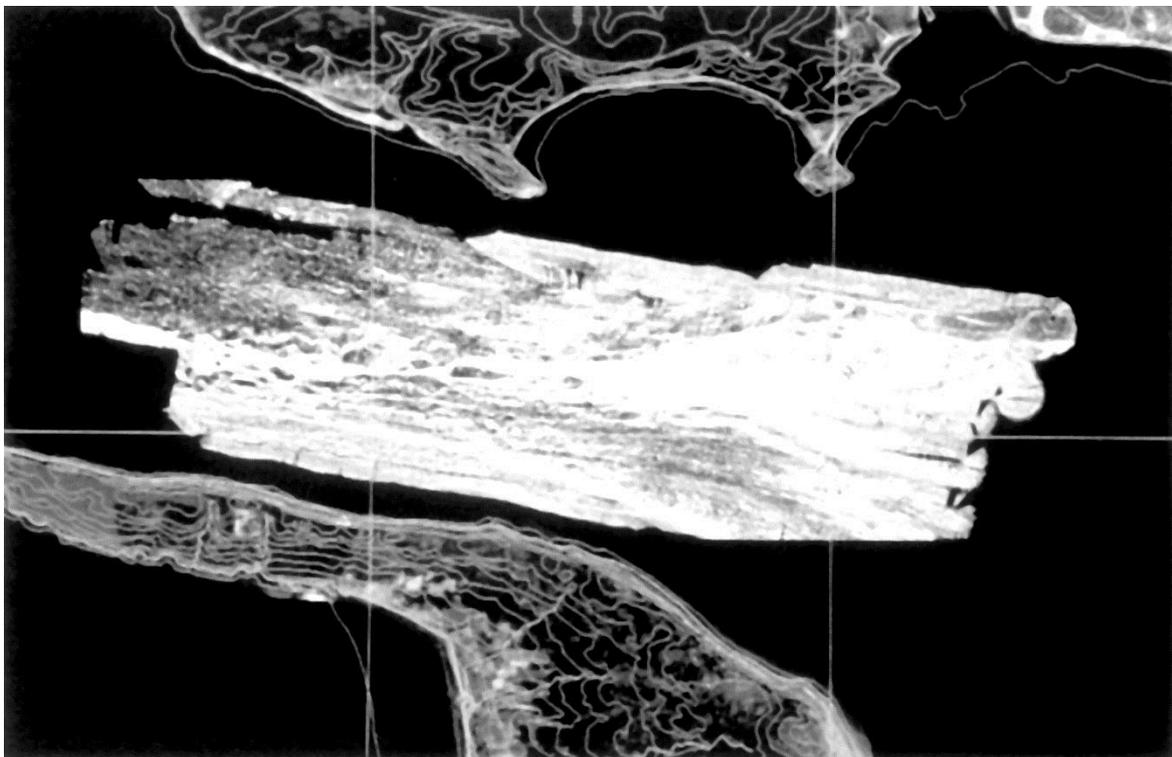


Fig. 3: Continuous coverage of the land/marine zone was possible by combining various data sets including vector topographic file, side-scan sonar backscatter imagery and scanned infrared aerial photography.

Conclusions

The end product of the demonstration project was a continuous data set that included both land and marine information. A possible use of an integrated marine/land data set would be in the detection of geologic trends that would normally be difficult to find when looking at the data sets individually.

The results obtained demonstrated that the integrated GIS/IAS system, CARIS, provided all the functionality necessary to successfully complete the work.

It is anticipated that future enhancements to the mosaicing, image registration and plot functionality will help to further expand the potential application of the system to a wider variety of disciplines.

Acknowledgements

This project has been funded jointly by the Canadian Space Agency and the New Brunswick Department of Economic Development and Tourism under the Atlantic Canada STEAR Initiative (ACSI) program. Universal Systems Ltd. is greatly appreciative for their support. In particular we would like to thank Mr. Jim Chandra, New Brunswick Department of Economic Development and Tourism, Mr. Lorne Schmidt, Canadian Space Agency and Mr. George Nimegeers, New Brunswick Department of Commerce and Technology for their support. Thanks are also due to the Canadian Hydrographic Service for allowing access to its ship F. G. CREED and to Cathryn Bjerkelund, the Canada Centre for Remote Sensing for providing the ERS 1 imagery. The authors wish to express their sincere thanks to Prof. E. Derenyi, Mr. M. Halim and Mr. R. Lunn for their valuable contribution to this work.

Zur Bewegungsmessung mit Leuchtspurverfahren

Seit etwa 10 Jahren werden unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. E. Dorrer am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München Untersuchungen zur photogrammetrischen Vermessung von Objektbewegungen durchgeführt. Daher ist ihm der vorliegende Bericht gewidmet, der sich mit den Merkmalen und der Entwicklung der eingesetzten Verfahren befaßt.

Zusammenfassung

Um Bewegungen präzise analysieren zu können, muß man ihren Ablauf in Raum und Zeit bestimmen, d. h. sie meßtechnisch erfassen. Setzt man für die Erfassung bildregistrierende Aufnahmesysteme ein, so bietet sich die Photogrammetrie als Methode zur metrischen Rekonstruktion an. In diesem Bericht werden einige Techniken der Bewegungsaufzeichnung mit Hilfe von Leuchtspuren vorgestellt und durch Anwendungsbeispiele erläutert.

Summary

Precise motion analysis requires recording, measurement and spatial reconstruction of motion. Photogrammetry provides for the metric determination of motion by means of images. In this paper, several recording techniques based on light-traces are presented and exemplified by applications.

1. Einleitung

Den Ablauf von Bewegungen sichtbar und nachvollziehbar zu machen, ist ein faszinierender Vorgang, der mit Hilfe der Photographie, vor allem aber durch Film- und Fernsehtechnik realisiert werden kann. Bei der Aufnahme einer Bewegung werden die Ortsveränderungen eines Objekts in Bildern »eingefroren« und bleiben als Information über einen bestimmten, momentanen Objektzustand dokumentiert erhalten.

Die metrische Rekonstruktion aufgezeichneter Bewegungen ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die hohe Anforderungen an die eingesetzte Meßtechnik stellt. Anwendungen hierfür finden sich in vielen Bereichen von Technik und Wissenschaft, Medizin, Sport etc. (siehe z. B. *Dorrer und Peipe [1987]*). Bewegungen unterschiedlichster Geschwindigkeit

treten auf: Es kann sich um sehr langsam fortschreitende Phänomene handeln wie das Fließen eines Gletschers, der im Abstand von Monaten oder Jahren erfaßt wird – oder um die kontinuierliche Vermessung rasch bewegter Objekte, zum Beispiel eines Roboters oder von Partikeln in einer strömenden Flüssigkeit. Als Auswertergebnis sind Lageinformationen gefordert, also Positionen im Raum, und physikalische Größen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung der Bewegung oder die Frequenz einer Schwingung.

Zur präzisen Erfassung bzw. Vermessung von Bewegungen mit Hilfe bildhafter Aufzeichnungen wird die Photogrammetrie eingesetzt. Einige der dabei angewendeten Meß- und Auswertetechniken sollen im folgenden genannt werden. Anschließend werden Verfahren zur Bewegungsregistrierung mit Leuchtspuren anhand von Beispielen vorgestellt.

2. Photogrammetrie zur Erfassung von Bewegungen

Photogrammetrische Verfahrenstechnik beinhaltet die Schritte Bildaufnahme, Bildmessung und Objektrekonstruktion. Zur Aufnahme von Bewegungen sind grundsätzlich alle Arten von Kameras geeignet, also Meßkameras, Nicht-Meßkameras, Réseau-Kameras und digitale Kameras (Auflistung z. B. in *Luhmann [1991]*). Die Aufgabenstellung kann eine 2D-Lösung erfordern oder – und das ist ja die eigentliche Domäne der Photogrammetrie – eine 3D-Lösung.

Als Geräte für die Bildmessung kommen Komparatoren, analytische Plotter, aber auch einfache Systeme auf der Basis eines Digitalisiertablets [*Fellbaum, 1992*] zum Einsatz – und in zunehmendem Maße digitale Auswertestationen. Wenn die 3D-Koordinatenbestimmung nicht bereits im Auswertegerät selbst erfolgt, kann sie – ausgehend

von gemessenen Bildkoordinaten – durch Rechenverfahren wie Bildtriangulation bzw. Bündelausgleich erfolgen. (Hinweise hierzu finden sich auch in den später beschriebenen Anwendungsbeispielen.)

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Objektrekonstruktion ist im wesentlichen vom Aufnahmegerät und seinem Kalibrierzustand – dies beinhaltet die Qualität der Wiederherstellung des Aufnahmestrahlenbündels (Ebenheit der Bildfläche, genaue Kenntnis der Parameter der inneren Orientierung) –, vom Bildmaßstab, von der Geometrie der Strahlenschnitte am Objekt, von der Meßgenauigkeit des Auswertegerätes und auch vom verwendeten Algorithmus für die Objektrekonstruktion abhängig.

Da die Meßmittel bekannt und vorhanden sind, liegt die Aufgabe des Photogrammeters in ihrer geeigneten Zusammenstellung zu einem Meßsystem, in dessen Erprobung und Einsatz sowie in der Beurteilung der Ergebnisse und ihrer Plausibilität.

Die bei Bewegungsmessungen auftretenden Datenmengen sind oft erheblich, so daß eine Automatisierung der Messung und Berechnung anzustreben ist – basierend auf digitalen Techniken der Bildverarbeitung.

3. Bewegungserfassung in einem Bild – analoge Bildaufzeichnung

Will man den Ablauf einer Bewegung in einem Bild festhalten, so muß man den Verschuß der aufzeichnenden Kamera entweder während der ganzen Bewegung geöffnet halten oder ihn mehrfach öffnen. Üblicherweise kommen für die beschriebene Technik nur analoge, film-basierte Kameras zum Einsatz, da Video-Kameras Bilder im durch die Videonorm vorgegebenen Takt von z. B. 25 Bildern/sec aufnehmen und daher pro Videobild nur einen kurzen Abschnitt der Bewegung erfassen (siehe auch Kap. 4). Im folgenden wird in systematischer Folge auf mögliche Aufzeichnungsverfahren eingegangen, um letztlich praktikable Techniken der Bewegungserfassung in einem Bild vorzustellen.

Die kontinuierliche Aufzeichnung einer Objektbewegung bei durchgehend geöffnetem Kameraverschuß ist wegen der entstehenden Verwischungen und Überstrahlungen wenig hilfreich, wenn man eine metrische Rekonstruktion vornehmen will. Das Ergebnis verbessert sich, wenn man den Verschuß mehrfach öffnet und schließt, ohne den Film

weiterzutransportieren, oder das Objekt in regelmäßigen Abständen anblitzt (Stroboskopie), so daß sich die einzelnen Bewegungsphasen trennbar abbilden.

Präzise erfassbar wird die Bewegung aber erst, wenn die Messung an diskreten, über das ganze Bild verfolgbaren und eindeutig identifizierbaren Objektdetails erfolgt. Dies bedeutet eine Reduzierung der Meßaufgabe: nicht das ganze Objekt wird vermessen, sondern nur eine bestimmte Anzahl von Objektpunkten, die am besten durch Markierung aus ihrer Umgebung herausgehoben werden. In der Regel wird der Anwender, also der Nutzer der photogrammetrischen Messung, die Auswahl der das Objekt repräsentierenden Punkte vornehmen. Das Aufzeichnungsverfahren muß dafür sorgen, daß die Abbildung dieser diskreten Punkte einen guten Kontrast zum übrigen Objekt bzw. dessen Umgebung (Hintergrund) aufweist.

Abb. 1 zeigt einen Hubschrauber, dessen Rotorenden mit Lichtquellen versehen wurden, die beim Flug Leuchtspuren erzeugen. Diese Methodik ist zum Beispiel für 2D-Anwendungen geeignet, bei denen die Schwingungen eines Objekts analysiert werden sollen. In Abb. 2 geht es um die periodische Prüfung der Stabilität der Tragfläche eines Se-

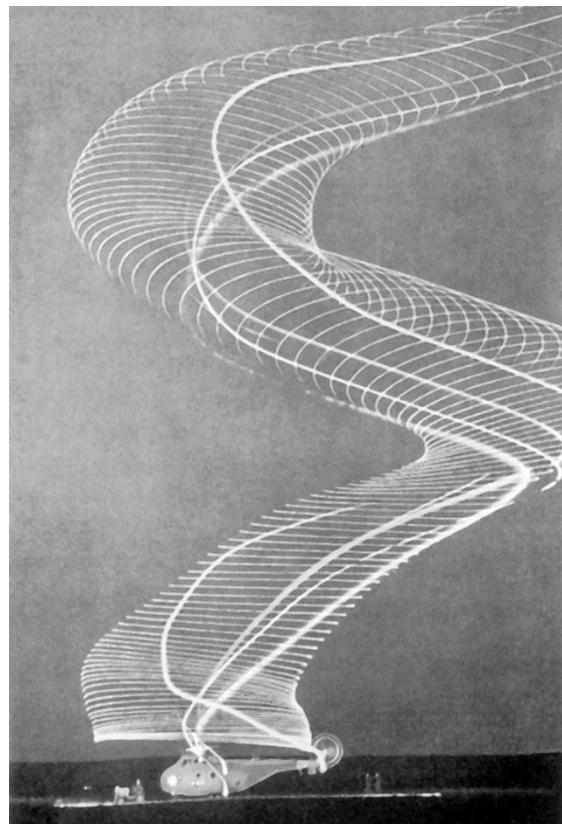


Abb. 1: Leuchtspuren der Flugbewegungen eines Hubschraubers [*Neues Universum*, 1957]

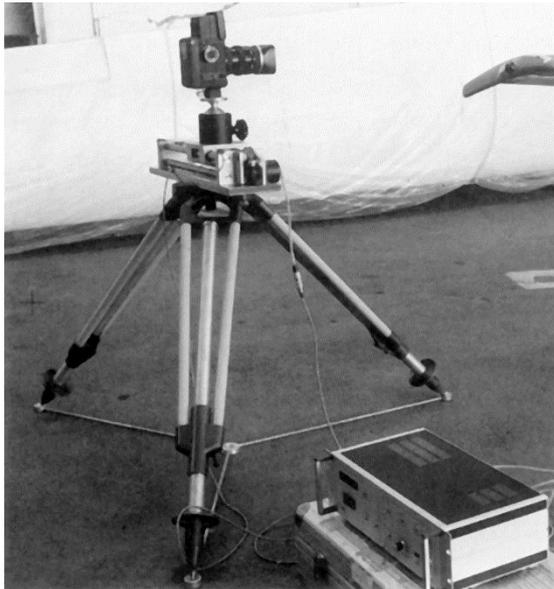


Abb. 2: Aufnahmeanordnung mit Réseau-Kamera und Linearversteller

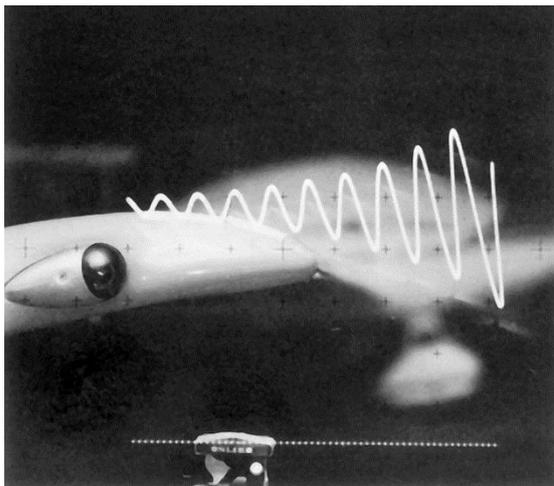


Abb. 3: Leuchtspur der Tragflächenschwingung und Zeitspur

gelflugzeuges [Güthner und Peipe, 1987]. Die hierfür notwendige Information läßt sich aus der Schwingung der Tragfläche ableiten und mit normierten Sollwerten vergleichen. Da die Schwingung sozusagen »auf der Stelle« stattfindet, muß man die Spur im Bild auseinanderziehen. Dies kann durch definierte Verschiebung der Kamera auf einem Linearversteller geschehen. Abb. 3 zeigt die mitregistrierte Spur eines mit bekannter Frequenz aufleuchtenden Lämpchens (»Zeitspur«), mit deren Hilfe man die Schwingungsdauer ableiten kann. Auf ähnliche Weise wurde auch die Schwingung eines Auspuffrohres erfaßt [Peipe, 1987].

Wie können bei solchen Bewegungsuntersuchungen Leuchtspur und Hintergrund voneinander getrennt werden? Am einfachsten ist es, die Objektpunkte mit Leuchtmarken zu versehen (Lämpchen, LED's etc.) und deren Ortsveränderung im Dunkeln bzw. in einem abgedunkelten Raum aufzunehmen. Andere Techniken wurden z. B. von Baum [1983, 1987] vorgeschlagen und erfolgreich angewendet (Infrarot-Motografie, BA-Motografie; bei letzterer wird der Raum mit einer nur in einem schmalen Frequenzband strahlenden Lichtquelle erhellt, damit die Bewegung nicht im Dunkeln durchgeführt werden muß; dieses Licht wird mit Hilfe eines Filters vor dem Kameraobjektiv von der Belichtung des Films ausgeschlossen, so daß auch hier wieder nur die Leuchtspur der Bewegung abgebildet wird). Weitere Möglichkeiten bieten das Beleuchten bzw. Anblitzen von mit Leuchtfarbe markierten Objektdetails [Baum, 1983; Peipe und Güthner, 1984] bzw. die Verwendung retroreflektierender Zielmarken.

Bewegungen, die in einer Parallelebene zur Bildebene der Aufnahmekamera stattfinden, können aus einem Bild rekonstruiert werden, wenn das Maßstabsverhältnis zwischen Objekt- und Bildraum bekannt bzw. ableitbar ist. Zum Beispiel kann eine in ihrer Länge bekannte Strecke im Bild gemessen werden oder ein Maßstab wird mitabgebildet (siehe auch Abb. 6).

Oft ist lediglich die Form einer Bewegung von Interesse, etwa um nachzuweisen, ob sie »glatt« oder »holperig« verläuft. Ein Beispiel aus dem Automobilbau zeigt in Abb. 4 und 5 die Hubtür eines PKW, die auf glatten Ablauf hin überprüft werden sollte [Peipe, 1989a]. Die Hubtür verschwindet im Schweller und wird wieder emporgehoben – ein Vorgang, der mit freiem Auge nicht in allen Einzelheiten ausreichend deutlich verfolgbar ist. Die mit Leuchtfarbe markierten Stellen auf der Tür bzw. Seitenwand des Fahrzeuges zeigten jedoch in der photographischen Aufnahme die gewünschte stetige Bewegung (Abb. 5).

Bisher wurden linienförmige Leuchtspuren betrachtet, interpretiert und physikalische Größen aus ihnen abgeleitet. Will man eine Bewegung durch Koordinatenpaare X, Y bzw. Koordinatentripel X, Y, Z von Spurpunkten kennzeichnen, so bietet es sich an, die zur Aufzeichnung verwendete Lichtquelle mit einer bestimmten Frequenz »blinken« zu lassen, während der Verschluss der Kamera geöffnet ist. Die Impulsfrequenz ist dabei in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des bewegten Objekts und der erforderlichen Registrierdichte auf der Spur festzulegen. Für metrische Auswertungen sollte die bei

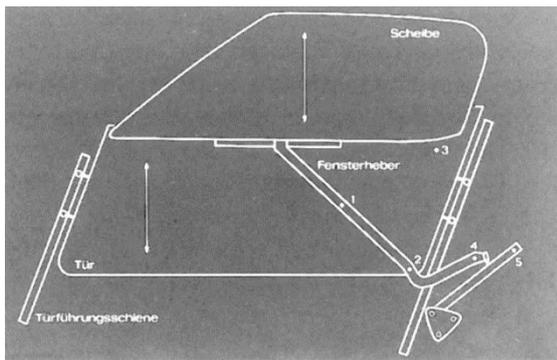


Abb. 4: Skizze der Hubtür mit Meßstellen



Abb. 5: Bewegungsspuren an der Hubtür

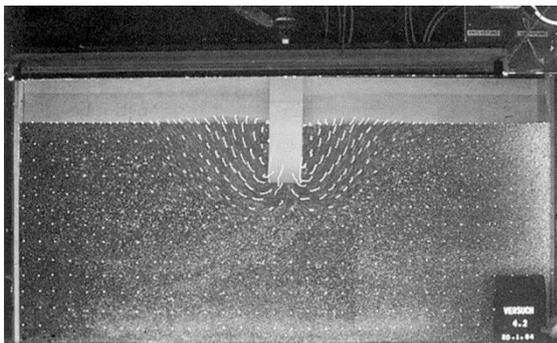


Abb. 6: Meßbild des Deformationsvorgangs

einem Impuls, also dem Aufblinken eines Lämpchens, erzeugte Leuchtspur möglichst kurz sein, das heißt eine punktförmige Abbildung auf dem Film erzeugen. Der Zeitbezug ist in der Leuchtspur enthalten, so daß bei bekannten Wegdifferenzen auch Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnet werden können. Die geschilderte Methode wird als Impulslichtverfahren seit langem angewendet [Hellmeier, 1980; Baum, 1983; Blumentritt und Schöler, 1984; Monczkowski und Regensburger,

1984 etc.]. Als Lichtquellen werden zum Beispiel gepulste Lämpchen und LED's eingesetzt.

Man kann den Impuls auch »von Hand« aufbringen, wenn es nicht auf den zeitlichen, sondern nur auf den räumlichen Abstand der Spurpunkte ankommt. Dies zeigt die folgende Anwendung im Boden- und Grundbau [Peipe und Güthner, 1984]. Hier ging es darum, Deformationen im Boden sichtbar und meßbar zu machen, d. h. wie ein Haus samt seinem Fundament den Boden belastet und verändert. Dies sollte im Modellversuch abgeklärt werden. Das Haus wurde durch einen Plastikklotz ersetzt, der von oben in den Boden eingepreßt wurde. Der Boden wurde durch zylindrische Aluminium-Stäbchen mit unterschiedlichem Durchmesser simuliert, so daß die Bedingungen natürlichen, sandig-kiesigen Bodens erreicht wurden. Die Stirnflächen einer Reihe regelmäßig angeordneter Aluminium-Stäbchen waren punktförmig mit Leuchtfarbe markiert, die dann durch UV-Licht zur Rückstrahlung angeregt wurde. Preßt man das Haus durch rhythmisches Pumpen in den Boden, so entstehen Leuchtspuren und Leuchtpunkte, die die Bewegung zeigen und ausgemessen werden können (Abb. 6). Am Rahmen des Modells angebrachte Maßstäbe mit Leuchtpunkten in kalibriertem Abstand geben die notwendige Maßstabsinformation.

Zur räumlichen Rekonstruktion von Leuchtspurpunkten benötigt man bekanntlich mindestens zwei Aufnahmen von unterschiedlichen Standpunkten, wobei die Bewegung in jedem Bild für sich registriert wird. Wenn die Signale punktförmig abgebildet werden, ist eine eindeutige Zuordnung in mehreren Bildern möglich – allerdings nicht immer einfach, z. B. wegen auftretender Verdeckungen. Die photogrammetrische Rekonstruktion kann zu sehr hohen Genauigkeiten im Raum führen; zum Beispiel betragen die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten der Leuchtspurpunkte bei der Analyse von Roboterbewegungen nach der Bündelausgleichung $s_{X,Y,Z} = 0.05 - 0.1 \text{ mm}$ [Peipe, 1989b und 1992]. Hierbei wurde ein Meßstern mit fünf LED's an seinen Enden an der »Roboterhand« befestigt (Abb. 7) und seine Bewegung bzw. sein Verhalten anhand verschiedener Prüffiguren verfolgt (Abb. 8). Mittels Impulslichtverfahren wurden punktförmige Spuren in einer Réseau-Kamera erzeugt und mit Verfahren der digitalen Punkterkennung an einem Réseau-Scanner weitgehend automatisiert ausgemessen. Die rekonstruierten Ist-Bewegungen des Roboters können zum Nutzen des Anwenders mit computergenerierten Soll-Bewegungen verglichen werden, um eventuell Modellanpassungen innerhalb der Off-line Programmierung des Roboters vornehmen zu können.

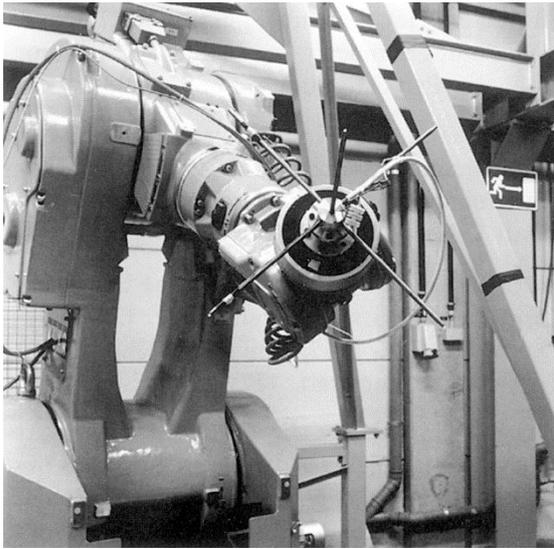


Abb. 7: Roboter mit Meßstern

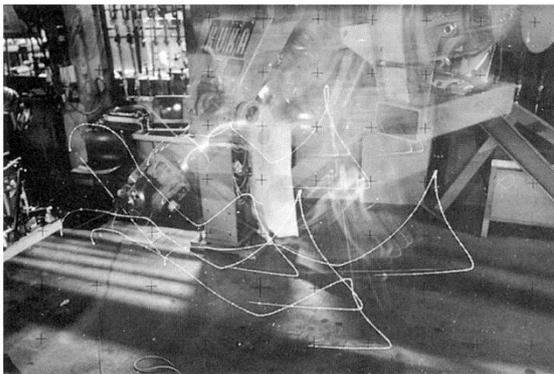


Abb. 8: Leuchtspuren einer Roboterbewegung

4. Digitale Bewegungsaufzeichnung

Verwendet man digitale Kameras zur Erfassung von Bewegungen – z.B. CCD Kamera mit etwa 750 x 500 Bildelementen –, so entstehen Bildsequenzen, aus deren einzelnen Bildern die Bewegung rekonstruiert werden kann [z. B. *Maas [1990]*, *Novak et al. [1990]*, *Grün [1992]*, *Fournée [1993]*). Videokameras mit unterschiedlicher Abtastrate bis zu High Speed Videokameras kommen zum Einsatz. Dabei kann die Bildfrequenz auf Kosten der Auflösung vergrößert werden.

Der Vorteil digitaler Lösungen liegt in der Automatisierbarkeit des Aufnahme- und Auswerteprozesses. Datenspeicherung, Bewegungsrekonstruktion und Bewegungsdarstellung können bei geringer

Punktdichte sogar in Echtzeit erfolgen. Die erreichbare Genauigkeit im Objektraum ist in der Regel niedriger anzusetzen als bei analoger Bildaufzeichnung, da photographische Kameras wesentlich größere Bildformate aufweisen als digitale Kameras.

Auch bei digitaler Bildaufzeichnung wird die Bewegung des Gesamtobjekts meist durch die Bewegung markanter bzw. markierter Objektdetails ersetzt. Leuchtspurverfahren werden eingesetzt. Ein kontrolliertes Pulsieren der Lichtquellen ist nicht erforderlich, da der Takt der Videokamera sowohl die Abbildungen der Spurbunkte voneinander trennt als auch ihren zeitlichen Abstand festlegt. Der Meßvorgang gliedert sich in die Schritte Bildakquisition, Erkennung bewegter Objektdetails in den einzelnen Bildern und Messung ihrer 2D-Koordinaten, Zuordnung gleicher Objektdetails in den aufeinanderfolgenden Bildern einer Kamera, Zuordnung gleicher Objektdetails in den Spurbildern verschiedener Kameras, Berechnung von 3D-Koordinaten.

Da der Autor dieses Berichtes zum Thema digitale Bewegungserfassung kaum eigene Untersuchungen beisteuern kann, soll hier abschließend lediglich über einen Versuch berichtet werden, digitale Aufnahme und das Impulslichtverfahren zu verbinden. Während nämlich Videokameras, wie sie in der industriellen Meßtechnik und auch in der Nahbereichsphotogrammetrie üblicherweise verwendet werden, per Kabel fest mit einem Computer verbunden sind – für Bildakquisition, Bildspeicherung und Energieversorgung –, gibt es inzwischen sogenannte Still Video Kameras, die unabhängig vom Computer eingesetzt werden können. Sie gleichen modernen Kleinbildkameras und weisen auch in der Bedienung kaum Unterschiede auf. Natürlich erfolgt die Belichtung nicht auf Film, sondern auf den eingebauten CCD-Chip von – im Fall der Kodak DSC 200 – etwa 1500 x 1000 Bildelementen [*Peipe und Schneider, 1994*]. Die Bilddaten (1.5 Mbyte pro Bild) können auf einer im Kameragehäuse eingebauten Festplatte gespeichert und – zeitlich und örtlich getrennt von den Aufnahmearbeiten – via SCSI-Schnittstelle in einen Rechner übertragen werden. Dann stehen sie zur digitalen Weiterverarbeitung zur Verfügung. Erste Versuche, mit dieser Kamera und gepulsten Lämpchen Bewegungen zu erfassen, wurden durchgeführt. Die Meßgenauigkeit der abgebildeten Leuchtpunkte – gemessen an der Digitalen Photogrammetrischen Arbeitsstation DPA [*Peipe et al., 1994*] – betrug weniger als 0.08 pixel, entsprechend 0.7 µm im Bildraum. Mit dieser Kamera ist es möglich, die Vorteile der Bewegungsaufzeichnung in einem Bild mit den Vorteilen der digitalen Aufnahme und online Auswertung zu verbinden.

Literatur

- Baum, E. [1983]:* Motografie II. Forschungsbericht Nr. 324, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 179 S.
- Baum, E. [1987]:* Motografie – Eine Methode zur Betrachtung und Messung von Bewegungen. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Heft 23, S. 43-52
- Blumentritt, S., Schöler, H. [1984]:* Photogrammetric Measuring Methods in Orthopedics. Jena Journal for Photogrammetrists and Surveyors, Heft 1984/1, Jena, S. 11-18
- Dorrer, E., Peipe, J. (Hrsg.) [1987]:* Motografie. Symposium 11./12. März 1986. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Heft 23, 280 S.
- Fellbaum, M. [1992]:* Low Cost Surveying Systems in Architectural Photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 5, Washington D.C., S. 771-777
- Fournée, E. H., Jobbágy, A. [1993]:* Precision 3-D Motion Analysis System for Real-Time Applications. Microprocessors and Microsystems, Vol. 17, No. 4, Oxford, S. 223-231
- Grün, A. [1992]:* Tracking Moving Objects with Digital Photogrammetric Systems. Photogrammetric Record, Vol. 14, No. 80, London, S. 171-185
- Güthner, K., Peipe, J. [1987]:* Registrierung und Analyse von Schwingungen mit Hilfe der Motografie. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Heft 23, S. 131-140
- Hellmeier, H.-J. [1980]:* Photogrammetrische Bewegungsanalyse mittels Bandabsorptionstechnik. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 23, Part B 5, Hamburg, S. 321-328
- Luhmann, T. [1991]:* Aufnahmesysteme für die Nahbereichsphotogrammetrie. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 59. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 80-87
- Maas, H.-G. [1990]:* Digital Photogrammetry for Determination of Tracer Particle Coordinates in Turbulent Flow Research. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part 5.1, Zürich, S. 391-398
- Monczkowski, U., Regensburger, K. [1984]:* Photogrammetrische Prüftechnologie für Industrieroboter. Jenaer Rundschau, 29. Jahrgang, Heft 1, Berlin, S. 28-31
- Neues Universum [1957]:* Das Neue Universum. Forschung, Wissen, Unterhaltung. Ein Jahrbuch. Band 74/1957. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 477 S.
- Novak, K., Baltsavias, E., Grün, A. [1990]:* Automatische Objektverfolgung in Stereovisionssystemen. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Zürich, Heft 170, S. 1-43
- Peipe, J. [1987]:* Photogrammetrische Deformationsmessungen an Karosserien. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Stuttgart, Heft 12, S. 101-109
- Peipe, J. [1989a]:* Motografie – eine Methode zur Erfassung von Bewegungen. VDI Berichte, Nr. 731, Düsseldorf, S. 261-272
- Peipe, J. [1989b]:* Measurement of Kinematic Robot Performance by a Hybrid Photogrammetric System. – In: Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques. Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 301-308
- Peipe, J. [1992]:* Photogrammetrische Verfahren zur Vermessung von Roboterbewegungen. – In: Welsch, W., Schlemmer, H., Lang, M. (Hrsg.): Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau. Schriftenreihe DVW, Band 1, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 203-217
- Peipe, J., Güthner, K. [1984]:* Zur Anwendung der UV-Motografie bei Modellversuchen im Grundbau. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 25, Part A 5, Rio de Janeiro, S. 612-621
- Peipe, J., Schneider, C.-T. [1994]:* Photogrammetric Calibration and Performance Test of Still Video Cameras. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 1, Como, S. 108-113
- Peipe, J., Schneider, C.-T., Sinnreich, K. [1994]:* Performance of a PC Based Digital Photogrammetric Station. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 5, Melbourne, S. 304-309

Zur Gliederung des Erdinneren

Die nachstehenden Ausführungen sind ein gekürzter und modifizierter Abschnitt aus einem größeren, noch unveröffentlichten Werk des Verfassers. Mit diesem Beitrag hofft der Verfasser, dem Jubilar zu seinem 60. Geburtstag eine kleine Freude bereiten zu können und dankt ihm noch einmal für das vierjährige gemeinsame Wirken im Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung.

Zusammenfassung

Es wird ein Überblick über die heute bekannte Gliederung des Erdinneren gegeben. Einen wesentlichen Beitrag hierzu haben der Einsatz seismischer Fernerkundungsverfahren und Bohrungen in die ozeanische sowie kontinentale Kruste der Erde geleistet.

Summary

The author gives a survey of the interior structure of the earth as known today. Essential contributions to this knowledge originate from the use of seismic remote sensing techniques and from drillings into the oceanic as well as continental crust of the earth.

1. Einleitung

Die vom Meer nicht bedeckten Landmassen der Erde, die Kontinente, waren nicht immer so angeordnet wie heute. Von dieser Annahme ausgehend, entwickelte der deutsche Meteorologe und Geophysiker A. Wegener [1880-1930] ein umfassendes Modell über die *Drift* dieser Kontinente. Die Kongruenz der Küstenlinien von Afrika und Südamerika, die Wegener zu seinen Überlegungen angeregt hatte, war einigen Wissenschaftlern zwar schon früher ausgefallen (beispielsweise dem englischen Philosophen Sir F. Bacon [1561-1626], dem deutschen Naturforscher A. v. Humboldt [1769-1859] u. a.); es entstanden daraus jedoch keine Modelle, die vergleichbar mit dem Modell von Wegener sind. Wegeners Modell kann als ein erstes *disziplinübergreifendes* Modell aufgefaßt werden, da sich vorliegende geologische, paläontologische und paläoklimatische Beobachtungs- und Meßergebnisse darin weitgehend integrieren ließen.

Auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Vereinigung in Frankfurt a. M. im Jahre 1912 hatte Wegener seine Vorstellungen erstmals der breiteren Fachwelt bekanntgegeben. Seine Vorstellungen fanden damals fast keine Zustimmung, vor allem, weil es ihm noch nicht möglich war, die Antriebskräfte für die postulierte Drift der Kontinente überzeugend aufzuzeigen. Auch heute, über 80 Jahre nach Wegeners Vortrag, wird noch immer darüber diskutiert, ob die Antriebsenergie für die Bewegung der als weitgehend starr angenommenen Lithosphärenplatten direkt (aus der Reibung an der Lithosphären-/Asthenosphären-Grenze) oder indirekt (aus Konvektionsprozessen im Erdkernmantel) oder in anderer Weise erbracht wird. Trotz des von Wegener skizzierten »dynamischen« Bildes der Erde blieb die nachfolgende geowissenschaftliche Forschung mehr oder weniger auf ein »statisches« Bild der Erde fixiert. Erst in den Jahren nach 1960 vollzog sich, fast revolutionär, ein tiefgreifender Wandel. Unter dem Begriff »new global tectonics« – mit den äquivalenten, heute gebräuchlichen (deutschsprachigen) Benennungen: globale Tektonik, Tektonik, Geotechnik, *Plattentektonik* – wurden die Forschungsaktivitäten verschiedener Wissenschaftsdisziplinen (Geophysik, Geologie, Geodäsie u. a.) nun verstärkt auf Fragen zur *Dynamik* und zur *lateralen* Variation des Erdinneren gelenkt.

Die interdisziplinäre Aufgabenstellung, die dem Begriff Plattentektonik innewohnt, führte zu zahlreichen Hypothesen und zunehmender multidisziplinärer Zusammenarbeit. Inzwischen entstand ein dynamisches Bild der Erde (im Sinne Wegeners) oder, wie wir heute sagen können, *ein generelles globales Modell der ständigen Umgestaltung der Geländeoberfläche der Erde*, mit dem wesentliche Vorgänge beziehungsweise Ergebnisse dieser Vorgänge weitgehend erklärbar sind: so die derzeitige und frühere Verteilung der Kontinente, Ozeane, über- sowie untermeerische Gebirge und Vulkane (einschließlich der Verteilung der Erdbeben); die

zeitabhängige Entstehung und Verteilung der häufigsten Gebirge, die nahe der Geländeoberfläche auffindbar sind; die zeitabhängige Entstehung neuer ozeanischer Kruste durch Aufsteigen von Mantelmaterial in den mittelozeanischen Rücken; das Spreizen der Ozeanböden; Richtung und Betrag der Drift der Lithosphärenplatten; die Subduktion; das Abtauchen schwerer ozeanischer Kruste unter die leichtere kontinentale Kruste; das Entstehen neuer kristalliner Gesteine aus aufgeschmolzener ozeanischer Kruste; das Anfügen von Granitgestein an Rändern von Kontinenten; die Kollision von Kontinenten, die der vollständigen Subduktion der dazwischen lagernden ozeanischen Kruste und dem Schließen des trennenden Ozeans folgt und (Ketten-) Gebirge entstehen läßt, wie etwa die Alpen und den Himalaya; den Spannungszustand der Lithosphäre und anderes mehr.

Gemäß den Hypothesen des Forschungsbereiches Plattentektonik ist die Erdkruste lateral mosaikartig gegliedert in Platten, die *Lithosphärenplatten*. Neben sechs riesigen gibt es noch kleinere Platten. Die größte Platte trägt praktisch den Pazifischen Ozean, die kleinste umfaßt etwa das Gebiet der Türkei. In den Hypothesen der Plattentektonik wird angenommen, daß sich die Platten in ständiger Be-

wegung relativ zueinander befinden, wobei sie sich voneinander entfernen, aneinander vorbeigleiten oder aufeinander zu bewegen können. Entsprechend werden drei Arten von Plattengrenzzonen unterschieden: die *Spreizungszonen* im (mittel-)ozeanischen Rücken (wo zwei Platten auseinanderdriften und zwischen ihnen neue ozeanische Kruste generiert wird), die *Transformstörungen* (in denen Platten aneinander vorbeigleiten) und die *Subduktionszonen* (wo sich Platten aufeinander zubewegen, wo eine Platte unter den aktiven Rande der anderen Platte abtaucht) [Dewey, 1987]. Jede Platte ist durch eine oder mehrere der drei genannten möglichen Arten von Plattengrenzzonen begrenzt. Bild 1 gibt eine Übersicht über die heutige generelle plattentektonische Gliederung der Erdkruste und die gegenwärtig bekannte generelle Kinematik der Lithosphärenplatten. Bild 2 zeigt beispielhaft den Vorgang der Meeresbodenspreizung (»seafloor spreading«) an einem schematischen West-Ost-Profileschnitt durch das Becken des Atlantiks. Aus Bild 3 ist (beispielhaft) der Vorgang der Subduktion ersichtlich für den Fall, daß eine Platte unter den aktiven Rand der anderen Platte abtaucht; den Fall der Subduktion kontinentaler Kruste (verbunden mit Gebirgsbildung) zeigt schließlich beispielhaft Bild 4.

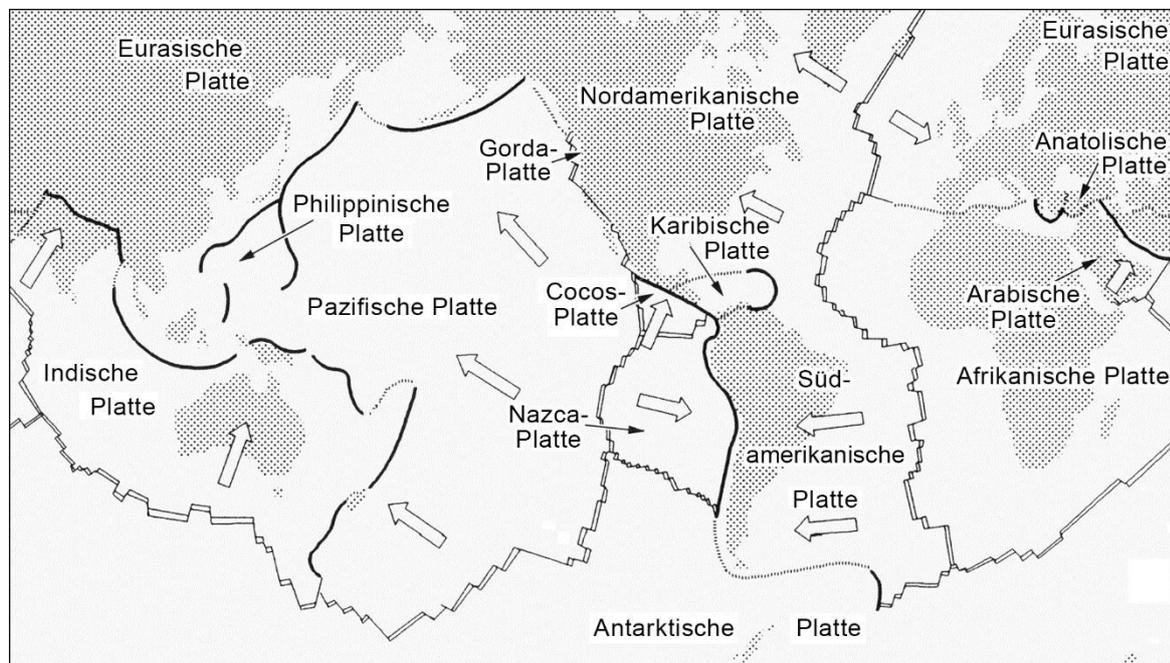


Bild 1: Übersicht über die generelle plattentektonische Gliederung der Erdkruste und die generelle Kinematik der Lithosphärenplatten nach heutigem Kenntnisstand.

Doppellinien: (Mittel-) Ozeanische Rückenachsen in den Spreizungszonen. – *Dicke schwarze Linien:* Subduktionszonen der Platten. – *Pfeile:* Richtung der Plattendrift relativ zur Afrikanischen Platte. Gestaltet nach Daten aus Sclater und Tapscott [1987], Pichler [1988], Strobach [1991] u. a..

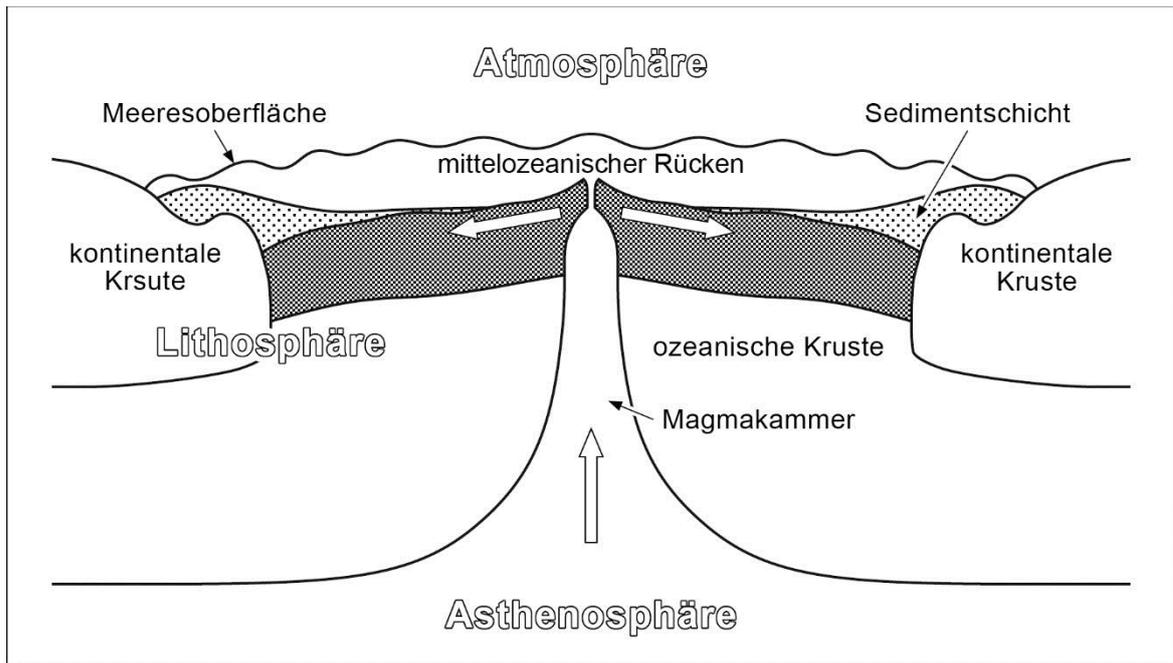


Bild 2: Schematische Darstellung eines West-Ost-Profileschnitts durch das Becken des Atlantiks (unmaßstäblich).

Aus der Asthenosphäre (>100 km Tiefe) steigt MaGMA IN DER Magmakammer nach oben (Pfeil), breitet sich als neuer ozeanischer Krustenteil vom mittelozeanischen Rücken in Richtung der Kontinente aus (Pfeile). Dadurch drängt die so verstärkte ozeanische Kruste die beiden Kontinente langsam auseinander. In der Kammregion des Rückens besteht der Meeresgrund vorrangig aus magmatischem Gestein. Mit wachsender Entfernung vom Rücken überlagert sich diesem Gestein eine zunehmend dicker werdende Sedimentschicht. Gestaltet in Anlehnung an *Sclater und Tapscott [1987]*.

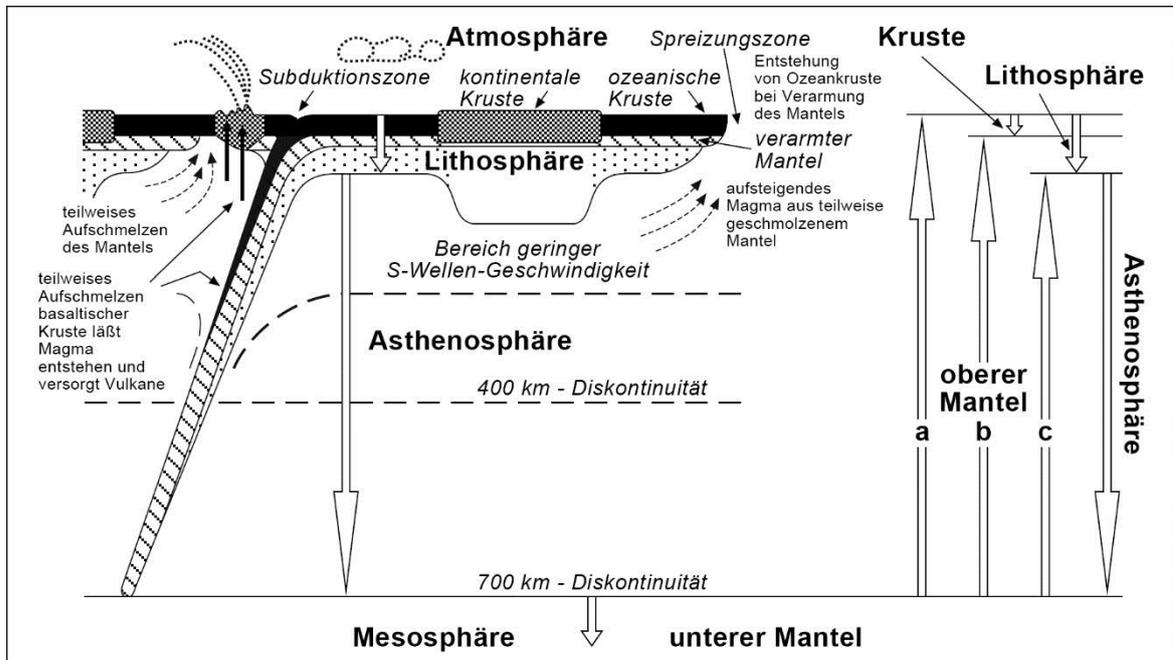


Bild 3: Übersicht über den Zusammenhang der im Text beschriebenen unterschiedlichen Gliederungen des Erdinneren im Bereich des oberen Mantels. Die unterschiedlichen Definitionen des Begriffes oberer Mantel sind durch a, b und c gekennzeichnet. Gestaltet nach Daten aus *Strobach [1991]*, *Powell [1991]*, *Pichler [1988]*, *Dewey [1987]*, *Bartels et al. [1960]*, *Haalck [1954]* u.a..

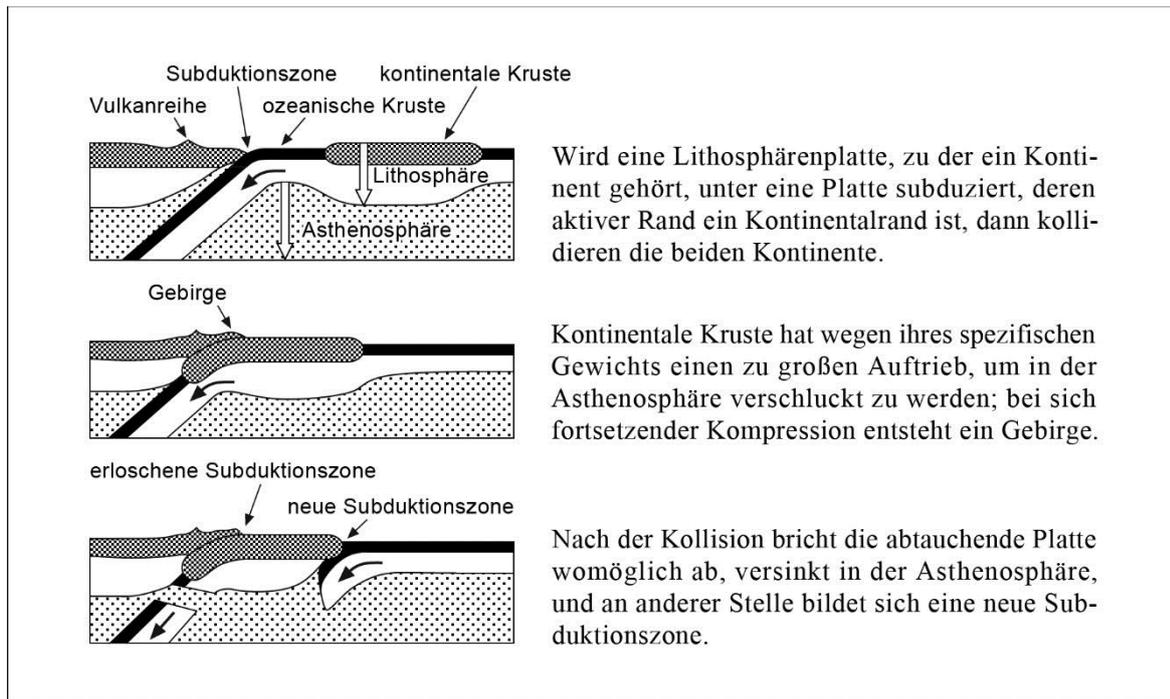


Bild 4: Kontinente und Subduktion, Gebirgsbildung. Gestaltet in Anlehnung an Dewey [1987].

2. Gliederung des Erdinneren nach den Ergebnissen seismischer Fernerkundungsverfahren

Unsere Kenntnisse über die Gliederung des Erdinneren beruhen im wesentlichen auf den Ergebnissen seismischer Fernerkundungsverfahren (Benennung nach Fuchs [1987]). In bestimmten Tiefen ändert sich der Geschwindigkeitsverlauf von Erdbebenwellen sprunghaft (Bild 5). Als Ursache dafür werden entsprechende sprunghafte Zustandsänderungen des Erdinneren angenommen. Die aus den Ergebnissen seismischer Fernerkundungsverfahren abgeleiteten Dichteunterschiede in der äußeren Gesteinsschicht der Erde waren Veranlassung, diese zu gliedern in die weniger dichte *Erdkruste* und den darunter liegenden, dichteren oberen Erdkernmantel. Vom mechanischen Verhalten und der Fließfähigkeit dieser Gesteinsschicht her erfolgte aus rheologischer Sicht inzwischen eine weitere Gliederung dieses Bereiches in *Lithosphäre* und *Asthenosphäre*. Nach Dewey [1987] zeigen mehrere Untersuchungen, daß an einer bestimmten Fläche die S-Wellen-Geschwindigkeit plötzlich abnimmt; sie liegt unter Kontinenten und Ozeanen unterschiedlich tief. Diese Meßergebnisse ließen darauf schließen, daß die Erde eine spröde äußere Schale von etwa 70-150 km Dicke habe: die *Lithosphäre*. Ihr unterliegt eine wärmere und weichere Schicht: die *Asthenosphäre*, in der die S-Wellen-Geschwindigkeit wieder zu-

nimmt, besonders stark im Bereich zwischen 350-450 km Tiefe und kurz vor 700 km Tiefe.

Als Synonym für die Benennung *Lithosphäre* wird gelegentlich auch die Benennung *Erdrinde* verwendet [Berckhemer, 1981]. Ebenso wie beim Begriff oberer Mantel bestehen auch beim Begriff

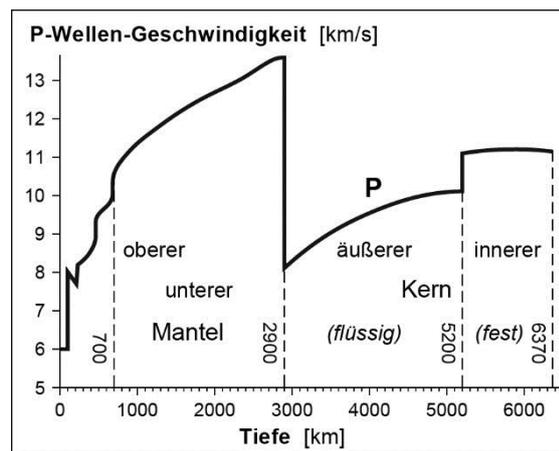


Bild 5: Gliederung der Erde nach den Sprüngen der Geschwindigkeit der P-Wellen im Erdinneren.

Der Geschwindigkeitsverlauf wurde berechnet aus den gemessenen Laufzeiten der P-Wellen zahlreicher Erdbeben.

Quelle: Daten der P-Linie aus Strobach [1991].

Asthenosphäre unterschiedliche Definitionen bezüglich der Tiefengliederung. Die in Bild 3 enthaltenen Angaben kennzeichnen die unterschiedlichen Definitionen.

3. Direkte Zugänge zum Erdinneren

Der Mensch nutzt zahlreiche Stoffe der Erde, die mehr oder weniger tief unter der Geländeoberfläche lagern. Wenn ein bestimmter Stoff in einem geographisch begrenzten räumlichen Bereich in größerer Menge (in größerer Anreicherung) vorkommt, spricht man von einer »Lagerstatt« des betreffenden Stoffes. Liegen Lagerstätten in diesem Sinne relativ dicht unter der Geländeoberfläche, ist die Stoffgewinnung durch Bergbau meist im »Tagebau« möglich, bei tieferliegenden Lagerstätten erfolgt die Stoffgewinnung entweder im »Untertagebau« oder durch *Bohrung* in die anstehende Erdkruste (die Begriffe (Über-) Tagebau und Untertagebau beziehen sich dabei auf den *Landbergbau*, nicht auf den *Meesbergbau*). Die direkt gewonnenen Stoffe (»Rohstoffe«) werden anschließend in der Regel »veredelt«, d. h. sie werden in andere Formen umgewandelt, die in der Sicht des Menschen als höherwertig gelten. Für den Menschen (derzeit) lebenswichtige Umwandlungen sind beispielsweise die Umwandlung fossiler Brennstoffe (Braunkohle, Steinkohle, Erdöl, Erdgas, Ölschiefer, Teersande) oder Kernbrennstoffe (Uran, Thorium) in Energie. Aber auch Umwandlungen bis hin zu künstlerischen Dimensionen sind zu vermerken, wie etwa die Umwandlung von Rohdiamanten in geschliffene Diamanten, die als Schmuck- oder Kunstgegenstände im allgemeinen hochgeschätzt sind. Die letztgenannte Interessenslage führte bekanntlich zum größten von Menschenhand ausgeschauften Loch in der Erdkruste: das »Big Hole« der Kimberley Mine in Südafrika. In den Jahren nach 1871 begonnen, hatte dieser trichterförmige Tagebau bei der Stilllegung 1914 einen Oberflächendurchmesser von rund 450 m und eine Tiefe von 400 m [Bauer, 1989]. Die erdweit größte Schachttiefe im Untertagebau (Kupferförderung) betrug zu jener Zeit jedoch bereits über 1500 m [Meyer, 1902-1912]. Um 1986 war in Südafrika als *größte Schachttiefe* im Untertagebau (Goldförderung) rund der doppelte vorgenannte Betrag erreicht worden (2949 m). Die bisher bekannte *tieftste Höhle* der Erde liegt in den Westalpen (1535 m), die zweittiefste befindet sich im Kaukasus (1370 m).

Bohrungen in die Erdkruste werden (abgesehen von denen, die zur Einrichtung von Bergwerken dienen) sowohl zur *Verifizierung* von Prospektions-

ergebnissen, als auch zur *Förderung*, etwa von Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas), durchgeführt. Man spricht von einer *Tiefenbohrung*, wenn die Tiefe unter der Geländeoberfläche > 5 km ist. Ist die Tiefe > 8 km, nennt man die Bohrung gelegentlich auch ultratiefe Bohrung [Soffel, 1993, u. a.]. Da die so definierte »Tiefe« nach Bild 6 einen Höhenanteil einschließt, wird sie (wie im Bergbau vielfach üblich) auch als *Teufe* bezeichnet. Es ist leicht einsehbar, daß die technischen Anforderungen (und damit auch die Kosten) mit zunehmender Tiefe exponentiell wachsen [DFG, 1981], so daß die Unterscheidung zwischen Tiefe und Teufe in dieser Hinsicht Bedeutung hat. Auch Tiefenbohrungen werden seit langem durchgeführt. In Deutschland (West und Ost) wurden im Zeitraum 1960-1980 etwa 13 Tiefenbohrungen (Teufe > 5 km) niedergebracht [DFG, 1981]. Von den diesbezüglichen Aktivitäten in den anderen europäischen Staaten ist besonders die Tiefenbohrung bei Zaplarny auf der Halbinsel Kola (Rußland) bekannt geworden, bei der 1983 erstmals eine Teufe von etwa 12 km erreicht wurde. Die Bohrung steht allerdings in einem sehr alten und ausgekühlten Teil der europäischen kontinentalen Kruste, in dem pro km die Temperatur nur um etwas weniger als 20°C zunimmt; bei einer Tiefe von 12 km liegen die Temperaturen dort bei knapp 250°C [Soffel, 1993]. Die erdweiten Bohraktivitäten sind kaum überschaubar, beispielsweise wurden in den USA im Jahre 1979 mehr als 60 Bohrungen im Teufenbereich zwischen 6-9 km niedergebracht [DFG, 1981]. Die vorstehenden Ausführungen lassen anklingen, daß die meisten bisher durchgeführten Bohrungen auf den Kontinenten und in deren Randgebieten (Schelfe) vorrangig *wirtschaftlich* ausgerichtet waren. Sie liegen daher überwiegend in Sedimentbecken (mit vorrangig jungen, relativ kalten Füllungen) und wurden nicht oder nur lückenhaft gekernt. (Das »Kernen«, den elektrischen Widerstand der Schichten eines Bohrloches messen u. a., ist kostenaufwendig.) Nach Auffassung mancher Wissenschaftler erbrachten sie daher in der Regel nur relativ wenige Informationen zu bestimmten wissenschaftlichen Fragestellungen.

Wie zuvor bereits angesprochen, ermöglichen Bohrungen eine Verifizierung von Prospektionsergebnissen, sie ermöglichen aber auch eine *Verifizierung* der mit Hilfe seismischer Fernerkundungsverfahren über den Bereich der Erdkruste erhaltenen Meßergebnissen. Im Gegensatz zu diesen indirekten Informationen der Fernerkundung liefern Tiefenbohrungen direkte Informationen über den in-vivo-Zustand der Kruste und die gegenwärtig in ihr ablaufenden Prozesse, wobei als Informationsquelle vor allem dienen: das Bohrloch selbst und die aus dem

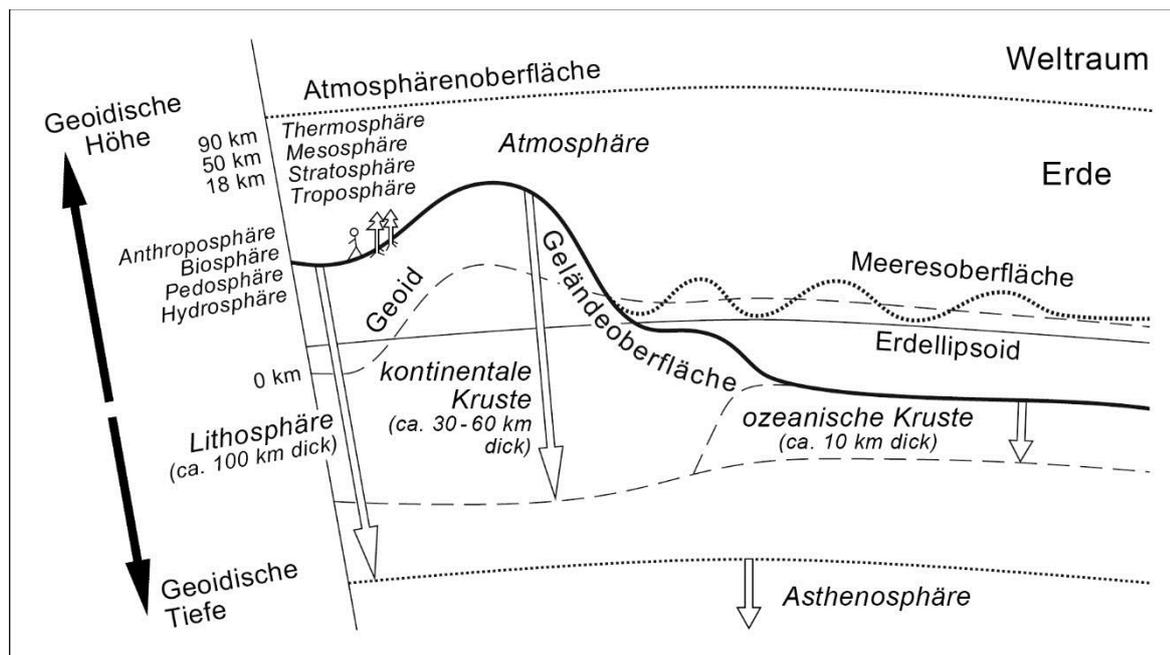


Bild 6: Schemadarstellung der Gliederung der Erde über der Asthenosphäre

Bohrloch gewonnenen Informationsträger, wie Bohrkern, Bohrspülung und die darin enthaltenen Gase u. a.. Diese Beobachtungsergebnisse (in der Regel Meßergebnisse) sind nicht ersetzbar etwa durch entsprechende Beobachtungen an gleichen Gesteinsarten, die an der Geländeoberfläche anstehen, denn diese sind geologisch »tot« [Soffel, 1993], da sie sich in einem anderen Zustand und in einer anderen Umgebung befinden als in der Tiefe, also vor Ort (in-situ oder auch in-vivo).

4. Erkundung und Erforschung der ozeanischen Kruste in der Tiefsee mittels Bohrungen

Die global ausgerichtete Forschung begann 1968. Die Initiative ging von den USA aus. Hier gründeten einige universitäre und außeruniversitäre Institutionen 1964 eine Organisation »Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling« (JOIDES) zur systematischen Erkundung und Erforschung der ozeanischen Kruste in der Tiefsee und beschlossen die Durchführung eines »Deep Sea Drilling Project« (DSDP). 1968 begannen die Bohrungen mit dem Bohrschiff »Glomar Challenger«. Mit der Bohreinrichtung dieses Schiffes konnte erstmals im Tiefseeboden gebohrt werden. Im Zeitraum von 1968-1978 wurden etwa 700 global verteilte Bohrungen in Wassertiefen bis über 7 km niedergebracht, 22 davon drangen tiefer als 1 km in den Meeresboden ein. Die tiefste Bohrung erreichte

eine Tiefe von 1,74 km [DFG, 1979]. Nach 1974 traten, neben einigen weiteren Institutionen der USA, auch Institutionen aus der Bundesrepublik Deutschland (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover), Frankreich, Japan, Großbritannien und der UdSSR dieser Organisation bei; das DSDP wurde damit zu einem internationalen geowissenschaftlichen Forschungsprogramm.

1983 endeten die Bohrungen mit der »Glomar Challenger«. Im gleichen Jahr wurde ein neues Programm initiiert unter der Bezeichnung »Ocean Drilling Program« (ODP), an dem sich 1991 bereits Institutionen aus 18 Staaten (zum Teil in Form von Konsortien) beteiligten. Die Bohrungen zu diesem Programm begannen 1985, nunmehr mit dem zu größeren Leistungen fähigen Bohrschiff »Joides Resolution«, das einen 61 m hohen Bohrturm hat; mit dem maximalen Bohrgestänge von 9,15 km Länge kann in Wassertiefen bis zu 8,2 km gebohrt werden. Die erste Phase dieses internationalen Programms endete 1993 (Finanzierungsauslauf). Die Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft hat in einer Dokumentation [DFG, 1991] die bisherigen Ergebnisse bewertet und befürwortete eine weitere Beteiligung Deutschlands an diesem internationalen geowissenschaftlichen Programm; dafür hat sich auch der Senat der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgesprochen: zunächst für den Zeitraum 1993-1998, gegebenenfalls auch bis 2003 [DFG Jahresbericht, 1992].

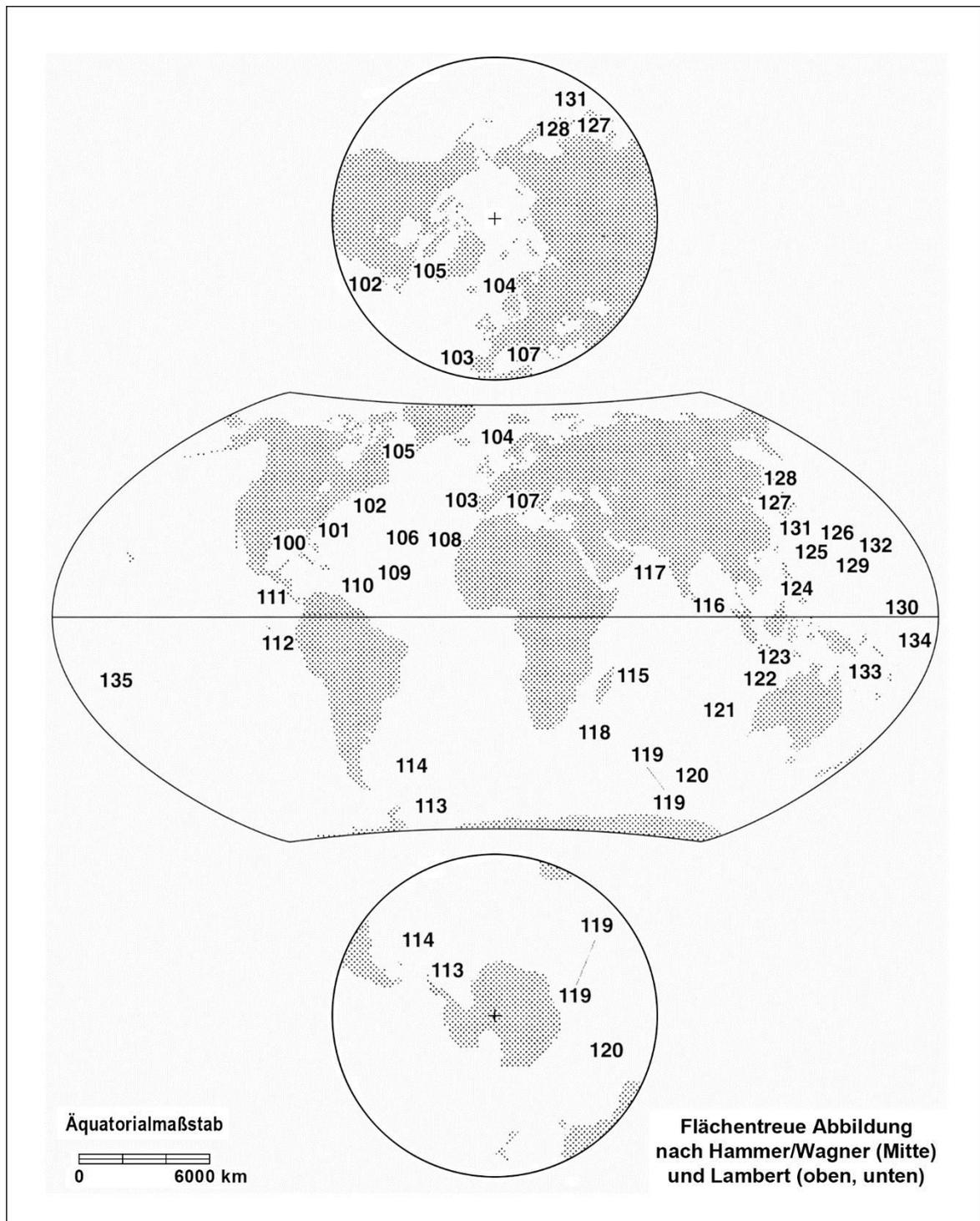


Bild 7: Die Nummern 100-130 kennzeichnen Gebiete, in denen im Rahmen des ODP Bohrungen in die ozeanische Kruste durchgeführt wurden. Die Nummern 131-135 kennzeichnen Gebiete, in denen Bohrungen geplant sind (Stand 1990). Quelle: DFG [1991].

4.1 Bisherige wissenschaftliche Ergebnisse des ODP

Als allgemeines *Ziel* des ODP wird von Beiersdorf (dem Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms »ODP/DSPD«) genannt: es sollen vor allem durch gezielte Bohrungen in die Tiefseeböden Gesteine und Lockersedimente gewonnen werden, die Aufschluß über die Entwicklung der Ozeane und Kontinente sowie über die Bildung der im Laufe der Jahrtausende auf dem Meeresboden abgelagerten Stoffe geben. Untersucht werden soll unter anderem, wie die neue Erdkruste in den Kammregionen der erdumspannenden mittelozeanischen Rücken entsteht und was sich geologisch in den Tiefseegräben vollzieht, in denen heute Erdkruste wieder »verschluckt« wird [DFG Jahresbericht, 1992]. Die bisherigen wichtigsten wissenschaftlichen *Ergebnisse* aus den Bohrfahrten 100-128 der »Joides Resolution« (siehe Bild 7) lassen sich, basierend auf den Ausführungen von Beiersdorf und im Hinblick auf das hier anstehende Thema, wie folgt zusammenfassen [DFG, 1991]:

Es wurden neue Erkenntnisse gewonnen:

- Über die *Vereisungsgeschichte* der Erde, insbesondere über den Beginn der pleistozänen Vereisung in den hohen nördlichen und südlichen geographischen Breiten.
Große Eismassen beeinflussen vorrangig: die Albedo; die Höhenlage der Geländeoberfläche über dem Geoid; die Wasserzirkulation im Meer, besonders die Bodenwasser- und die Oberflächenwasserzirkulation; den Temperaturgradienten der Erde ...
- Über die *Geschichte der Monsunzirkulation*, besonders im nördlichen Indik, und deren Abhängigkeit von Änderungen der Sonneneinstrahlung (die ihrerseits abhängig ist von Änderungen der Erdrotation und der Erdumlaufbahn um die Sonne) und von der Entwicklung des Himalaya (etwa dessen Vergletscherung und der davon abhängigen Albedo), sowie über die *Geschichte des Staubfluges aus der Sahara*.
- Über die *Entstehung und Entwicklung der ozeanischen Kruste* (geochemische Entwicklung, Wechselwirkung zwischen heißem Krustengestein und kaltem Meerwasser, Alterationsgeschichte der ozeanischen Kruste, Magmententstehung, Krustenakkretion, hydrothermale Zirkulation).
- *Erstmals* wurden mit einer am Bohrstrang befestigten Fernsehkamera am Mittelatlantischen Rücken »schwarze Raucher« (»black smoker«), auch »schwarze Schornsteine« genannt, aus Kupfer-, Zink- und Eisensulfiden lokalisiert.

- Über *Fluide* in Verschuppungskomplexen aktiver Kontinentalränder.

Fluide Stoffe bewirken oder beschleunigen den Transport von Materie oder Energie; sie sind an allen stofflichen Prozessen in der Lithosphäre beteiligt. Fluide »schmieren« die Gleitbahnen der Subduktion und Verschuppung; sie entziehen den subduzierten Sedimenten und der ozeanischen Kruste Stoffe, die, unter anderem, am Meeresboden aus Quellen dem Meerwasser zugeführt werden und die Meerwasserzusammensetzung vermutlich ebenso stark beeinflussen wie die Hydrothermen der mittelozeanischen Rücken. Fluide in den Sedimenten von aktiven Kontinentalrändern können bedeutend weniger salzhaltig sein als Fluide in pelagischen oder hemipelagischen Sedimenten.

- Über plattentektonische Vorgänge, insbesondere bei der *Inselbogenentwicklung*.

Erstmals wurde die vulkanische Unterlage eines intraozeanischen Beckens, eines sogenannten »Forearc«-Beckens, im Bereich der Bonin-Inseln im Pazifik erbohrt. Dieses vulkanische Grundgebirge wurde in 29 Mio. Jahren um 1-2 km angehoben; 200 Aschenlagen seit dem Pliozän deuten auf vielfachen explosiven Vulkanismus hin.

- Über die *Entstehung von Celebes- und Sulusee*.

Bemerkenswert ist der hohe Temperaturgradient der Sulu-Kruste mit $>100^{\circ}\text{C}/\text{km}$; er trägt zur Entstehung thermogenetischer Kohlenwasserstoffe in geringer Tiefe unter dem Meeresboden bei.

Als Haupterkennnis hat sich nach Beiersdorf ergeben, daß die Ozeanböden ein wesentlicher Teil des Systems Erde sind, in dem Atmosphäre, Biosphäre, Ozeane, Sedimenthülle, Erdkruste und Erdkernmantel in enger Wechselbeziehung zueinander stehen. Die zeitliche Auflösung der Erdgeschichte auf 100 Jahre genau weit in das Tertiär hinein sei keine Utopie mehr.

4.2 Künftige Forschungsziele des ODP

Als künftige Ziele bis zum Jahre 2003 werden genannt:

Gewinnen von Erkenntnissen über

- *Struktur und Zusammensetzung von ozeanischer Kruste und oberem Mantel:*

Erbohren der Mohorovicic-Diskontinuität unter der ozeanischen Kruste, magmatische Prozesse beim Aufbau der ozeanischen Kruste, Intraplatten-Vulkanismus, Magmatismus und geochemische Flüsse an konvergierenden Plattenrändern.

- *Dynamik, Kinematik und Deformation der Lithosphäre:*
Dynamik der ozeanischen Kruste und des oberen Mantels, Plattenbewegungen, Deformationsprozesse an passiven Kontinentalrändern und an konvergierenden Plattenrändern, Intraplatten-Deformation.
- *Fluidzirkulation in der Lithosphäre:*
Hydrothermale Prozesse bei Krustenneubildung, Fluidtransporte an passiven Kontinental- und konvergierenden Plattenrändern.
- *Ursachen und Auswirkungen der ozeanischen und klimatischen Veränderungen:*
Kurzzeitige und langzeitige Klimaschwankungen, Geschichte des Meeresspiegels, Kohlenstoffkreislauf und biologische Paläoproduktivität, Entwicklung der Lebewelt.

5. Erkundung und Erforschung der kontinentalen Kruste mittels Tiefbohrungen

Auf Vorschlag der Internationalen Union für Geologische Wissenschaften (IUGS) und der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) hatte 1980 das »International Council of Scientific Unions« (ICSU) das *Internationale Lithosphären Programm* (ILP) beschlossen und in diesem Zusammenhang zwei Koordinierungskomitees eingerichtet:

- a) »Structure and Composition of the Lithosphere and Atmosphere«,
- b) »Continental Drilling« [DFG, 1985].

Im letztgenannten Komitee hat man begonnen, Ziele und Durchführungsmöglichkeiten eines *Internationalen Kontinentalen Tiefbohrprogramms* zu erörtern [Denkschrift, 1991].

5.1 Deutschlands Kontinentales Tiefbohrprogramm

1977 begann die Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft eine Studie über ein kontinentales Tiefbohrprogramm, die 1981 vorgelegt wurde [DFG, 1981]. Nach der 1986 getroffenen Lokationsentscheidung begann 1987 in der Oberpfalz in Bayern bei Windischeschenbach eine Vorbohrung bis zu einer Tiefe von 4 km. 1990 wurde in ca. 200 m Entfernung von der Vorbohrung mit der Hauptbohrung begonnen, die Ende 1992 eine Teufe von ca. 7 km erreicht hatte. Das Programm in seiner derzeitigen Konzeption soll Ende 1994 (mit einer Endteufe von ca. 10 km) abgeschlossen

werden (Finanzierungsauslauf); eine Vertiefung der Bohrung bis ca. 12 km wird erörtert [Soffel, 1993].

Forschungsziele des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB):

Sie sind dargestellt in DFG [1981], DFG [1985], Fuchs [1987], DFG Jahresbericht [1992], Soffel [1993] u. a..

Nach Fuchs ist das Ziel nicht das Streben nach einem absoluten Tiefenrekord, sondern die sorgfältige Auswahl eines Bündels von Schlüsselproblemen. Die Koordinatoren des DFG-Schwerpunktprogramms »KTB« nennen im *DFG Jahresbericht* [1992] als Hauptziele:

- Die Erfassung der Ursachen und der in-situ-Bedingungen geophysikalischer Strukturen und Heterogenitäten sowie der Temperatur- und Druckabhängigkeit physikalischer Eigenschaften und Meßgrößen von Gesteinen, insbesondere der seismischen Wellengeschwindigkeiten, des elektrischen Widerstandes, der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit, des Spannungszustandes und des Magnetismus.
- Die Ermittlung des heutigen und früheren physikalischen und chemischen Zustandes der tieferen kontinentalen Kruste durch Messungen und Experimente unter in-situ-Bedingungen.
- Die Erforschung der Fluidsysteme, Fluidquellen und Fluidbewegungen in der tieferen Kruste sowie ihres Einflusses auf Stofftransport, Metamorphose, Magmenbildung, physikalische Gesteinseigenschaften, Rheologie und Krustendynamik.
- Die Erforschung von Struktur und Dynamik der Erdkruste sowie die Analyse der tektonischen Krustenevolution.
- Die Kenntniserweiterung über Spannungen in der Kruste, ihre Tiefenverteilung, ihre Speicherung und ihre Umwandlung.
- Die Einrichtung eines Tiefenlabors und Observatoriums.

5.2 Ausblick

Einige Geowissenschaftler betrachten das deutsche Tiefbohrprogramm KTB als einen Einstieg in eine global ausgerichtete Erkundung und Erforschung der kontinentalen Kruste mittels Tiefbohrungen. Das eingangs angesprochene, aber noch nicht abschließend formulierte und organisierte Internationale Kontinentale Tiefbohrprogramm (als Teil des Internationalen Lithosphären Programmes) könnte in diesem Sinne ausgerichtet werden und im Anschluß an das KTB anlaufen, etwa in der Organi-

sationsform des zuvor dargestellten ODP [Denkschrift, 1991; Soffel, 1993].

Literatur

- Bartels, J. et al. [1960]:* Geophysik. Das Fischer-Lexikon, Band 20. Fischer Bücherei, Frankfurt/Main, 372 S.
- Bauer, E. W. [1989]:* Wunder der Erde: Feuer und Wasser. Verlag Hoffmann und Campe, Hamburg, 218 S.
- Berckheimer, H. [1981]:* Die Entwicklung der Erdrinde. – In: Wachstum und Entwicklung. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Hamburg, vom 21.-25. September 1980. Verhandlungen 111 der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York
- Denkschrift [1991]:* Zukunftsaufgaben der Lithosphärenforschung. Geowissenschaftliche Grundlagenforschung in Deutschland
- Dewey, J. F. [1987]:* Plattentektonik. Spektrum der Wissenschaft, Schwerpunktheft »Ozeane und Kontinente«, Heidelberg
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) [1981]:* Geowissenschaften. Mitteilung 11 der Kommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, Verlag Boldt, Boppard
- DFG [1985]:* Geowissenschaften. Mitteilung 14 der Kommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, Verlag Chemie, Weinheim, 168 S.
- DFG [1991]:* Mit wissenschaftlichen Tiefseebohrungen ins nächste Jahrhundert. Mitteilung 20 der Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, Verlag Chemie, Weinheim, 116 S.
- DFG Jahresbericht [1992]:* Jahresbericht 1992, Band 1 und 2. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn
- Fuchs, K. [1987]:* Tiefbohrungen in die Erdkruste als direkter Vorstoß in die physikalische Grenzschicht der festen Erde. – In: *Lüst, R. (Hrsg.):* Beobachtung, Experiment und Theorie in Naturwissenschaft und Medizin. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, München, 13.-16. September 1986. Verhandlungen 114 der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- Haalck, H. [1954]:* Physik des Erdinnern. Geest & Portig, Leipzig, 183 S.
- Meyer, H. J. [1902-1912]:* Meyer's Großes Konversations-Lexikon in 23 Bänden. 6. Auflage, Bibliographisches Institut, Leipzig/Wien
- Pichler, H. [1988]:* Einführung in das Schwerpunktheft »Vulkanismus«. Spektrum der Wissenschaft, Schwerpunktheft »Vulkanismus«, Heidelberg
- Powell, C. S. [1991]:* Innenansichten der Erde. Spektrum der Wissenschaft, Heft 8/1991, Heidelberg, S. 72-82
- Slater, J. G., Tapscott, C. [1987]:* Die Geschichte des Atlantik. Spektrum der Wissenschaft, Schwerpunktheft »Ozeane und Kontinente«, Heidelberg
- Soffel, H. [1993]:* Deutschlands Kontinentales Tiefbohrprogramm. – In: *Wilke, G. (Hrsg.):* Horizonte: wie weit reicht unsere Kenntnis heute? Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Aachen, 19.-22. September 1992. Verhandlungen 117 der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Hirzel/Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- Strobach, K. [1991]:* Unser Planet Erde: Ursprung und Dynamik. Gebr. Bornträger, Berlin/Stuttgart, 253 S.

GPS-gestützte Aerotriangulation – Funktionalmodelle in Tensorschreibweise

Zusammenfassung

Die kinematische GPS-Positionierung ermöglicht die exzentrische Bestimmung der Aufnahmeorte während eines Bildfluges. Diese mittels GPS bestimmten Positionen können in eine erweiterte Bündelblockausgleichung einbezogen werden. Es werden unterschiedliche funktionale Ansätze für die simultane Ausgleichung von photogrammetrischen Blöcken und GPS-Positionsdaten beschrieben. Die Verwendung der Tensorschreibweise ermöglicht eine kurze und klare Darstellung.

Summary

Kinematic GPS-positioning enables the excentric determination of the camera positions during a photoflight. This paper briefly describes some mathematical models for integration of GPS-derived coordinates of the perspective centers in bundle triangulation. For presentation, tensor notation is used because of its special advantage of facilitating a clear and short formulation.

1. Einleitung

Für die Aerotriangulation stellt die räumliche Positionierung der Kamera während des Bildfluges ein effektives Instrument zur Paßpunktreduktion dar. Mehrere praktische Versuche haben dies bestätigt (u.a. Friess und Heuchel [1992], Schwiertz und Dorrer [1992]). Darüber hinaus konnte durch die Befliegung und Auswertung genauer photogrammetrischer Blöcke das hohe Genauigkeitspotential der differentiellen kinematischen GPS-Positionsbestimmung nachgewiesen werden (z.B. Baustert et al. [1989], Dorrer und Schwiertz [1990], Firess [1990]).

Durch die kinematische Positionierung erhält man nicht unmittelbar die Aufnahmeorte der Kamera zu den Aufnahmezeitpunkten. Vielmehr werden unabhängig von der Auslösung der Kamera kontinuierlich die Positionen der GPS-Antenne bestimmt. Aus diesen lassen sich durch Interpolation auf den Aufnahmezeitpunkt und durch Berücksich-

tigung der räumlichen Beziehung zwischen Kamera und Antenne die jeweiligen Aufnahmeorte ableiten. Die GPS-Positionen können in eine erweiterte Bündelblockausgleichung einbezogen werden. Dabei ist den auftretenden Besonderheiten wie Exzentrizität, Datumsunterschiede oder systematischen Fehlern in den GPS-Daten durch entsprechende funktionale Ansätze Rechnung zu tragen.

In diesem Artikel werden verschiedene mathematische Modelle beschrieben, die die gemeinsame Ausgleichung der photogrammetrischen und der GPS-Daten ermöglichen. Für die Darstellung der mathematischen Beziehungen wird die Tensorschreibweise¹ verwendet. Sie ermöglicht eine übersichtliche und kompakte Darstellung der Zusammenhänge [Dorrer, 1980].

2. Bündelblockausgleichung

Der funktionale Zusammenhang zwischen den Objektpunkten und den Bildpunkten wird im mathematischen Modell der Bündelblockausgleichung durch die Parameter der inneren und äußeren Orientierung beschrieben. Zusätzlich werden Bildfehler beschreibende Funktionen berücksichtigt, um Abweichungen von der Zentralprojektion zu erfassen.

$${}^P x_i = e_{ij,M}^P \begin{bmatrix} M \\ x_j - x_{j,0} \end{bmatrix} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad [1]$$

$$b_i^B + \delta b_i^B = \frac{-c}{x_3} x_i^P \quad i = 1, 2 \quad [2]$$

- S_M Modellkoordinatensystem der Aerotriangulation
- S_B Bildkoordinatensystem
- S_P S_M verschoben ins Projektionszentrum, parallel gedreht zu S_B

¹ Bezüglich der Bezeichnungsweise sei auf Heitz [1980] verwiesen.

Indexvereinbarung: Koordinaten und Vektoren werden durch einen Buchstaben mit einem Index und einem dahinter stehenden Punkt bezeichnet (x_i). Ein Buchstabenindex vor dem Punkt steht stellvertretend für die drei möglichen Koordinatenindizes, ein Ziffernindex vor dem Punkt bezeichnet eine spezielle Koordinate. Der Buchstabenindex nach dem Punkt kennzeichnet einen speziellen Ortsvektor, z.B. zum Punkt K ($x_{i,K}$).

X_j^M, X_i^P	Objektkoordinaten im System S_M bzw. S_P
$X_{j,0}^M$	Koordinaten des Projektionszentrums in S_M
b_i^B	Bildkoordinaten
δb_i^B	Bildfehler beschreibende Funktionen
c	Kammerkonstante
e_{ij}^P	Drehmatrix, um S_M in parallele Lage zu S_P zu überführen
i, j	Summationsindex; $i, j = 1, 2, 3$, soweit nichts anderes vereinbart.

3. Besonderheiten

3.1 Exzentrizität Aufnahmekammer – Antenne

Die mittels GPS bestimmten Positionen des Phasenzentrums der Antenne zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt $X_{i,A}^M$ und die Aufnahmeorte $X_{i,0}^M$ unterscheiden sich durch eine räumliche Exzentrizität $\Gamma_{i,A}^M$ [Schwiertz und Dorrer, 1991].

$$X_{i,A}^M - X_{i,0}^M = \Gamma_{i,A}^M \quad [3]$$

Diese Exzentrizität verändert ihre Lage relativ zum Geländekoordinatensystem in Abhängigkeit von den Rotationen des Flugzeugs und den Rotationen der Kamera relativ zum Flugzeug. In Bezug auf das Bildkoordinatensystem S_B kann diese Exzentrizität als konstant angesehen werden, vorausgesetzt, daß die Stellung der Kamera relativ zum Flugzeug nicht geändert wird. Es gilt die Beziehung:

$$X_{i,A}^M - X_{i,0}^M = e_{ij,B}^M \Gamma_{j,A}^B \quad [4]$$

Die Drehmatrix $e_{ij,B}^M$ überführt das Bildkoordinatensystem S_B in eine zum Geländekoordinatensystem S_M parallele Lage. Die Winkel (ω, ϕ, κ) zur Berechnung dieser Drehmatrix werden im Zuge der Bündelausgleichung für jedes Bild ermittelt.

Bei der Verwendung kreiselstabilisierter Kamertypen – z. B. RMK TOP von Zeiss [Lorch, 1991] – ändert die Antenne, die fest mit dem Flugzeugrumpf verbunden ist, kontinuierlich ihre Lage zum Bildkoordinatensystem. Dies hat zur Folge, daß man im Extremfall für jeden Aufnahmezeitpunkt

die in einer Kalibrierung vorab bestimmte Exzentrizität korrigieren muß. Bezeichnet man mit B_0 das Bildkoordinatensystem in Nullstellung und mit B_k das Bildkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_k , so gilt die Beziehung

$$\Gamma_{i,A}^{B_k} = e_{ji,B_0}^{B_k} \Gamma_{j,A}^{B_0} \quad [5]$$

3.2 Datumsproblem

Die Ergebnisse der Aerotriangulation beziehen sich auf ein speziell gewähltes, lokales Koordinatensystem oder auf ein Landes-Referenzsystem. Der Bezug zu diesen Systemen wird in der Bündelausgleichung durch die eingeführten terrestrischen Paßpunkte hergestellt.

Im Gegensatz dazu beziehen sich die Koordinaten der GPS-Positionsbestimmung auf das aktuelle, durch die momentane Satellitenkonstellation realisiertes Bezugssystem WGS-84. Durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation wird der Übergang zwischen diesen unterschiedlichen Systemen hergestellt.

$$X_{i,A}^M = X_{i,G}^M + \lambda \cdot e_{ij,G}^M X_{j,A}^G \quad [6]$$

S_G	Bezugssystem der GPS-Positionsbestimmung
$X_{j,A}^G, X_{j,A}^M$	Antennenkoordinaten im System S_G bzw. S_M
$X_{i,G}^M$	Ursprung von S_G in S_M
$e_{ij,G}^M$	Drehmatrix von S_G nach S_M
λ	Maßstabsfaktor

3.3 GPS-Positionierungsfehler

Die Positionierung der Luftbildkamera erfolgt auf der Basis der differentiellen GPS-Phasenmessung im kinematischen Modus. Wesentliches Problem hierbei ist die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten. Empirische Untersuchungen haben gezeigt, daß die GPS-Positionierung schon durch kleine Fehler in der Mehrdeutigkeitsbestimmung systematisch verfälscht werden kann, wobei diese systematischen Fehler in erster Näherung linear erscheinen [Friess, 1990]. Dieses Problem wird dadurch verschärft, daß nach Kurvenflügen Signalunterbrechungen nicht auszuschließen sind und die Mehrdeutigkeiten danach neu bestimmt werden müssen, was eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt.

4. Erweitertes Funktionalmodell zur kombinierten Bündelausgleichung mit GPS

Das mathematische Modell der Bündelmethode in [1] ist so zu modifizieren, daß anstelle des Projektionszentrums das Phasenzentrum der Antenne berücksichtigt werden kann [Dorrer, 1988].

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^P &= \mathbf{e}_{ij,M}^P \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j^M \\ \mathbf{x}_{j,A}^M \end{bmatrix} + \mathbf{r}_{i,A}^P \\ i, j &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad [7]$$

Die Projektion in den Bildraum erfolgt gemäß [2]. Durch diesen Ansatz ist eine strenge Verknüpfung zwischen Antenne und Kamera gegeben. Unkontrollierte Lageveränderungen des Flugzeugs werden berücksichtigt, da die räumliche Lage der Exzentrizität als Funktion der Bildorientierung in die Bündelausgleichung eingeführt wird. $\mathbf{r}_{i,A}^P$ und $\mathbf{r}_{i,A}^B$ unterscheiden sich durch einen konstanten Betrag [Dorrer, 1988].

4.1 Zusätzliche Parameter im Objektraum

Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Modell ([7]) lassen sich die Antennenkoordinaten zum Aufnahmezeitpunkt auch als exzentrische Beobachtungen der Aufnahmeorte formulieren, wodurch der Ansatz der Bündelblockausgleichung ([1]) unverändert bleibt [Friess, 1990]. Zur Erfassung linearer Fehler in den GPS-Positionen und zur Berücksichtigung unterschiedlicher Bezugssysteme für die GPS-Positionen und das System der Aerotriangulation $S_G \neq S_M$ sind zusätzliche Parameter vorzusehen.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i,A}^G &= \mathbf{x}_{i,M}^G + \lambda \cdot \mathbf{e}_{ij,M}^G \cdot \left(\mathbf{x}_{i,0}^M + \mathbf{e}_{ij,P}^M \cdot \mathbf{r}_{i,A}^P \right) + \\ &+ \mathbf{p}_i^G + \mathbf{q}_i^G \cdot dt \end{aligned} \quad [8]$$

\mathbf{p}_i^G	konstante Korrekturparameter
\mathbf{q}_i^G	zeitvariable Koorekturparameter
dt	Zeitdifferenz
$\mathbf{x}_{i,M}^G$	Ursprung von S_M in S_G
$\mathbf{e}_{ij,M}^G$	Drehmatrix von S_M nach S_G

Die linearen Korrekturparameter und die Parameter der Ähnlichkeitstransformation werden als zusätzliche Unbekannte im Zuge der Ausgleichung

mitbestimmt. Dabei ist das Modell so ausgelegt, daß diese Parameter streifenweise, für mehrere Streifen gemeinsam oder blockweise angesetzt werden können. Durch die Modellierung linearer Fehleranteile in den GPS-Daten innerhalb der Bündelausgleichung kann gegebenenfalls eine näherungsweise Bestimmung der Mehrdeutigkeiten ausreichend sein. Ist keine exakte Bestimmung der Mehrdeutigkeiten erforderlich, so kann die Datenaufzeichnung auf die Flugstreifen selbst beschränkt werden und die Flugmanöver können ohne Restriktionen bezüglich des GPS-Einsatzes ausgeführt werden [Friess und Heuchel, 1992]. Voraussetzung ist, daß auftretende Fehler durch den linearen Ansatz hinreichend genau modelliert werden können. Die Verwendung von Polynomansätzen höheren Grades hat sich als ungünstig erwiesen [Bouloucos et al., 1992].

4.2 Zusätzliche Parameter im Bildraum

Konstante Unterschiede zwischen den GPS-Positionen einzelner Bildstreifen können durch zusätzliche Parameter im Bildraum kompensiert werden [Stückmann, 1990]. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß Fehler in den GPS-Positionen in der Regel bei einem Wechsel zwischen den einzelnen Flugstreifen auftreten, die Auswirkungen systematischer Einflüsse innerhalb eines Streifens jedoch zeitunabhängig sind.

$$\delta \mathbf{b}_i^B = m \cdot \mathbf{b}_i^B + \mathbf{t}_i^B \quad i = 1, 2 \quad [9]$$

Die Parameter ([9]) werden als zusätzliche Verbesserungen $(\delta \mathbf{b}_i^B)$ für die Bildkoordinaten im Ansatz [2] geschätzt; sie entsprechen in ihrer Wirkung einer Maßstabsänderung (m) und zwei Translationen $(\mathbf{t}_i^B = t_{i,1}, t_{i,2})$.

4.3 Helmert-Transformation mit linearer Veränderung der Parameter

Die in [8] eingeführten zusätzlichen Parameter lassen sich auch als Änderungen in den Transformationsparametern interpretieren [Dorrer und Schwiertz, 1990].

Liegen die Aufnahmeorte und die Geländepunkte in unterschiedlichen Systemen vor, d.h. $S_G \neq S_M$, so müssen die Aufnahmeorte mittels einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation an der Bündelausgleichung beteiligt werden. Das Modell der Ähnlichkeitstransformation wird nun dahin-

gehend modelliert, daß eine zeitliche Änderung der Transformationsparameter mitmodelliert wird. Die Aufnahmeorte in [7] sind durch den funktionalen Ansatz in [10] zu ersetzen.

$$x_{i,A}^M = x_{i,G}^M + \lambda \cdot e_{ij,G}^M x_{j,A}^G \quad [10]$$

$x_{i,G}^M$ Koordinaten des Ursprungs von S_G in S_M

$$x_{i,G}^M = x_{i,G}^M + \delta x_{i,G}^M \cdot dt$$

zeitliche Variation von $x_{i,G}^M$

$$e_{ij,G}^M = e_{ij,G}^M + \delta e_{ij,G}^M \cdot dt$$

zeitliche Variation von $e_{ij,G}^M$

4.4 Die Differenzmethode

Eine einfache Methode zur Verminderung des Einflusses systematischer Effekte in den GPS-Positionen stellt die Bildung der einfachen Koordinatendifferenzen zwischen den Antennenorten aufeinanderfolgender Aufnahmezeitpunkte k und $k+1$ dar [Li, 1992].

$$\Delta x_{i,A}^G = x_{i,A_{k+1}}^G - x_{i,A_k}^G \quad [11]$$

Li geht zur Ableitung der Koordinatendifferenzen von [8] aus und gelangt zu folgenden Koordinatendifferenzen:

$$\Delta x_{i,A}^G = x_{i,0_{k+1}}^G - x_{i,0_k}^G + \left(e_{ij,P_{k+1}}^G - e_{ij,P_k}^G \right) \cdot r_{i,A}^P + q_i^G \cdot (dt_{k+1} - dt_k) \quad [12]$$

Bei dieser Methode fallen die konstanten Fehlerterme p_i^G in [8] heraus und die linearen Anteile q_i^G werden in Abhängigkeit von der Zeit in ihrem Einfluß reduziert.

Eine paßpunktlose Aerotriangulation ist mit der Differenzmethode nicht möglich; es wird lediglich die relative Stützinformation der GPS-Positionen verwendet. Von den sieben freien Datumparametern der Bündelausgleichung kann nur über den Maßstab und die räumliche Orientierung verfügt werden. Der verbleibende Rangdefekt muß durch zusätzliche Verwendung von Paßpunkten beseitigt werden.

Bei instabiler Blockgeometrie ist die relative Stützinformation dieser Methode unzureichend. Die

Verwendung von mindestens vier Paßpunkten und die entsprechende Wahl des Befliegungsmusters ermöglichen einen sinnvollen und effektiven Einsatz dieser Methode. Darüber hinaus kann sich eine Kombination aus dem Ansatz in [8] und der Differenzmethode ([12]) als günstig erweisen. In diesem Fall werden z. B. nur diejenigen GPS-Positionen als direkte Beobachtungen verwendet, die zu den Eckbildern des Blockes gehören.

4.5 Mathematisches Modell mit Zeitansatz

Die für die Blockausgleichung benötigten Antennenpositionen lassen sich als Funktion der Aufnahmezeiten t_1 und der Koordinaten der Stützpunkte $x_{i,k+1}^G$ und $x_{i,k}^G$ formulieren.

$$x_{i,A_1}^G = f \left(x_{i,k+1}^G, x_{i,k}^G, t_1 \right) \quad [13]$$

GPS wird bei der Berechnung der GPS-Antennenpositionen zum Aufnahmezeitpunkt quasi als Black-Box-System verwendet. Die Positionen werden durch geeignete Interpolationsverfahren außerhalb der Bündelausgleichung ermittelt. Dagegen erfolgt die räumliche Zentrierung simultan mit der Bündelausgleichung durch Berücksichtigung der Antennenexzentrizität ([7]).

Bei der Interpolation auf den Aufnahmezeitpunkt wurde bisher unterstellt, daß er die Wirklichkeit genau wiedergibt. Praktische Versuche haben gezeigt, daß auch bei der Erfassung der Aufnahmezeit z. Z. noch zufällige oder systematische Effekte auftreten können [Jacobsen und Li, 1990; Dorrer und Schwiertz, 1990; Schwiertz und Dorrer, 1992]. Im Rahmen einer um die Aufnahmezeiten erweiterten Bündelausgleichung werden diese zu kontrollierbaren Beobachtungen. Insbesondere bei hochgenauen photogrammetrischen Blöcken bildet die Gesamtheit der Strahlenbündel, bedingt durch die starke Überdeckung der Bilder und die Vielzahl der Verknüpfungspunkte, ein in sich annähernd als starr zu bezeichnendes Gebilde, das in die registrierten Antennenpositionen, die wiederum einen sehr genauen Punkthaufen beschreiben, eingepaßt werden muß bzw. sich in einer Ausgleichung entsprechend in diesen einpaßt (Abb. 1).

Substituiert man in dem um die GPS-Positionen erweiterten photogrammetrischen Modell ([7]) den Antennenort durch die Interpolationsfunktion, so gelangt man zu einem Gleichungssystem, in dem der Antennenort nur noch eine reine Rechen-

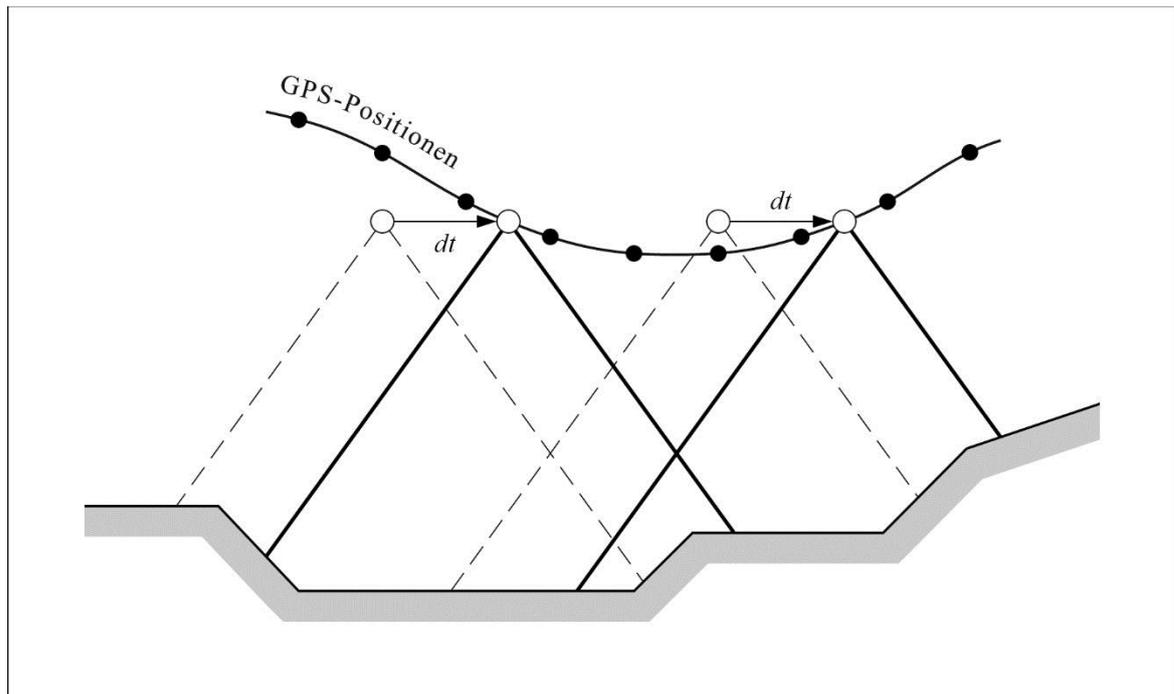


Abb. 1: Zeitliche Verschiebung der Strahlenbündel

größe darstellt. Das Modell wird auf die ursprünglichen Beobachtungen, nämlich die kontinuierlich registrierten GPS-Antennenpositionen und die Aufnahmezeiten, zurückgeführt. Hierbei wird bewußt vernachlässigt, daß auch die GPS-Koordinaten aus den Phasenmessungen abgeleitete Größen darstellen.

In einer erweiterten Version des Programms MOR [Wester-Ebbinghaus, 1985] ist dieses Modell der integrierten Bündelausgleichung mit Einbezug der Aufnahmezeiten realisiert worden [Schwiertz, 1994].

Interpolation im Modellsystem S_M

$$x_{j,A}^M = x_{j,k}^M + dt \cdot \left[x_{j,k+1}^M - x_{j,k}^M \right] \quad [14]$$

Räumliche Drehverschiebung vom Modellsystem ins Kamerasystem

$$x_i^P = e_{ij,M}^P \cdot \left[x_j^M - x_{j,A}^M \right] + f_{i,A}^P \quad [15]$$

Abbildung in die Bildebene

$$b_i^B + \delta b_i^B = \frac{-c}{p} x_i^P \quad i = 1, 2 \quad [16]$$

Bei dieser Darstellung gilt die Annahme $S_M = S_G$. Im anderen Fall müssen die beiden Systeme über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation ([6]) miteinander verbunden werden.

5. Schluß

Die Integration von GPS-Antennenpositionen in die Bündelausgleichung erfolgt durch Erweiterung des Funktionalmodells. Zusätzliche Parameter, die eine Modellierung von systematischen Fehlern in den GPS-Positionen ermöglichen, können berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann eine Erweiterung des Modells bezüglich der Interpolation auf den Aufnahmezeitpunkt erfolgen.

Insgesamt verursachen die eingeführten zusätzlichen Parameter eine geometrische Schwächung des Modells, insbesondere wenn sie streifenweise angesetzt werden. Darüber hinaus bestehen hohe Korrelationen zwischen einer Vielzahl der Parameter (Exzentrizität, Bildfehler, Datums- und Zeitparameter u. a. m.), so daß sie nicht alle gleichzeitig als Unbekannte geschätzt werden können.

Das Befliegungsmuster sowie die Zahl der verwendeten terrestrischen Paßpunkte sind von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung der zusätzlichen Parameter und für die Genauigkeit der ausgeglichenen GPS-Blöcke [Ackermann, 1992; Schwiertz, 1994]. Die Berücksichtigung von vier

Vollpaßpunkten in den Bildecken sowie jeweils einer Höhenpaßpunktette an den Blockenden bzw. alternativ die zusätzliche Befliegung zweier Querstreifen scheinen den Bedürfnissen einer GPS-gestützten Aerotriangulation gerecht zu werden.

Literatur

- Ackermann, F. [1992]:* Operational Rules and Accuracy Models for GPS-Aerotriangulation. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission III, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 3, Washington D.C., S. 691-700
- Baustert, G., Hein, G. W., Landau, H. [1989]:* On the Use of GPS in Airborne Photogrammetry, Hydrographic Applications and Kinematic Surveying. Proceedings of the 5th International Symposium on Satellite Positioning, 13.-17. März 1989, Las Cruces, N.M., USA, S. 1029-1040
- Bouloucos, T., Radwan, M., El-Sharkawey, A. A. [1992]:* Quality Control of Combined Adjustment of Photogrammetric and GPS Data. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission III, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 3, Washington D.C., S. 504-508
- Dorrer, E. [1980]:* Suffix and Tensor Notation for Analytical Photogrammetry. Manuscripta Geodaetica, Vol. 5, Nr. 1, Berlin, S. 91-143
- Dorrer, E. [1988]:* GPS-gestützte Aerotriangulation – Grundlegendes und Experimente. Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 86. Jahrgang, Heft 11, Olten, S. 595-604
- Dorrer, E., Schwiertz, Ch. [1990]:* Kinematic GPS and Aerial Triangulation – A Comparative Study. Proceedings ISPRS Symposium, Commission III, 20-25 May, 1990, Wuhan, China. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part 3.2, Wuhan, S. 106-131
- Friess, P. [1990]:* Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem Global Positioning System. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 359, Bayerische Akademie der Wissenschaften/Verlag Beck in Komm., München, 145 S.
- Friess, P., Heuchel, T. [1992]:* Experience with GPS-Supported Aerial Triangulation. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission I, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 1, Washington D.C., S. 299-305
- Heitz, S. [1980]:* Mechanik fester Körper, Bd. 1: Grundlagen, Dynamik starrer Körper. Dümmler Verlag, Bonn, 339 S.
- Jacobsen, K., Li, K. [1990]:* Bündelausgleichung mit kinematischer GPS-Positionierung. Zeitschrift für Vermessungswesen, 115. Jahrgang, Heft 5, Stuttgart, S. 182-186
- Li, K. [1992]:* Empirische Untersuchungen zur GPS-gestützten kombinierten Blockausgleichung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft Nr. 175, Hannover, 180 S.
- Lorch, W. [1991]:* RMK-TOP Aerial Survey Camera System. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 15, Stuttgart, S. 73-77
- Schwiertz, Ch., Dorrer, E. [1991]:* Bestimmung der Exzentrizität Kamera – Antenne in der GPS-gestützten Photogrammetrie. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 59. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, S. 99-103
- Schwiertz, Ch., Dorrer, E. [1992]:* Limits of KDGPS-Supported Aerial Triangulation for High Precision Point Determination. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission I, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 1, Washington D.C., S. 254-259
- Schwiertz, Ch. [1994]:* Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. Dissertation, Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 48, Neubiberg, 189 S.
- Stückmann, J. [1990]:* Blockausgleichung mit kinematischen GPS-Daten. Diplomarbeit (unveröffentlicht) der Universität Hannover, 105 S.
- Wester-Ebbinghaus, W. [1985]:* Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 110. Jahrgang, Heft 3, Stuttgart, S. 101-111

Photogrammetrie in der Denkmalrekonstruktion – die Brunnenanlage auf Herrenchiemsee

Mit Herrn Prof. Egon Dorrer habe ich eine über Jahre zurückreichende berufliche und private Verbindung. Für die zahlreichen Anregungen, die ich in meiner Laufbahn durch ihn erhalten habe, besonders in den beiden Zeitabschnitten, als unsere berufliche Zusammenarbeit etwas enger war, bin ich ihm sehr dankbar. Mit diesem Beitrag, der bewußt über den rein fachlichen Aspekt hinaus formuliert wurde, möchte ich einem Charakterzug von E. Dorrer entsprechen, trotz hohem beruflichen Engagement offen zu sein für die ihn umgebenden Dinge.

Zusammenfassung

Für eine umfangreiche und anspruchsvolle Denkmalrekonstruktion – den Wiederaufbau des Fama- und Fortunabrunnens vor Schloß Herrenchiemsee – wurden Methoden der Stereo- und Monobildauswertung von Meß- und Amateurbildern eingesetzt.

Summary

3D object reconstruction methods based on stereo and mono evaluation of metric and non-metric images were used to determine the shape and the size of two large fountains in front of the castle Herrenchiemsee of the Bavarian king Ludwig II.

1. Einleitung

Zu den ersten Anwendungen der Photogrammetrie überhaupt gehören die Arbeiten von A. Meydenbauer, dem es bereits im vorigen Jahrhundert gelang, die »Meßbildkunst« als eine Methode der Bauaufnahme und –dokumentation in Deutschland zu etablieren. Heute werden photogrammetrische Methoden zur Dokumentation und Rekonstruktion von Denkmälern vielfältig eingesetzt.

Meistens handelt es sich dabei um gezielte stereophotogrammetrische Aufnahmen zur Herstellung von Ansichten, Schnitten und Grundrissen. Gelegentlich stützen sich Rekonstruktionsvorhaben von Bauwerken auf bereits vorhandenes »Bildmaterial«, welches als Einzelaufnahmen mehr oder weniger zufällig erstellt wurde. Bei der Verwendung von Nichtmeßbildern zur quantitativen und qualitativen

Rekonstruktion von Bauwerken stellen sich besonders Fragen der Bildorientierung und Genauigkeit der Einzelbildauswertung.

2. Baugeschichtliche Einführung

Die Wasserspiele in der von Carl von Effner geplanten Gartenanlage westlich des Neuen Schlosses Herrenchiemsee wurden in den Jahren 1881-85 nach dem Vorbild von Versailles errichtet (Abb. 1). Im oberen Parterre, auch Wasserparterre genannt, liegen die beiden großen Bassins des Fama- und des Fortunabrunnens. Flankiert werden diese beiden Fontänen von zwei seitlich gelegenen, kleineren Brunnenanlagen, den beiden Kabinetten. Unterhalb der breiten Freitreppe, die in der Mittelachse von Schloß und Garten zu dem unteren Blumenparterre herabführt, befindet sich der 1970-72 wiederhergestellte Latonabrunnen. Das Blumenparterre weist außerdem zwei symmetrisch gelegene Rundbecken auf.

Die aus diesen sieben Brunnen bestehenden Wasserspiele waren noch zu Lebzeiten König Ludwigs II. in Betrieb, wurden aber bald danach stillgelegt. Die großen Wasserbecken wurden zugeschüttet und in Rasenflächen verwandelt, so daß nur die Brunneneinfassungen und die zentralen Brunnenaufbauten mit den Figurengruppen zu sehen waren.

Obwohl bereits in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts der Wunsch bestand, die Wasserspiele wiederherzustellen, scheiterte ein erster Anlauf in den Dreißigern am Beginn des Zweiten Weltkrieges. In der Folgezeit fehlte es nicht an Plänen und Befürwortern, wohl aber an den notwendigen Mitteln, das Vorhaben zu realisieren. Erst als unter

Mitwirkung der Vereinigung der Freunde von Herrenchiemsee e. V. ein Finanzierungsmodus gefunden worden war – für die Wiederherstellung der Was-

serspiele wird ein zweckgebundener Zuschlag von DM 1,- zum Eintrittspreis erhoben –, bestand Aussicht auf baldige Verwirklichung.



Abb. 1: Famabrunnen (1974) von Westen mit dem Neuen Schloß

Die Wiederherstellung der Wasserspiele ist eine Maßnahme der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen. Nach ihren Vorgaben, besonders unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Gesichtspunkte, ist das Landbauamt Rosenheim mit der Durchführung der Rekonstruktion beauftragt worden. Größere Abschnitte der Sanierungsmaßnahme waren die Neuverlegung sämtlicher Versorgungsleitungen (1969), die Wiederherstellung des Latonabrunnens (1970/72) und die Rekonstruktion der Marmorbrunnen und Rundbecken (1977/78). Weitere wichtige Arbeiten waren die Umstellung der Wasserversorgung auf Brunnen-schächte (1978) und die Sanierung der 40 m breiten Freitreppe mit ihren 22 Granitstufen zwischen oberem und unterem Parterre (1987/88). Die letzte, zugleich auch weitaus größte Einzelbau-maßnahme war die Wiederherstellung des Fama- und Fortunabrunnens.

3. Wiederherstellung des Fama- und des Fortunabrunnens

3.1 Abbau der Brunnenpyramiden 1974

Diese beiden Brunnen gehen nicht auf Versailles zurück, sondern haben ihre Vorbilder im »Versail-

les der spanischen Könige«, in dem 78 km nord-westlich von Madrid, bei La Granja, liegenden Park von San Ildefonso. Die Fortunagruppe im südlichen Becken stammt vom Bildhauer Wilhelm von Rümann, die Famagruppe im nördlichen Becken von Rudolf Maison [Thiele, 1993].

Lange bevor die Sanierung der beiden großen Brunnen in Angriff genommen werden konnte, mußten die zentralen Felsaufbauten mit den überlebensgroßen Figuren der Fama und Fortuna (Gesamthöhe ca. 13 m) wegen akuter Einsturzgefahr abgetragen werden. Kurz vor dem Abbau, im November 1974, erfolgte an zwei Tagen eine stereo-photogrammetrische Aufnahme der beiden Brunnen durch den Verfasser und den damaligen wissen-schaftlichen Assistenten am Lehrstuhl für Photo-grammetrie und Kartographie der TU München, Armin Grün. Es wurden insgesamt acht Bildpaare der beiden Brunnen nach einer symmetrischen Auf-nahmedisposition mit einer TAF-Kamera (Ter-restrische Ausrüstung Finsterwalder) im Format 13 x 18 cm² auf Glasplatten erstellt. Die damals für ausreichend erachtete Aufnahmedisposition zeigt Abb. 2.

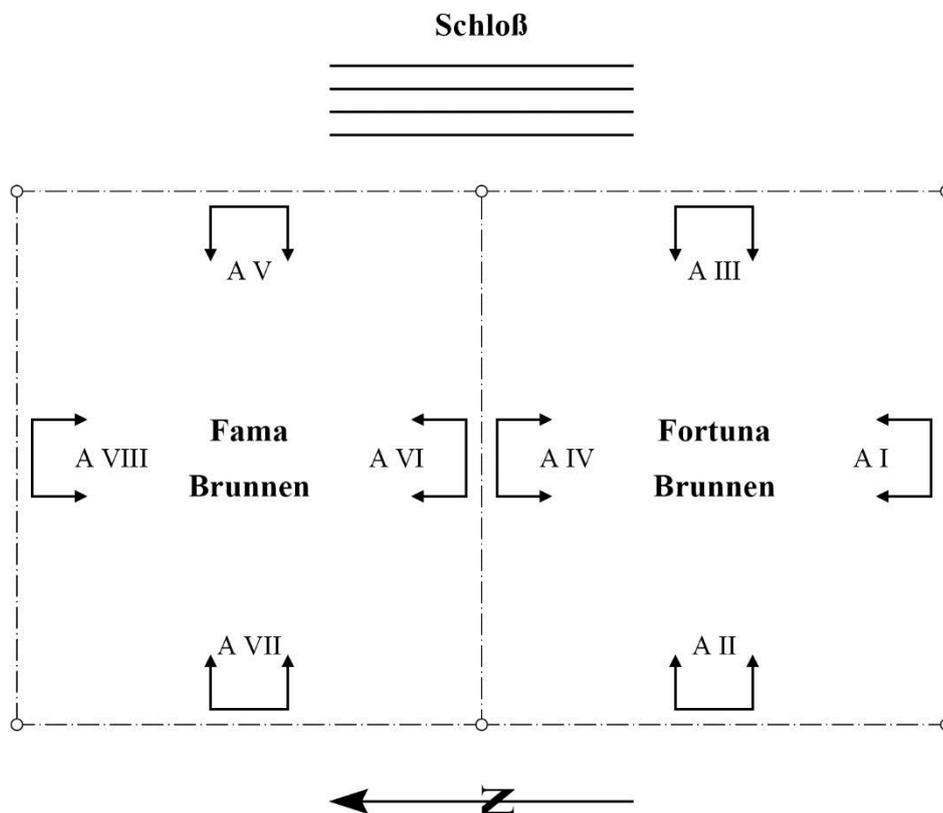


Abb. 2: Photogrammetrische Aufnahmedisposition von 1974

Beim eigentlichen Abbau der Felspyramiden aus Nagelfluh und der zum Teil überlebensgroßen Figuren wurde versucht, dem Gesichtspunkt einer späteren, möglichst naturgetreuen Rekonstruktion Rechnung zu tragen. Dazu trug erheblich bei, daß die Nagelfluhblöcke beim Abbau numeriert und getrennt für jeden Brunnen auf der Nord- bzw. Südseite des Schlosses gelagert wurden. Da die Tragkraft des damals verwendeten Kranes die Lasten der grossen Bleigußfiguren nicht aufnehmen konnte, mußten diese beim Abbau in Teile zerlegt werden. Die Figuren wurden ebenfalls im Freien gelagert, nur kleinere Stücke konnten in einem Abstellraum des Schlosses geborgen werden. Schließlich wurde der gesamte Abbau durch eine Reihe von Kleinbildaufnahmen dokumentiert, eine, wie sich herausstellen sollte, wertvolle Informationsquelle zu Detailfragen bei dem erst mehr als siebzehn Jahre später beginnenden Wiederaufbau.

3.2 Wiederaufbau des Fama- und des Fortunabrunnens ab 1991

Der Wiederaufbau begann mit der Rekonstruktion der beiden Wasserbecken, die jeweils eine Dimension von ca. 42 m x 83 m aufweisen. Dafür und für alle späteren Rekonstruktionsaufgaben wurden drei Betonpfeiler errichtet, die es gestatten, alle Absteckarbeiten und Kontrollmessungen durchzuführen. Für die exakte Absteckung der Lage der

Brunnenbecken konnten Maße aus der Katasteraufnahme verwendet werden (Abb. 3). Geringe Abweichungen von der Symmetrie der beiden Originalbecken, die im Laufe der Zeit besonders an der nordwestlichen Ecke der Anlage aufgetreten waren, wurden behoben. Für die Rekonstruktion der Brunnenkörper war die Katasteraufnahme jedoch ungeeignet.

Durch eine bereits 1975 erfolgte Grabung unter der Leitung des Referats für Bauforschung der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen konnten die Umrisse der Felsaufbauten auf dem ursprünglichen Beckenboden, die Lage von jeweils sechs kleinen, ursprünglich vorhandenen Felspyramiden innerhalb der Becken sowie die Höhenlage des Beckenbodens ermittelt werden. Dies war insoweit wichtig, als diese Daten durch die 1974 erfolgte photogrammetrische Aufnahme mangels entsprechender Bildinformation nicht ermittelt werden konnten.

3.3 Rekonstruktion der Felspyramiden der beiden Brunnen

Zum Wiederaufbau der Felspyramiden wurden vornehmlich die bereits genannten vier Stereopaare der beiden Brunnen verwendet. Dabei wurde ein Vorschlag wiederaufgegriffen, der bereits kurze Zeit nach der Stereoaufnahme in einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Kartographie verifiziert wurde [Reichenberger, 1975]. In die-

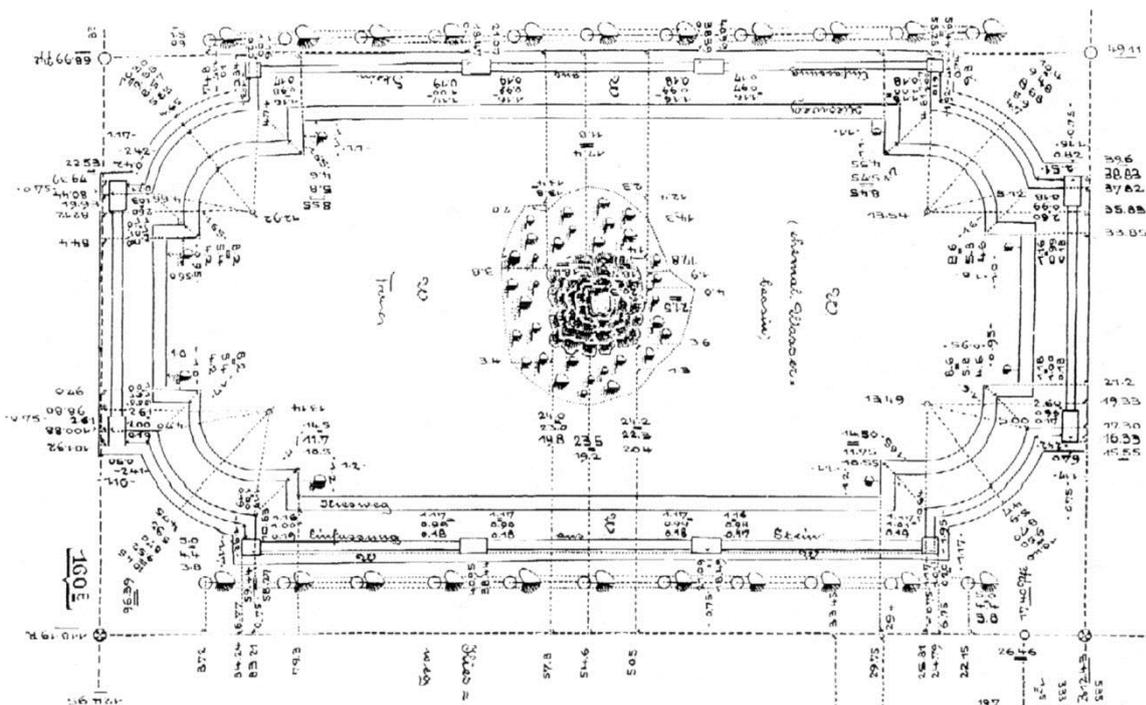


Abb. 3: Ausschnitt aus dem Katasterplan (Fama)

ser Arbeit wurden die einzelnen Bildpaare als voneinander isolierte terrestrische Standlinien behandelt, die jeweils eine Ansicht des Brunnens entsprechend den vier Himmelsrichtungen zeigen. Ferner erwies sich ein hier dargelegter Absteckungsvorschlag als tragfähig. Danach ist die Lage jedes einzelnen Steines im Raum beschrieben durch drei nichtkollineare Punkte, die in einem dreidimensionalen Koordinatensystem festgelegt werden. Um dieses Koordinatensystem in der Wiederaufbauphase ständig verfügbar zu haben, wurde um jeden Felskegel ein in der Höhe verstellbares, stabiles und bezüglich der Brunnenmitte symmetrisches »Schnurgerüst« mit den Dimensionen von 4 m x 4 m aus massivem Holz realisiert (Abb. 4).



Abb. 4: Höhenverstellbares Schnurgerüst

Bevor jedoch mit der eigentlichen Bildauswertung begonnen werden konnte, mußten die vorhandenen Steine auf Grund der beim Abbau gefertigten Aufzeichnungen und Amateurbilder auf Vergrößerungen der Meßbilder identifiziert und nummeriert werden. Der überwiegende Teil der abgelagerten Steine konnte auf diese Weise zugeordnet werden. Deren Wiederverwendung wurde von ihrem individuellen, doch sehr unterschiedlichen Erhaltungszustand abhängig gemacht. Dort, wo die Qualität der Steine als nicht ausreichend bewertet wurde, konnte aus dem nahegelegenen Steinbruch bei Brannenburg, der bereits im 19. Jahrhundert Steine für das Vorhaben geliefert hatte, Nagelfluh von vergleichbarer Struktur und guter Qualität beschafft werden.

Für die notwendige Stabilität der Felsaufbauten sorgt jetzt ein schlanker Stahlbetonkegel, der im Zentrum der Brunnen einen Bereich einnimmt, der früher fast ausschließlich Füllmaterial enthielt. Dieser Kegel dient dazu, alle großen Steine und die Figuren sicher zu verankern.

Die Bildauswertung wurde danach als Bündelblock mit jeweils acht Bildern je Brunnen so konzipiert, daß jeder sichtbare Stein mit fünf Punkten bestimmt wurde. Davon diente der »Mittelpunkt« (Lage der Steinnummer) zur groben Lokalisierung des jeweiligen Steines, während der linke/rechte bzw. obere/untere Punkt zur Ausrichtung des Steines verwendet werden konnte. Die Verknüpfung des Bildverbandes erfolgte über die Paßpunkte und identische Objektpunkte in den Randzonen der Felspyramiden und durch Punkte auf den Gußfiguren. Da die Paßpunkte vorher in ein lokales, zentrisch in der Brunnenmitte gelagertes Koordinatensystem überführt worden waren, lieferte die Bündelblockausgleichung direkt die Absteckdaten. Aus diesen konnten auch geeignete Maße für neu zu beschaffende Steine abgeleitet werden.

Um die Ergebnisse dieser Auswertung auf der Baustelle zuordnen zu können, war eine entsprechende Visualisierung notwendig. Daher wurden die gemessenen Bildkoordinaten verwendet, um in Vergrößerungen eines der beiden Bilder die jeweiligen Steine vereinfacht als beliebige Vierecke »darzustellen«. Durch die Überlagerung dieser Information mit dem Bildinhalt wurde zugleich das Problem der Zuordnung des Meßpunktes am jeweiligen Stein gelöst (Abb. 5).



Abb. 6: Visualisierung der Ergebnisse

Für die Baustelle von größtem Nutzen – obwohl zunächst als nicht notwendige Spielerei abgetan – war ein Spiegelstereoskop, unter welches fest vormontierte Vergrößerungen der Bildpaare gelegt werden konnten. Damit konnte bei kritischen Fragen wiederholt der Raumeindruck als Entscheidungshilfe genutzt werden.

Schon bei der Stereoauswertung der einzelnen Ansichten, die den im Herbst 1974 vorhandenen Zustand konservierten, konnten Fehlstellen in den Felspyramiden ausgemacht werden. Damit war die Frage einer Ergänzung an bestimmten Stellen bei der Wiederherstellung des originalen Zustandes aufgeworfen. Nach Lage der Dinge konnte diese nur dadurch erfolgen, daß man älteres, noch vorhandenes Bildmaterial verwendete. Da es sich um ein recht prominentes Denkmal handelt, konnten Aufnahmen aus fast allen Dekaden, die nach der Erbauung der Wasserspiele verstrichen waren, ausfindig gemacht werden. Als besonders ergiebig erwies sich ein Satz von Bildern, der in der Bayerischen Staatsbibliothek gefunden wurde, und von Bildern aus dem Besitz der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, da sie kurze Zeit nach der Erbauung, z.T. schon 1886, aufgenommen worden waren. Ferner wußte man noch, daß am Fortunabrunnen umfangreichere Re-

staurierungen in den vierziger Jahren unseres Jahrhunderts notwendig geworden waren, nachdem ein Teil der Steinpyramide eingestürzt war. Das alte Bildmaterial konnte zunächst grob nach seiner Tauglichkeit zur Füllung von Fehlstellen sortiert werden. Bilder der Wasserspiele, die diese in der kurzen Zeit ihrer Funktion (Abb. 6) zeigen, waren wichtig, da daraus die Anzahl und Verteilung der Wasserstrahlen rekonstruiert werden konnte.

Zur Auswertung von Nichtmeßbildern stehen einige Verfahren zur Verfügung. Bei genügend vielen und besonders auch räumlich gut verteilten Paßpunkten können ohne Kenntnis von Näherungswerten die innere und äußere Orientierung mit Hilfe der Methode der Direkten Linearen Transformation (DLT-Methode) durch Ausgleichung geschätzt werden [Bopp und Krauss, 1978]. Eine kritische Beurteilung der Ergebnisse der Schätzung der involvierten 11 Parameter ist wegen der vielfältigen Korrelationen meist nur möglich durch Rückrechnung auf die bekannten sechs Parameter der äußeren und drei wesentlichen Parameter der inneren Orientierung, was aber trivial ist. Manchmal helfen gewisse Annahmen über die Kammerkonstante und die Lage des Bildhauptpunktes, auf den die Bildkoordinaten zunächst reduziert werden, rascher plausible Orientierungsdaten zu ermitteln. Ebenso kann

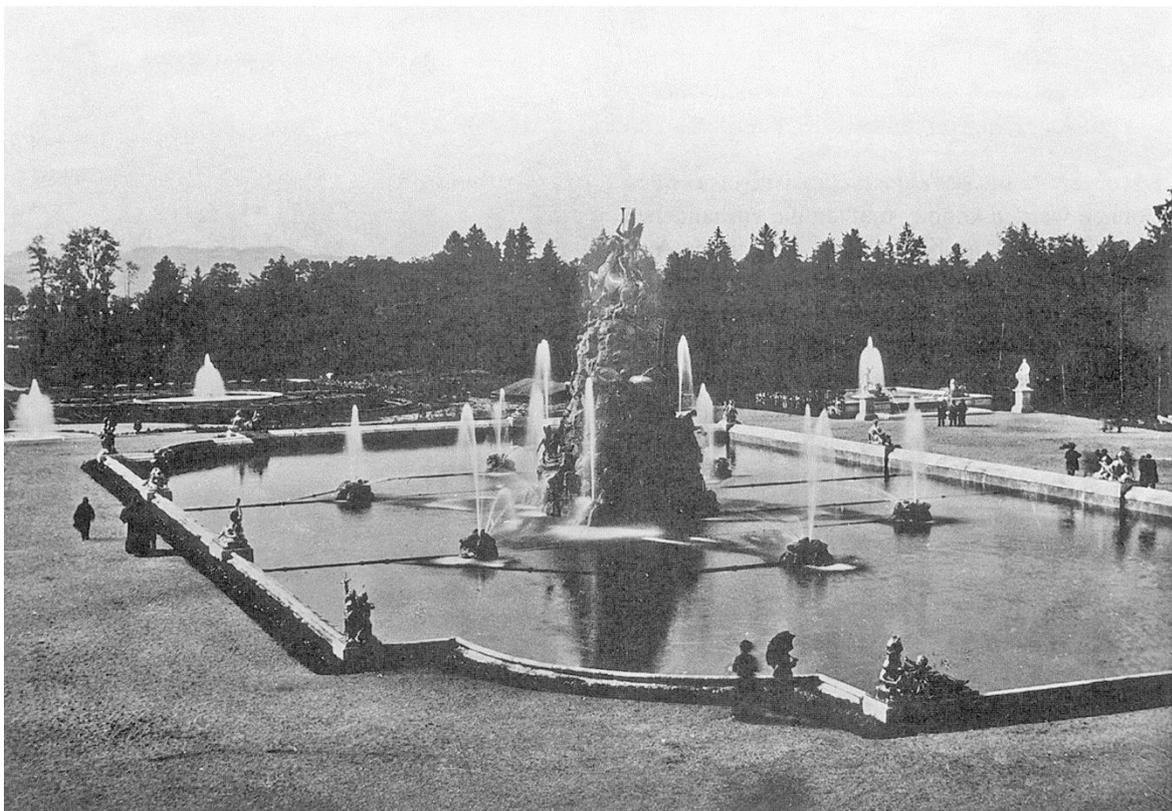


Abb. 6: Fama, SO-Ansicht, Aufnahme datiert 1886

ein um die Parameter der inneren Orientierung erweiterter Bündelansatz zur Bestimmung der Orientierungsdaten des Bildes benutzt werden [Müller und Stephani, 1984].

Beide Methoden führten zu sicheren Orientierungsdaten bei Bildern mit Aufnahmerichtungen SO bis NO, auf denen im Hintergrund das Neue Schloß mitabgebildet ist. Für diese Bilder konnten genügend Paßpunkte sowohl im Vordergrund am Beckenrand und auf den Felspyramiden, als auch im Hintergrund – auf der Schloßfassade – gefunden werden. Bei einer entsprechenden Verteilung der Bilder waren sogar Stereoauswertungen der gesuchten Details möglich, wobei jedoch besonders auf die Genauigkeit der meist suboptimalen Strahlenschnitte geachtet werden mußte. Durch Bündelausgleichung ist die Grenze der erreichbaren Genauigkeit bei vorgegebener Aufnahmekonstellation schätzbar.

Meist liegen jedoch nicht solch günstige Verhältnisse, was die Anzahl und die Verteilung von Paßpunkten betrifft, vor. Dann kann man sich mit einer Methode weiterhelfen, die auf E. Thompson zurückgeht [Thompson, 1962] und die vom Verfasser hier erfolgreich eingesetzt wurde [Stephani und Grün, 1974]. Sie sei hier nur kurz vorgestellt:

Bekanntlich läßt sich die äußere Orientierung eines Bildes zumindest näherungsweise auch ohne die Kenntnis der inneren Orientierung bestimmen. Dies ist besonders gut bei Bildern von räumlichen Objekten möglich, da die vorhandenen Verdeckungen im Bild helfen, die Lage des Aufnahmeortes mit einiger Sicherheit ausfindig zu machen. Dieser Aufnahmeort wird in Bezug auf das Paßpunktsystem bestimmt und die vorhandenen Bilddrehungen – so gut wie möglich – geschätzt. Mit diesen vollständigen Daten der äußeren Orientierung wird nun ein Meßbild mit bekannter innerer Orientierung erstellt, an das die Bedingung geknüpft wird, daß es mindestens vier – besser mehr – identische und bildhaft gut verteilte Punkte zu dem Amateurbild aufweist.

Transformiert man schließlich mit Hilfe einer projektiven Transformation, die bekanntlich eine Ebene in eine andere Ebene überführt, die Gesamtheit der Bildpunkte des Amateurbildes in das Meßbild, erhält man das gesamte gesuchte Strahlenbüschel des Amateurbildes als Bildkoordinatensatz mit bekannter innerer und äußerer Orientierung. Der weiteren Verwendung dieses Datensatzes zusammen mit anderen Amateur- oder Meßbildern steht nun nichts mehr im Wege. Wegen der Korrelation der Bilddrehungen mit den Koordinaten des Projektionszentrums sind an die Bestimmung des Aufnahmeortes im allgemeinen keine allzu hohen

Genauigkeitsanforderungen zu stellen. Erwähnt sei noch der Fall, bei dem es sich im Amateur- und Meßbild um identische Punkte mit bekannten Koordinaten (Paßpunkten) handelt. Zur Anwendung der Methode genügt die Generierung eines fiktiven Meßbildes im festgelegten Aufnahmeort mit bekannter Kammerkonstante.

Gewissermaßen eine Verallgemeinerung des Verfahrens der Entnahme von Information aus »Bildern« stellt die Analyse dar, die E. Dorrer anstellte, um aus zwei Landschaftsgemälden Meßdaten zu ermitteln. Dabei handelt es sich um zwei Panoramen der Brüder Schlagintweit, die diese nachweislich 1856, also zu einer Zeit, als das Verfahren der Photographie noch nicht feldtauglich war, unter Verwendung von Richtungsmessungen angefertigt hatten. Um eine stichhaltige Analyse des Bildinhaltes, besonders der Gletscherstände, durchführen zu können, ist deren Vergleich mit aktuellen Photographien von Interesse. Auch hier mußte zunächst der »Aufnahmeort« des Panoramabildes anhand von Objektdetails rekonstruiert werden. Zusätzlich wurde aber noch der Tatsache Rechnung getragen, daß im Falle eines solchen Panoramas die Abbildung nicht auf eine Bildebene erfolgt. Das einfachste mathematische Modell eines Panoramas bildet das Objekt auf den Mantel eines Zylinders mit im Aufnahmeort vertikaler Achse ab. Probleme können sich dabei ergeben, wenn, wie im Hochgebirge, das Panorama sich nicht nur in die Breite, sondern auch in die Höhe erstrecken soll. Das mathematische Modell müßte in diesem Fall auf die Abbildung auf eine Kugelfläche erweitert werden, in deren Mittelpunkt der Beobachter steht. Allerdings ist die Kugelfläche im Gegensatz zur Zylinderfläche nicht mehr abwickelbar [Dorrer, 1989].

Für alle Verfahren zur Bestimmung der Bildorientierungen von Amateurbildern gilt, daß deren Ergebnisse kritisch gewürdigt werden müssen. Hohe Genauigkeiten lassen sich aus Amateurbildern oft nicht erreichen, da weitere systematische Fehler, z. B. die Verzeichnung und die affine Deformation der Bildebene, nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden können. Es gehört daher eine gewisse Erfahrung dazu, solche Auswertungen zu beurteilen.

Ein weiterer Aspekt ist die Berechnung von räumlichen Objektkoordinaten aus Einzelbildern. Grundsätzlich ist dies nur möglich, wenn Objektinformation vorliegt. Letztere kann in Form eines flächenhaften digitalen Objektmodells eingeführt werden, wofür sich der Begriff Monoplotting eingebürgert hat. Für Näherungsauswertungen genügen oft einfache Objektmodelle, z. B. lokale Ebenen.

Die Auswertung erfolgt dann dadurch, daß die Raumgerade, die vom Bildpunkt über den Aufnahmeort in den Objektraum führt, mit der angenommenen, genäherten Objektoberfläche geschnitten wird. Die Qualität der dreidimensionalen Koordinaten, die durch diese Methode des Strahlenschnittes bestimmt werden, hängt ab von der Schnittgeometrie, der Güte des digitalen Objektmodells, der Genauigkeit der Bildorientierung und der Meßgenauigkeit im Bild. Zu beachten ist dabei, daß bei mehreren Durchstoßpunkten geeignete Kriterien formuliert werden müssen, um den gesuchten Objektpunkt zu finden [Grün und Sauermann, 1977; Waldhäusl et al., 1986].

3.4 Rekonstruktion der Bleiußfiguren

Ein wichtiges denkmalpflegerisches Ziel bei der Rekonstruktion der Brunnenanlage ist die Wiederherstellung des ursprünglich beabsichtigten, nur durch historische Photographien überlieferten gesamten Erscheinungsbildes der Fontänen. Zu diesem Erscheinungsbild tragen die Brunnenfiguren in hohem Maße bei. Sie wurden in Blei-Zink-Guß erstellt und befanden sich nach dem Abbau und der langen Lagerung in einem ruinösen Zustand. Die vielen Figurenteile mußten zunächst in mühevoller Kleinarbeit gesichtet und dokumentiert werden. Danach wurde das sie tragende Innenkorsett nach statischen Erkenntnissen aus feuerverzinktem Stahl erneuert. Dafür mußten die Figuren in Teilen bearbeitet, diese wieder zusammengefügt und neu verlötet werden. Verformungen, die durch den Abbau und die jahrelange Lagerung entstanden waren, wurden z. T. unter Mithilfe der Stereoauswertung durch einen Bildhauer rückgängig gemacht. Durch Stereophotogrammetrie wurde für jede der bis zu sieben Tonnen schweren Figuren ein Satz von ca. 5 bis 15 Raumstrecken zwischen Figurenpunkten bereitgestellt, die besonders für die Zusammensetzung der Figurenteile nützlich waren. Schließlich wurden die Lage und Ausrichtung jeder Figur auf den Felspyramiden stereophotogrammetrisch bestimmt und entsprechend dieser Angaben vor Ort versetzt. Bei dem Famabrunnen mit seinem besonders reichen Figurenschmuck war es notwendig, die Aussparungen für die Figuren bereits bei Aufbau zu berücksichtigen, um teure Abarbeitungen des harten Natursteins zu vermeiden. Auch hier konnte die stereophotogrammetrisch bestimmte Ausdehnung der Figuren im Zusammenspiel mit den Positionen der sichtbaren Steine zweckdienlich verwendet werden.

3.5 Rekonstruktion der Nebenfontänen

Zum Erscheinungsbild der beiden großen Brunnen gehören auch jeweils sechs, um die zentralen

Felspyramiden gruppierte Nebenfontänen (Abb. 6). Sie waren bei der photogrammetrischen Aufnahme 1974 bereits nicht mehr vorhanden, jedoch durch die nachfolgende Grabung zweifelsfrei in ihrer Lage identifiziert worden. Sie besaßen einen recht unterschiedlichen Aufbau. Während die Nebenfontänen des Fortunabrunnens durch sechs Knaben (Putti) mit je einem Delphin bzw. einem Fisch gebildet wurden, besaß der Famabrunnen lediglich ca. 0,5 m über den Wasserspiegel reichende Steinpyramiden ohne figuralen Schmuck. Die Anordnung der Nebenfontänen gestattet es, im Zusammenspiel mit den zugeordneten vier Fontänen an der Felspyramide ein romantisches Wasserstrahlenbild zu erzeugen, auf das noch näher eingegangen wird.

Die Verteilung der sechs Putti des Fortunabrunnes konnte ebenfalls aus alten Photos rekonstruiert werden. Ihre Ausrichtung erfolgte überwiegend nach künstlerischen Gesichtspunkten, wobei dem Ausdruck jeder einzelnen Figur, aber auch der Symmetrie der beiden abgehenden Strahlen und deren Höhenlage Rechnung getragen wurde. In Zusammenarbeit mit dem zuständigen Bildhauer und den Verantwortlichen für die Statik und Bauüberwachung wurde ein Konzept zur Versetzung und Ausrichtung der Figuren erstellt. Die eigentliche Absteckung der Daten erfolgte von den bereits genannten Beobachtungspfeilern.

3.6 Rekonstruktion des Wasserstrahlenbildes

Das Wasserstrahlenbild der Brunnen setzt sich aus dem zentralen Strahl der jeweiligen Hauptfigur auf der Spitze des Felskegels und weiteren Strahlen zusammen. Die großen Hauptfiguren zeigen die beiden namensgebenden Göttinnen Fortuna und Fama.

Während die Fortuna am Fuß der Pyramide von vier großen vertikal und horizontal wasserspeienden Delphinen umgeben ist, sind an den entsprechenden Stellen der Fama keine Figuren, sondern nur vertikale und schräge Wasserfontänen vorhanden.

Der Gesamteindruck der Anlage wird maßgeblich durch die Strahlen der Nebenfontänen bestimmt, die im Grundriß einen sechszackigen Stern formen und deren Strahlhöhe und -entfernung auf die vier Delphine abgestimmt war. Dieses Strahlenbild konnte durch Auswertung von einigen historischen Amateuraufnahmen zweifelsfrei rekonstruiert und durch ein aufgefundenes zeitgenössisches Gemälde überprüft werden. Durch Absteckung der zugeordneten Aufpunkte der einzelnen Wasserstrahlen in dem gefüllten Wasserbecken und räumliche Ausrichtung der entsprechenden Düsen sowie Regelung des zuständigen Wasserdruckes konnten die Strahlen in-



Abb. 7: Fortuna, NO-Ansicht, November 1993

dividuell so optimiert werden, daß ein symmetrischer und harmonischer Gesamteindruck entsteht (Abb. 7).

4. Schlußbetrachtungen

Inzwischen sind die Bauarbeiten für das Fortuna-becken, die im Sommer 1991 anliefen, weitgehend abgeschlossen. Die Nebenfontänen mit den sechs originalen Putti sind errichtet und das Wasserstrahlenbild wiederhergestellt. Es fehlen noch etliche Beckenrandfiguren und florale Dekorteile an der Felspyramide und den Nebenfontänen.

Vom Famabrunnen, an dem ein Jahr später, im Sommer 1992, begonnen wurde, steht der komplette Felskegel mit der Zentralfigur. Einige andere Figuren konnten bereits montiert werden, andere befinden sich noch in der Restaurierungswerkstatt. Die photogrammetrischen Auswertungen sind bis auf die für das Wasserstrahlenbild der Fama abgeschlossen.

Die Inbetriebnahme beider Brunnen ist für Sommer 1994 vorgesehen. Die bis dahin fehlenden Figuren, plastischen Dekorteile und Ergänzungen sollen in den folgenden Jahren aufgestellt bzw. ange-

bracht werden. Eine photogrammetrische Dokumentation der Brunnenanlage nach Abschluß sämtlicher Arbeiten ist beabsichtigt.

Der Reiz der Mitwirkung an einer so umfangreichen, unter anspruchsvollen denkmalpflegerischen Gesichtspunkten ablaufenden Rekonstruktion liegt für den Photogrammeter in der Möglichkeit der Mitgestaltung der gesamten Baumaßnahme und der Interdisziplinarität der Arbeit. Dabei können Konzepte zur Rekonstruktion von photogrammetrischer Seite entwickelt und im harten Baustellenablauf überprüft werden. Die unterschiedlichsten metrischen Fragestellungen werden im Laufe der Zeit einer Lösung zugeführt, meist unter Mitwirkung von davon betroffenen Fachkollegen.

Dank

Dem Verfasser ist es an dieser Stelle ein Bedürfnis, einen Dank an mitwirkende Fachkollegen auszusprechen. Besonderer Dank gebührt für hervorragende fachliche Zusammenarbeit den Herren Dr.-Ing. M. Mayer und Dipl.-Ing. M. Fritsch, Kolbermoor, in deren Händen die Bauaufsicht lag. Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. U. Thie-

le von der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, München, sowie den Herren Dipl.-Ing. A. Grundmann und Dipl.-Ing. (FH) K. Pörnbacher vom Landbauamt Rosenheim.

Die photogrammetrische Auswertung erfolgte am Planicomp C 100 des Instituts für Byzantinistik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Prof. M. Restle. Für die Möglichkeit, dort messen zu können, danke ich ihm sehr. Herzlicher Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Ebner, der es mir ermöglichte, mich diesem Projekt über einen längeren Zeitraum widmen zu können.

Literatur

- Bopp, H.-P., Krauss, H. [1978]:* Ein Orientierungs- und Kalibrierungsverfahren für nichttopographische Anwendungen der Photogrammetrie. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 85. Jahrgang, Karlsruhe, S. 182-188
- Dorrer, E. [1989]:* Zur Bildgeometrie von Landschaftsgemälden. Bildanalysen am Beispiel zweier Gletschergemälde von Schlagintweit aus dem Jahre 1856. – In: Festschrift Wilhelm Kick. Acta Albertina Ratisbonensia, Band 46, Regensburg, S. 29-38
- Grün, A., Sauermann, H. [1977]:* Photogrammetric Determination of Time-Dependent Variations of Details of a Glacier Surface Using a Non-Metric Camera. Symposium on Dynamics of Temperate Glaciers and Related Problems, München, 9 S.
- Müller, F., Stephani, M. [1984]:* Effiziente Berücksichtigung geodätischer Beobachtungen und Objektinformation in der Bündelblockausgleichung. Proceedings of the 13th International ISPRS Congress, Commission V, Rio de Janeiro, 1984. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 25, Part A5, Rio de Janeiro, S. 558-569
- Reichenberger, V. [1975]:* Photogrammetrische Auswertung der Brunnenanlage auf Herrenchiemsee. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Kartographie der TU München (unveröffentlicht), München, 116 S.
- Stephani, M., Grün, A. [1974]:* Photogrammetrische Vermessung der Brennkammer des Atomreaktors Garching/München. Bildmessung und Luftbildwesen, 42. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, S. 12-18
- Thiele, U. [1993]:* Die Wiederherstellung der Wasserspiele in Herrenchiemsee. Presseinformation der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen anlässlich des Richtfestes für den Fortunabrunnen am 5.5.1993, 16 S.
- Thompson, E. H. [1962]:* Photogrammetry in the Restoration of Castle Howard. The Photogrammetric Record, Vol. 4, London, S. 94-119
- Waldhäusl, P., Enthofer, C., Kager, H. [1986]:* Bildauswertung durch Verschneiden des Strahlenbündels mit dem digitalen Höhenmodell. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, 74. Jahrgang, Heft 3, Wien, S. 155-166

Bildnachweis

Bayerische Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen:
Abb. 6

Verfasser:
Abb. 1, 3, 4, 5, 7

Variance Components in the Photogrammetric Error Budget

Summary

Classical error theory in photogrammetry regards observations to be independent and of equal weight. Empirical and theoretical studies have shown that variances and covariances vary within the image format and between images. It is important to take this variation of variances and covariances into consideration when the task is to predict accuracy, precision and reliability, and when advanced methods for data snooping are applied.

Zusammenfassung

Die klassische Fehlertheorie der Photogrammetrie betrachtet Beobachtungen als unabhängig und gleich genau. Empirische und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, daß Varianzen und Kovarianzen sowohl im Bild als auch zwischen den Bildern variieren. Diese Variationen müssen berücksichtigt werden, wenn Genauigkeit, Präzision und Zuverlässigkeit abgeschätzt werden sollen. Dies gilt auch für den Fall, daß fortgeschrittene Methoden des Data Snooping angewandt werden. Ein Varianzkomponentenmodell für die Photogrammetrie wird präsentiert und diskutiert.

Introduction

In classical error theory in photogrammetry the measured image or model coordinates are regarded to be observations which have errors that are assumed to be independent and of equal weight. In statistical tests we assume as a rule that the errors of the observations follows a normal distribution. Often the ground control points and check points are regarded to have such a high accuracy that their errors are negligible. It is often assumed that all systematic errors are corrected and that blunders do not contaminate the observations. Least squares adjustment of observations is used to estimate unknowns and variances and covariances of unknowns and functions of them. Estimation of

precision is based on the general law of variance propagation.

The assumptions of the classical error theory have been step-wise modified in several respects. In block triangulation it is often so that corrections to ground control are estimated in the adjustment. A priori weights are given to the control points to indicate the relative accuracy of their coordinates. The magnitude of systematic errors is reduced by additional parameters for self-calibration which are extra unknowns in block adjustments. Collocation and Kriegering have also been applied in order to reduce remaining systematic errors. Data snooping and other methods are applied so as to eliminate blunders and outliers from the data.

Attempts have been made to modify the assumption that errors of image or model coordinates are independent and of equal weight. But very little has been achieved in practical applications of results from such attempts. One reason can be that estimates of unknowns, such as coordinates of new points in block triangulation or interior orientation elements in camera calibration, are not very sensitive to changes of a priori weights. Prediction and estimation of accuracy is however very dependent on correct weighting. But who cares about precision of unknowns and functions thereof. You are happy with the point coordinates when you know that their standard errors are in the cm-range, or in the dm-range. A factor ten in standard error of the standard error is most often accepted.

This paper will give some examples of how to use variance components of the error budget to get a better understanding of photogrammetric errors.

Variance of point coordinates of a stereo model

Hallert [1956] has presented a detailed derivation of the error propagation from image coordinates and parallaxes through relative and absolute orientation to the final ground coordinates. He applied the general law of error propagation to the differential

formulae of relative and absolute orientation. Ground control points were considered to be error-free, and the variance of image coordinates were assumed to be constant over the image format and the same as that of parallaxes. In later studies he estimates the variation of variances over the image format [Hallert, 1961 and 1968]. The final accuracy of model coordinates was averaged over the model area.

Hallert did not discuss what part of the total variance came from the relative and absolute orientations and what part came from image errors of the new points. But random errors of parallaxes of the von Gruber points will give errors of the relative orientation elements which will lead to a constant or fixed deformation of that particular stereo model. For another stereo pair this deformation will be different. The deformation varies from model to model, but it is fixed within a model. We can call this a quasi systematic error of the model. The variance of the deformation of the population of stereo model is estimated by Hallert but not separated from the total variance.

Parts of the model deformations after relative orientation are eliminated in the absolute orientation, namely those which are linear in the model coordinates. Higher order deformations remain. Errors in observations on control points have three components:

- random errors of image coordinates,
- random errors of geodetic coordinates and target eccentricities, and
- higher order deformations from the relative orientation.

This again leads to quasi systematic errors in the ground coordinates of the new points of the stereo model. As for relative orientation Hallert included this in the total error without any further discussion.

Hallert's estimates of variances of model coordinates were:

$$\sigma_X = 1.1 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Y = 1.2 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Z = 1.8 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

The above values are based on the assumption that the relative orientation is computed from the six von Gruber points and absolute orientation on five full control points, one in each corner and one in the middle of the model.

Modification of Hallert's estimates into variance components

In analytical photogrammetry today we still have software programs that estimate the orientation of the model in two steps, relative and absolute. Often image coordinates are measured in mono-comparator mode. The variance of parallaxes should then be twice that of image coordinates. This can be justified also in the case when image coordinates are measured stereoscopically, because most of the error of an observation originates from other sources than the operator. Later we will discuss about physical causes for variance components of the total image variance. It will be shown that the operator's error contribution is small. Thus the variance of parallaxes should then be twice that of image coordinates.

The next modification is that we introduce the variances of geodetic errors and eccentricity of panels on control points. We also identify the parts of the total error which is quasi systematic for the model, from that which varies randomly from point to point within the model.

With six von Gruber points for relative orientation, and four full control points in the corners of the model, we get the following estimates [Torlegård, 1992]:

$$\sigma_X^2 = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2 + 0.05 \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_r^2 +$$

$$+ \frac{4}{3} n_p \cdot \left(\sigma_G^2 + \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2\right)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{7}{6} \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2 + 0.34 \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_r^2 +$$

$$+ \frac{4}{3} n_p \cdot \left(\sigma_G^2 + 2.5 \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2\right)$$

$$\sigma_Z^2 = \frac{50}{9} \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2 + 0.33 \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_r^2 +$$

$$+ \frac{5}{3} n_h \cdot \left(\sigma_H^2 + \frac{50}{9} \cdot \left(\frac{h}{c}\right)^2 \cdot \sigma_0^2\right)$$

where

σ_0^2 is the variance of image coordinates

σ_r^2 is the variance of relative orientation parallaxes

σ_G^2 is the variance of a planimetric control

σ_H^2 is the variance of a height control

n_p, n_h are the number of planimetric resp. height control points.

Here the first term is the direct effect of errors of image coordinates on the new point, the second term is the quasi systematic effect of relative orientation and the third term is the quasi systematic effect of absolute orientation.

Assume

$$\sigma_r^2 = 2 \cdot \sigma_0^2$$

and negligible errors in ground control, and we get

$$\sigma_X = 1.05 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Y = 1.64 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Z = 2.92 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

The value for Z is much higher than *Hallert's* estimate, which depends partly on the assumption that the relative orientation residual variance is twice that of image coordinates, partly on the number of height control which is four here and five in *Hallert's* case. The number of control points are in the third terms of the above formulae, but to use them for other control configurations introduce approximations. The coefficients of the second terms for relative orientation depend very much on the control point configuration.

Point determination after multiple point resection

In case the orientation of the stereo pair is solved by double point resection in space, the error propagation will be similar but with only one quasi systematic effect. It can be regarded as a block triangulation with two images with tie points and control points in an adjustment. This step is followed by space intersection of new points using the orientation elements obtained in the triangulation adjustment.

The collinearity equations give the following types of linearized observation equations:

$$A_1 y + A_2 x = l_1 + v_1$$

$$0 y + B_2 x = l_2 + v_2$$

where

- y vector of unknown orientation elements,
- x vector of unknown tie and control point coordinates,
- l₁ vector of image coordinate observations with unit weight,
- l₂ vector of given ground control point »observations« with weight P.

The normal equations are:

$$N_{11} y + N_{12} x = h_1$$

$$N_{21} y + N_{22} x = h_2$$

The estimated orientation elements have a variance-covariance matrix

$$\text{Cov}(yy) = \sigma_0^2 Q_{yy}$$

where

$$Q_{yy} = (N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21})^{-1}$$

The next step is to derive the error propagation from image coordinates and orientation elements to new points through space intersection of new points which have not been used in the resection adjustment. Already with only two images we have an adjustment problem. The unknowns are the xyz-coordinates of the n new points. We denote them z, a vector of length 3 · n. The linearized observation equations are

$$A_0 y + 0 x + A_3 z = l_3 + v_3$$

Where y are 6 · m estimated orientation elements, the errors of which propagate to the intersected coordinates z. We write

$$A_3 z = l_3 + v_3 - A_0 y$$

The normal equation are

$$N_{33} z = h_3$$

The variance-covariance matrix of the estimated point coordinates z has two parts, namely the direct effect of image coordinates and the indirect effect of the orientation elements. We get

$$\text{Cov}(zz) = \sigma_0^2 Q_{zz}$$

where

$$Q_{zz} = N_{33}^{-1} + N_{33}^{-1} N_{30} Q_{yy} N_{03} N_{33}^{-1}$$

$$N_{30} = A_3 A_0$$

$$N_{03} = A_0 A_3$$

It can be interesting to see the elements of N_{33}^{-1} in case of a point intersected from n vertical photographs. We get

$$N_{33}^{-1} = \frac{1}{n} \cdot \begin{pmatrix} 1 + \left(\frac{x_0}{d_0}\right)^2 & \frac{x_0 \cdot y_0}{d_0^2} & -c \cdot \frac{x_0}{d_0^2} \\ & 1 + \left(\frac{y_0}{d_0}\right)^2 & -c \cdot \frac{y_0}{d_0^2} \\ \text{symm.} & & \frac{c^2}{d_0^2} \end{pmatrix}$$

where

Rel. Orient.	Number of points			Image			Orientation			Total		
	XY	Z	Weight	Q _{XX}	Q _{YY}	Q _{ZZ}	Q _{XX}	Q _{YY}	Q _{ZZ}	Q _{XX}	Q _{YY}	Q _{ZZ}
6	4	4	1	0.83	1.33	5.56	0.77	1.44	3.15	1.61	2.78	8.71
6	4	4	10 ⁶	0.83	1.33	5.56	0.36	0.82	2.40	1.20	2.15	7.96
7	4	5	1	0.83	1.33	5.56	0.75	1.40	2.76	1.59	2.74	8.32
7	4	5	10 ⁶	0.83	1.33	5.56	0.34	0.77	2.07	1.17	2.10	7.63
15	4	4	1	0.83	1.33	5.56	0.75	1.35	3.02	1.58	2.68	8.57
15	4	5	1	0.83	1.33	5.56	0.72	1.31	2.66	1.56	2.65	8.22
15	4	5	10 ⁶	0.83	1.33	5.56	0.32	0.73	1.94	1.16	2.06	7.50
25	8	8	1	0.39	0.39	1.45	0.11	0.11	0.31	0.49	0.49	1.76

Tab. 1: Co-factors Q_{XX} , Q_{YY} , Q_{ZZ} with separated direct random effect from image coordinate errors, indirect quasi systematic effect from orientation and the sum of the two. The values are averages over the model. The last case is a block of five images forming a cross with 60% x 60% overlap. All the other cases are an ordinary wide angle stereomodel.

x_0, y_0 are the linear means of all n image coordinate pairs x'_i, y'_i

d_0 is the quadratic mean of all image coordinates.

The error propagation above has been programmed on a PC where the number of images and the geometry of the block in general can be defined. We now compute the co-factor matrices for a number of model points. The co-factors from the images and those from the orientations are given separately. Results are shown in Table 1. For a stereo model with four planimetric and five height control points which are error-free as in *Hallert's* case, but with seven points for relative orientation, we get on the average

$$\sigma_X = 1.08 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Y = 1.45 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Z = 2.76 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

The same case but with a standard error of control points of the same magnitude as the image coordinate error in image space (unit weight) gives

$$\sigma_X = 1.26 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Y = 1.65 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Z = 2.88 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

With four full control points in the corners of the model and unit weight for ground control, we get

$$\sigma_X = 1.27 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Y = 1.67 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_Z = 2.92 \cdot \frac{h}{c} \cdot \sigma_0$$

Variance components of image coordinates

Torlegård [1989] derived a theoretical model for composition of errors of image coordinates and their variances and covariances. An image error is a sum of a number of elementary errors having various physical causes. The errors of different causes are independent, but some physical causes lead to covariances between the elementary errors having the same physical cause. Image points close to each other tend to have errors with a positive covariance.

Elementary errors are partly caused by lacking precision of observer and measuring instrument, partly by approximations introduced by the functional part of the mathematical model. The first type of error is as a rule random and independent. The second type is also random but errors in adjacent points are positively correlated. The correlation is close to +1 for a pair of points very near each other, and decreases towards zero with increasing distance between the pair of points. Each physical cause of an elementary error contributes to the total error, and the variance of the total error is composed of variance-covariance components related to the physical causes.

Assume for a moment that we have described the image geometry with the collinearity equations and that we have included corrections for parameters of atmospheric refraction, lens distortion, and affine film shrinkage. Examples of elementary error causes are then, for instance, irregular tangential (σ_{at}) and radial ($\sigma_{a\theta}$) atmospheric refraction, irregular tangential (σ_a) and radial (σ_θ) lens distortion, lacking emulsion flatness (σ_c), irregular film shrinkage ($\sigma_{shx}, \sigma_{shy}$), coordinate measuring instrument (σ_m), rounding-off error (σ_h), play in measuring lead-screws (σ_p), operator's setting precision (σ_{op}), errors of fiducial coordinates (σ_{fid}), errors of given ground control point coordinates ($\sigma_{Xg}, \sigma_{Yg}, \sigma_{Zg}$), eccentricity (σ_{exc}) of targets on points. *Torlegård [1989]* presents formulae for the variances and covariances of the total image errors for vertical photography over flat terrain. These formulae can be reduced to

$$\begin{aligned}\sigma_{x'}^2 &= \Sigma_0^2 + x'^2 \cdot \left[\Sigma_1^2 + \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{r^2}{c^2} \right) \cdot \Sigma_2^2 \right] + \\ &\quad + y'^2 \cdot \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \cdot \Sigma_3^2 \\ \sigma_{y'}^2 &= \Sigma_0^2 + y'^2 \cdot \left[\Sigma_1^2 + \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{r^2}{c^2} \right) \cdot \Sigma_2^2 \right] + \\ &\quad + x'^2 \cdot \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \cdot \Sigma_3^2 \\ \text{cov}(x' y') &= x' y' \cdot \left[\Sigma_1^2 + \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{r^2}{c^2} \right) \cdot \Sigma_2^2 - \right. \\ &\quad \left. - \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \cdot \Sigma_3^2 \right]\end{aligned}$$

where $\Sigma_0^2, \Sigma_1^2, \Sigma_2^2, \Sigma_3^2$ are functions of elementary variances.

In addition to these theoretical formulae for the variance-covariance of the image coordinates of a particular point, we also have a theoretical reason to expect the positive covariance between errors of image coordinates of two points at a distance d from each other. For a distance $d > d_0$ the covariance is very close to zero. The value of d_0 depends on the type of mathematical function used to describe the image geometry. For an aerial photo $23 \times 23 \text{ cm}^2$ without corrections for distortion and atmosphere we would expect $d_0 = 50\text{-}70 \text{ mm}$. With traditional corrections or modelling with a_3, a_5, p_1, p_2 , we would expect $d_0 = 15\text{-}25 \text{ mm}$.

Some variance components can be estimated by experiments in which just one or a few of the elementary errors are allowed to vary. E.g. the

setting precision of a human operator and an instrument can be estimated from a series of repeated observations. Other errors may have an a priori known variance, like that of the rounding-off error which is $h^2/12$, where h is the least reading interval. But generally it is very difficult to design experiments to estimate the variance components caused by the geometrical-mathematical approximations of the physical reality. By definition these errors have to be estimated from experiments made under real working conditions of the imaging and measuring system. In such experiments almost all elementary variance components contribute to the total variance, and it is not possible to let just one type of error vary at a time. The only way seems to be estimation of variance components from residuals after adjustments.

An attempt to estimate some of the elementary error variances is reported by *Burman, Rosenqvist and Wiman [1993]*. They have been able to separate the variances of human operator, film shrinkage, control points and target eccentricity. They have also found the variance of the quasi systematic effect of relative orientation elements. Three operators have made measurements in three stereo models with image scales 1:4000, 1:10000 and 1:30000.

A priori variances and covariances

In the above we have assumed that errors of image coordinates are independent and of equal weight (or equal variance). *Morén [1967]*, *Hallert [1961, 1968]* made attempts to estimate the variation of the weight (standard error) of image coordinates within the image format. *Brown [1969]* pointed out the existence of covariance between errors of the x' and y' image coordinates of one and the same point. *Ackermann and Schilcher [1978]* studied the covariances within an image and between images.

Torlegård's [1989] theoretical model can be used to calculate a priori variances and covariances of image coordinates. Four examples are given here (Tab. 2).

- Case 1 is an image taken with a modern aerial camera ($c = 150 \text{ mm}$) from 4500 m height and measured in an analytical plotter with readings in units of $1 \mu\text{m}$. No influence from given ground control, e.g. as in relative orientation.
- Case 2 is the same but with variances from given ground control added, e.g. as in test field calibrations.

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
c [mm]	150	150	150	150
Height [m]	4500	4500	1	750
Standard deviations of elementary errors				
Shrinkage [μm]	2	2	4	2
Flatness [μm]	5	5	10	5
Radial distortion [μrad]	5	5	10	5
Tangential distortion [μrad]	5	5	10	5
Atmosph. Refraction rad. [μrad]	5	5	10	5
Atmosph. Refraction tang. [μrad]	5	5	10	5
Instrument [μm]	2	2	2	2
Screw play [μm]	0.2	0.2	0.2	0.2
Rounding-off [μm]	0.29	0.29	0.29	0.29
Operator [μm]	1	1	1	1
Ground coordinates X Y [mm]	0	20	1	10
Ground coordinate Z [mm]	0	20	0	10
Signal eccentricity X Y [mm]	0	20	0	5
Signal eccentricity Z [mm]	0	50	0	10

Tab. 2: Standard deviations of elementary errors used for the calculation of a priori variances and covariances

- Case 3 is an older camera without effects from atmosphere (flying height 1 m) and ground control.
- Case 4 is a modern camera, flying height 750 m and effects of ground control coordinates and signal eccentricity.

The variances are symmetric around the axes of the image coordinate system. In a quadrat there is also a symmetry around the diagonal such that $\text{var } x'$ is mirrored in $\text{var } y'$ and vice versa.

Morén and *Hallert* both published empirical results showing the variation of the standard error of unit weight of image coordinates. We now convert the variances of the above tables to the average of the standard errors in x' and y' , and plot them we can see the similarities (Fig. 1).

A priori covariance in relative orientation

In relative orientation we have to consider three types of covariance, namely between x' and y' of a particular image point (we can call it inter-correlation, ρ_i), and between two adjacent points in one of the image (auto-correlation, ρ_a), according to *Ackermann and Schilcher [1978]*, and finally

between points in both images (cross-correlation, ρ_c , *Ackermann and Schilcher [1978]*). Let us start from the coplanarity condition.

$$\begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x_a & y_a & z_a \\ x_b & y_b & z_b \end{vmatrix} = 0$$

The observations x' , y' , x'' , y'' are hidden in the transformed image coordinates x_a , y_a , z_a , x_b , y_b , z_b . When we linearize the coplanarity equation with respect to unknowns and observations we get

$$\begin{matrix} \mathbf{B} & \mathbf{A} \\ n, 4n & 4n, n \end{matrix} \begin{matrix} (1 + v) \\ \mathbf{x} \end{matrix} = \begin{matrix} \mathbf{c} \\ n, 1 \end{matrix}$$

with the least squares solution

$$\mathbf{X} = [\mathbf{A}' (\mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}')^{-1} \mathbf{A}' (\mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}')^{-1} (\mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{1})]$$

Matrix \mathbf{B} is composed of submatrices of dimension 1,4. All submatrices except for the hyperdiagonal are zero. For the special case when all relative orientation angles are zero, the submatrices on the diagonal are (0,1,0,-1), which corresponds to $y' - y''$. Matrix $\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{11}^{-1} = \sigma_0^2 \text{Cov}_{11}^{-1}$ has dimensions 4n, 4n. Each submatrix 4,4 on the diagonal represents the weights and correlations of x' , y' , x'' , y'' of a point used for relative orientation. The off-diagonal submatrices 4,4 describe the correlations between two different points.

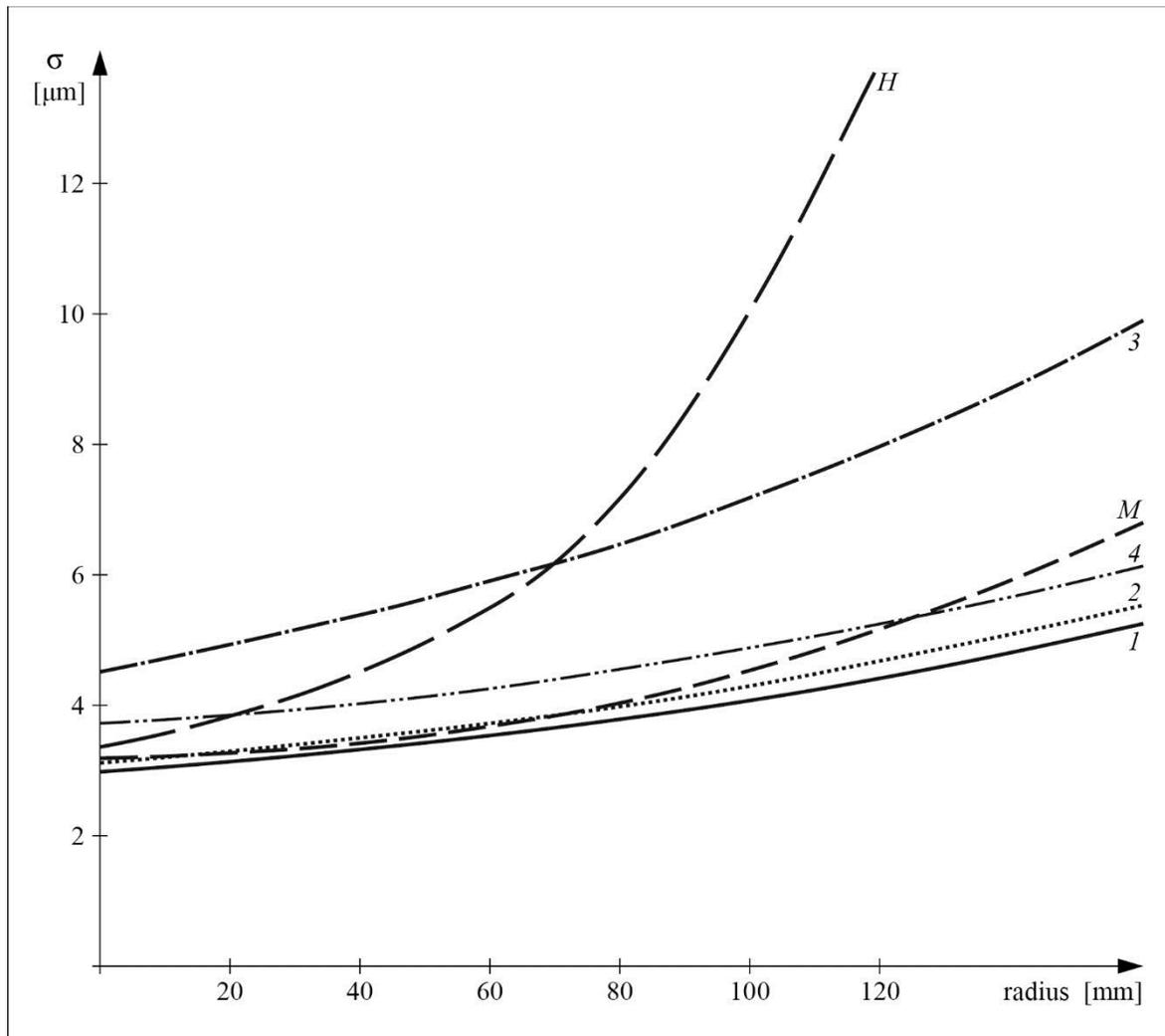


Fig. 1: Standard errors of image coordinates. Curve *H* from *Hallert [1961]* based on acetate base film measured in an A7, curve *M* from *Morén [1967]* based on polyester base film measured in a precision comparator, curves *1-4* from cases described in text and tables.

We are now interested in the non-zero elements of matrix *P*. The inter-correlation between $x' y'$ always gives 2,2 submatrices. The auto-correlation is zero when two points are at a distance $d > d_0$. This is usually the case between the six von Gruber points within one image, as the shortest $d \approx 90-100$ mm. But we have cross-correlation between $x' y'$ of point 1 and $x'' y''$ of point 2, as they have the same position within the image format. This is also the case between points 3 and 4, and 5 and 6 respectively.

With 9 and 15 regular grid points we have the shortest $d \approx 45-50$ mm. When we have so many points we are looking for high precision, and then we most likely have used a refined mathematical model of the image geometry which should give a covariance function that is zero for $d > d_0 \approx 15-20$ mm. Again we get cross-correlation between

points 1 (left image) and 2 (right image), 3 (left) and 4 (right), and 5 (left and 6 (right) respectively. All the rest is zero. For 9 points as in fig. 2, the matrix *BPB'* will have a structure as in fig. 3, and it can be regarded as a weight matrix of the system

$$A x = c - B l$$

which is the usual one for solving the relative orientation problem.

The diagonal elements of the *BPB'* are

$$\frac{1}{\sigma_{y'}^2 (1 - \rho_i^2)} + \frac{1}{\sigma_{y''}^2 (1 - \rho_i^2)}$$

The non-zero off-diagonal elements are

$$\frac{\rho_c}{\sigma_{y'} \sigma_{y''} (1 - \rho_i^2) (1 - \rho_c^2)}$$

Let us now look at another point configuration for relative orientation. Instead of the six von Gru-

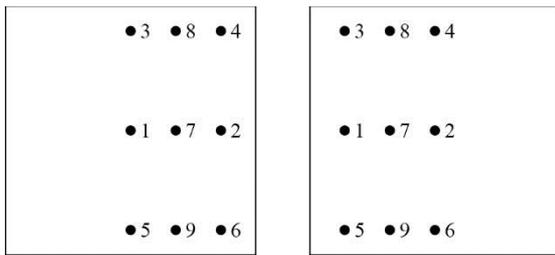


Fig. 2: Point locations for relative orientation which give the BPB' matrix in fig. 3

ber points, we now measure six pairs of points. The distance between points of a pair is a few millimeters, and thus we have to consider the auto-correlation within the pairs. We assume the covariance within a pair to be

$$\begin{aligned} \text{cov}(x' x') &= \sigma_{x'} \sigma_{x'} \rho_a \\ \text{cov}(y' y') &= \sigma_{y'} \sigma_{y'} \rho_a \end{aligned}$$

We also limit the observations to be only y' , y'' coordinates, i.e. the approximate values of the angles are zero. To make the calculations easier we also assume the cross-correlation between the two images to be zero, and we also drop the subscript a of ρ_a . Then the weight matrix will be a 24 x 24 matrix with 4 x 4 matrices on the diagonal. The elements of such a 4 x 4 matrix are

$$\frac{1}{(1-\rho^2)} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \frac{-\rho}{\sigma_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & 0 & \frac{-\rho}{\sigma_2^2} \\ \frac{-\rho}{\sigma_1^2} & 0 & \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{-\rho}{\sigma_2^2} & 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} \end{pmatrix}$$

where index 1 refers to the left image and 2 to the right. The BPB' will be a 12 x 12 matrix with 2 x 2 matrices on the diagonal which are

$$\frac{1}{(1-\rho^2)} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} & \frac{-\rho}{\sigma_1^2} + \frac{-\rho}{\sigma_2^2} \\ \frac{-\rho}{\sigma_1^2} + \frac{-\rho}{\sigma_2^2} & \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \end{pmatrix}$$

The two rows of A which correspond to a point pair have almost the same elements a_j . The contribution of this pair of rows to the element n_{ij} of the normal equations are

$$\frac{1}{(1-\rho^2)} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \cdot (1-\rho) \cdot 2 a_i a_j$$

The interesting thing is the effect of correlation. It is

$$\frac{(1-\rho)}{(1-\rho^2)} = \frac{1}{1+\rho}$$

X	X	0	0	0	0	0	0	0
X	X	0	0	0	0	0	0	0
0	0	X	X	0	0	0	0	0
0	0	X	X	0	0	0	0	0
0	0	0	0	X	X	0	0	0
0	0	0	0	X	X	0	0	0
0	0	0	0	0	0	X	0	0
0	0	0	0	0	0	0	X	0
0	0	0	0	0	0	0	0	X

Fig. 3: Structure of BPB' matrix

which shows that the information of the double points is full when $\rho=0$ and just half when $\rho=1$. As ρ is positive and rather high, the conclusion is not to use double points but well distributed ones to increase precision and reliability. The same conclusion also holds for any problem of adjustment of image coordinates. Image points should always be well distributed and at a distance from each other which is larger than the distance d_0 within which the image errors are correlated.

A priori covariance in model adjustments

Bard [1988] has made a diploma thesis where he has introduced a priori weights and correlations according to the discussed model. He calculated the standard errors of model coordinates after a bundle adjustment with image coordinates and given control points as observations. The input comprises point configuration, new and given points, flying height, variances of the elementary errors and normalization distances of their respective covariance functions.

When the normalization distance is varied there is very little variations in the estimated standard errors of model coordinates. This is no surprise. Of greater interest is the variation of standard errors of functions of model coordinates, such as distances between points. Here we would expect lower standard errors in shorter distances when we have a strong auto-correlation between the image errors. This is also confirmed in a study by *Zielinski [1992]*. He derived the error propagation to distances, height differences, and direction angles. The position in the model, the normalization distance of covariance functions, and the distance between end points were varied. The results are presented as diagrams in the paper. An example is given in figures 4 and 5. The results demonstrate how strong the influence is from the covariance functions.

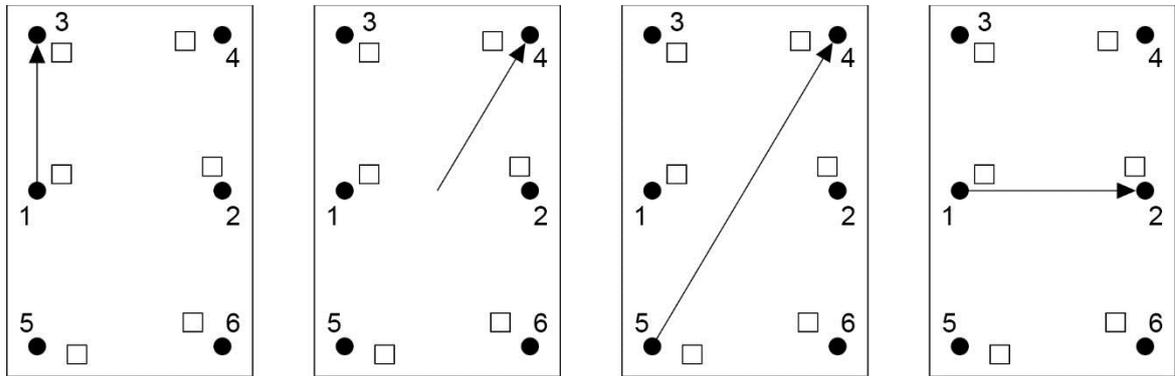


Fig. 4: Standard deviations of distances have been calculated for distances along the arrows (from Zielinski [1992])

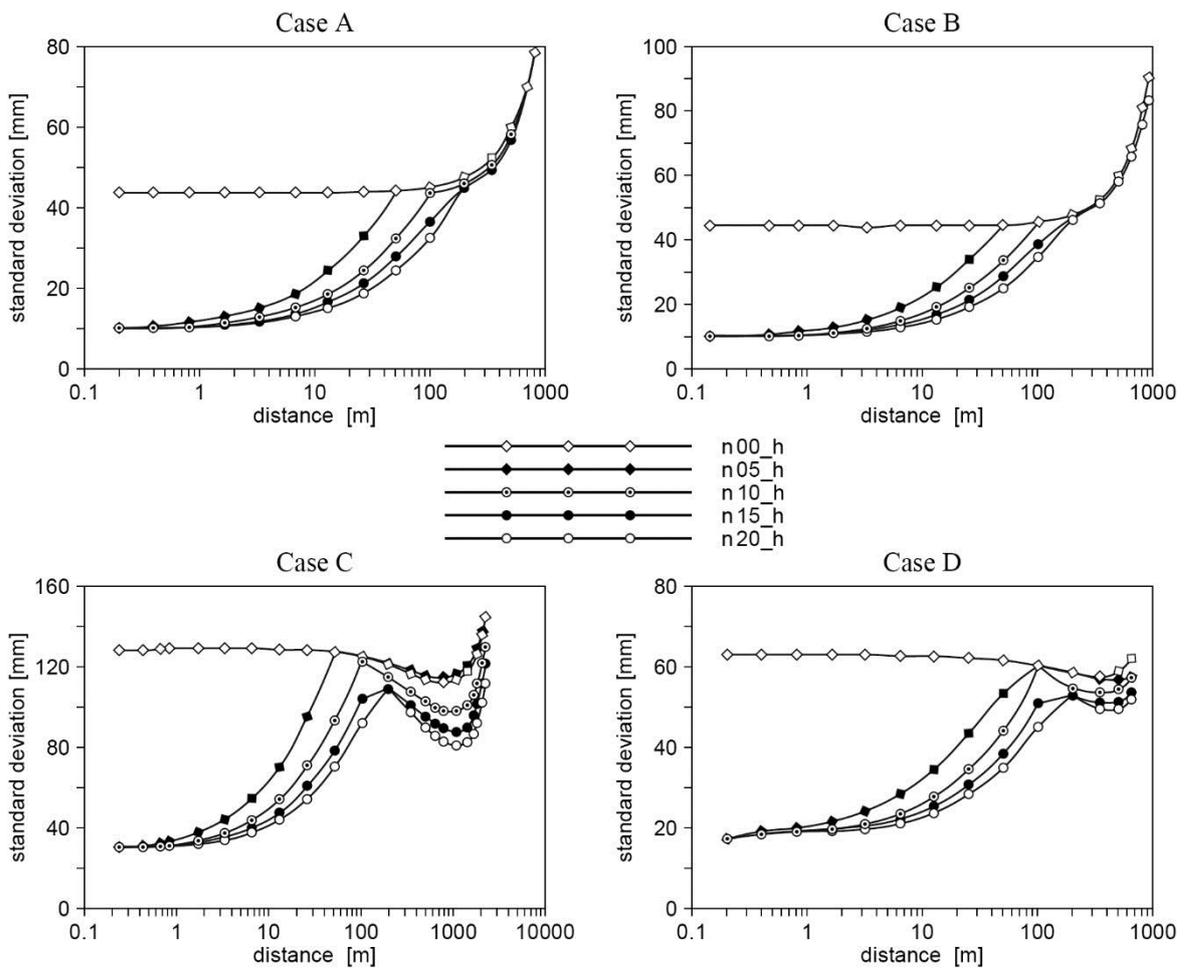


Fig. 5: Standard errors of distances along the arrows shown in Fig. 4 (from Zielinski [1992])

Some thoughts on a posteriori variance component estimation

Least squares adjustment is the classical method for point estimation of unknown variables when there are redundant observations. We also get an estimate of the residual variance. For a fairly large number of degrees of freedom (redundancy), r , the standard error of the standard error is

$$s_s = \frac{s}{\sqrt{2r}}$$

Let us assume that we want to estimate a standard error s with a precision of $s_s < 5\%$ of s itself, then we have to have

$$r > \frac{1}{2 \cdot 0.0025} = 200$$

What implications does this have for practical cases?

Let us as an example discuss the task to estimate the precision of a comparator, coordinatograph, digitizing table, or a stereoplotter. We assume that we have grid plates with given coordinates of such a precision that the errors of them can be neglected. Then we have at least three variance components to estimate, those of rounding-off, of operator, and of instrument. The grid is measured and the result transformed with a Helmert transformation to the grid system. The residual variance is then an estimate of the sum of the three variance components. How do we estimate them separately? The variance of the rounding-off is known to have a rectangular distribution, and from theory we get

$$s^2 = \frac{h^2}{12}$$

For the two other variance components we need some 200 redundant observations each. They can be estimated from an 11 x 11 grid measured twice without moving the grid. We then have 2 x 2 x 121 observations, 4 unknowns, and 480 degrees of freedom. From the differences we estimate the sum of the variances of the operator and the rounding-off, and from the Helmert transformation we estimate the total variance. If we do not know the given grid coordinates precisely enough, we have to measure the grid four times in two positions with approximately 100 gon rotation between the positions, and introduce the grid coordinates as unknowns as well.

But it is also very important to remember what kind of variation we want to describe by the variance components. Primarily we want to estimate the magnitude of the errors caused by the mathematical approximation in the functional part of

the mathematical model, and it is not only the variance of the random errors caused by instrument and operator. To get good estimates we should have an even distribution of points over the image field.

In the variance component model taken from *Torlegård [1989]* and discussed in this paper, we have one constant term Σ_0^2 , and three terms Σ_1^2 , Σ_2^2 , Σ_3^2 that vary with location in the image. Linear dependences between the coefficients can be avoided when sample points for the estimation of the variance components are located in the image such that there are groups of points in the image centre and at two radial distances and in two perpendicular directions from the centre. In this way we can avoid the linear dependence from the algebraic point of view.

The next to be discussed is the number of degrees of freedom needed for the estimation of the 4 variance components. In the above we have found that some 200 would be enough to estimate a single variance, and if we extrapolate that to the 4 components, we would need some 800 redundant observations. The location of these points within the image format should of course be evenly distributed. It is of course very difficult to obtain that in one image, but testfields with some 50 points are available at several places in the world. Eight photographs taken with the same camera and calculated in a simultaneous adjustment would yield the necessary data for variance component estimation for that camera and flying height.

Conclusions

Empirical and theoretical studies of variances and covariances of image coordinates have also addressed the question whether there is a functional or statistical variation within the image format of the standard errors of image coordinates. Some authors have also treated the covariances between image points within one and the same image and between separate images in a strip.

Practical applications of photogrammetry very seldom assume that the image coordinates have varying variances and covariances. Image observations are usually regarded to be stochastically independent and of equal weight. There is, however, one important exception from this general statement, and that is the weighting of ground control point coordinates (and GPS data) in aerial triangulation.

With the computer resources today it seems to be possible to introduce in practical use a priori

weight and correlation information in photogrammetric adjustments. That would be justified in cases when advanced data snooping is applied, and certainly when error propagation is calculated. A more refined stochastic model is needed for planning purposes, such as second and third order design, and for analysis of the accuracy of results, such as discrepancies in check points, and tolerance testing.

The author is of the opinion that the variance components have to reflect the real conditions as good as possible. Therefore, the variance components should be estimated in experiments made under real operational conditions. The scientific task is then transferred to find consistent models for the variances and covariances.

References

- Ackermann, F., Schilcher, M. [1978]:* Auto- and Cross-Correlation of Image Coordinates. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II, Nr. 36, Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main
- Bard, P. [1988]:* Att beräkna viktmatris för utjämning av fotogrammetrisk enkelmodell. Examensarbete. Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm, Institutionen för Fotogrammetri, Stockholm, 54 p.
- Brown, D. C. [1969]:* Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras. Proceedings of the 1969 Symposium on Computational Photogrammetry, held January 21-23, 1969, at State University College of Forestry, Syracuse, New York, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA.
- Burman, H., Rosenqvist, Å., Wiman, H. [1993]:* Estimation of Elementary Errors in Photogrammetry. Royal Institute of Technology, Department of Geodesy and Photogrammetry, Stockholm, 19 p.
- Hallert, B. [1956]:* Über die Genauigkeit der Luftphotogrammetrie. Transactions of the Royal Institute of Technology, No. 99, Stockholm, 58 p.
- Hallert, B. [1961]:* Weitere Untersuchungen über die Gewichtsverteilung der Bildkoordinaten in photogrammetrischen Meßbildern. Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 86, No. 10, Stuttgart, pp. 389-392
- Hallert, B. [1968]:* Quality Problems in Photogrammetry. Proceedings of the 11th International ISP Congress Lausanne, July 1968. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XVII, Part 3, Lausanne
- Morén, A. [1967]:* Geometric Quality of Aerial Photographs. Licentiate thesis. Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm, Stockholm, 119 p.
- Torlegård, K. [1989]:* Theory of image coordinate errors. – In: *Karara, H. S. (Ed.):* Non-Topographic Photogrammetry, Chapt. 7, Science and Engineering Series. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, VA., pp. 81-93
- Torlegård, K. [1992]:* Theory of errors and least squares in photogrammetry. Kompendium. Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm, Stockholm, 30 p.
- Zielinski, H. [1992]:* Propagation or correlated image errors to functions of photogrammetric coordinates. Fotogrammetriska Meddelanden, No. 57, Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm, Institutionen för Fotogrammetri, Stockholm, 16 p.

An Orientation Free Global Image Matching Based on Wavelet Transform²

Summary

The matching of stereo images is a key problem for digital photogrammetry. This paper presents an orientation free automatic global digital image matching approach based on wavelet transform. A rotating and wavelets weighting Laplacian variance matching algorithm is operated on each level of image pyramids generated by orthogonal wavelet transform. The wavelets coefficients are used as the weight function in similarity measure. The potential of this matching method is found in experimental results of Mars remote sensing images.

Zusammenfassung

Die Zuordnung von Stereobildern ist ein Schlüsselproblem in der digitalen Photogrammetrie. Der vorliegende Beitrag stellt einen orientierungsfreien, automatischen, globalen digitalen Bildzuordnungsansatz vor, basierend auf der Wavelet-Transformation. Ein Rotations- und Wavelet-gewichtender, auf Laplacescher Varianz beruhender Zuordnungsalgorithmus wird auf jedem Niveau von Bildpyramiden ausgeführt, generiert durch orthogonale Wavelet-Transformation. Die Wavelet-Koeffizienten werden als die Gewichtsfunktionen benutzt. Die Leistungsfähigkeit dieser Zuordnungsmethode wird an den Ergebnissen von Untersuchungen mit Mars-Fernerkundungsbildern deutlich.

1. Introduction

To match the same scene in two or more digital images is a common problem in computer vision, digital photogrammetry, etc.. In the area of digital photogrammetry, the matching task is to automatically measure the image coordinates of conjugate points in the overlapping images. Subsequently, the object space coordinates are computed from the

obtained conjugate image coordinates to generate the Digital Elevation Model (DEM).

In recent years, a large number of digital image matching algorithms have been proposed in digital photogrammetry and its related areas. The matching algorithms are usually classified into three classes:

- signal matching (area based image matching),
- feature matching (attribute based image matching),
- combination of signal and feature matching.

In signal matching (area based matching), the intensity value of the neighbourhoods of pixels in the selected window are taken into account in order to measure the disparities between two overlapping images. The well known cross-correlation algorithm takes the minimized disparity of the search area as the corresponding match pairs by measuring the maximization of correlation coefficients [Barnea and Silverman, 1972; Hannah, 1989]. Another well known Least Squares Matching (LSM) attempts to match windows of pixels by minimizing the differences of their gray values [Förstner, 1982; Ackermann, 1984; Grün, 1985; Rosenholm, 1986]. It takes the radiometric and geometric differences into account to obtain high accurate correlation.

In feature matching (attribute based image matching), the predefined common features or attributes (normally are points, lines and areas) are detected in the conjugate windows. Similarity check and additional techniques, such as relaxation or robust statistics and dynamic programming, are employed for matching [Förstner, 1986; Papanikolaou and Derenyi, 1988; Ackermann and Hahn, 1991; Cucka and Rosenfeld, 1992; Murtagh, 1992]. Also the graph theory is used to describe the relations of the features in matching [Shapiro and Haralick, 1987].

In combination of signal and feature matching, both gray values and features are used [Otto and Chau, 1989; Zong, Li and Schenk, 1992].

Least Squares Matching (LSM) is a popular choice in photogrammetry, mainly because of the following reasons:

¹ Currently visiting professor at Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Universität der Bundeswehr München Neubiberg.

² This work is supported by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in Germany.

- very high accuracy potential,
- freedom of geometric image distortions,
- possibilities for statistical analysis of the matching results.

However, one critical problem of LSM that needs special consideration is: it requires relatively high accurate approximations for the corresponding image patches (e.g., to be accurate within 1 - 2 pixels). In many applications this approximation may have already been good enough for final matching results. Obviously, the first problem of LSM is how to reach the required accurate approximation, say the coarse global matching. This paper attempts to approach this problem by means of so called rotating and wavelets weighting Laplacian variance matching based on wavelet transform.

Since *Grossmann and Morlet* introduced wavelets in 1984, wavelet transform has been recently developed for signal processing and widely employed in various application areas. As wavelets are generated from a single function (the mother wavelet) by dilations and translations, the wavelet transform naturally leads to the theory of multi-resolution signal analysis [*Mallat, 1989*]. For digital image processing, the wavelet representation is based on the idea of Laplacian pyramids [*Burt and Adelson, 1983*]. As is well known, the fundamental principle of image pyramid is to represent an image with decreasing geometrical scale. Today, image pyramid is in favour with many if not with most matching algorithms [*Ackermann and Hahn, 1991*]. However, there are some significant differences between the wavelet multiresolution pyramid and the Laplacian pyramid. Unlike the Laplacian pyramid, in the wavelet multiresolution pyramid there is no oversampling, and the individual coefficients in the set of data are independent. This may offer us to match two overlapping images independently in different scale levels of the pyramids. Moreover, wavelets are well located both in the spatial and frequency domains and the coefficients give a measure of the local irregularity of the signal at the scale under consideration. It contains the characteristic of the edge structures at the scale and therefore provides a useful information for image analysis. That is why the wavelet transform is employed in this matching method.

In the matching method presented in this paper, a non-error reconstruction of discrete wavelet transform proposed by *Zhou and Dorrer [1994]* is used to generate the image pyramids. A similarity measure operation, which takes the different rotated images into account to consider the possibility of different orientations in the image, is then per-

formed in approximate subband images (see *Mallat [1989]*). In order to increase the matching reliability, the wavelet values in detail subband images are used as weight functions to consider the contribution of edge information. The computation is performed successively with the matched results of the higher level being the guidance to the lower level.

Section 2 introduces wavelet transform, Section 3 describes the matching algorithm, Section 4 gives the results and a discussion.

2. Wavelet Transform

Wavelets are families of functions:

$$\psi^{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad [1]$$

$$a, b \in \mathfrak{R}, a \neq 0$$

generated from one single function ψ (mother wavelet) by dilations and translations. In Eq. 1, a is a scaling parameter, while b is a shift parameter. Following *Grossmann and Morlet [1984]*, people call such families *wavelets*. *Daubechies [1988]* showed that there exists wavelet $\psi(x)$ whose translations and dilations

$$\psi_{j,n}(x) = 2^{j/2} \cdot \psi_{2^j}(x - 2^{-j}n) \quad [2]$$

$$(j, n) \in \mathbf{Z}^2, j < 0$$

with j the scaling parameter, n the shift parameter,

are orthonormal bases of $L^2(\mathfrak{R})$, denoting the vector space of the measurable, square integrable 1-d function $f(x)$.

The basic idea of the wavelet transform is to represent any arbitrary function f as a superposition of wavelets, or say wavelets expansion of f :

$$f(x) = \sum_{j,n} c_{j,n} \cdot \tilde{\psi}_{j,n}(x) \quad [3]$$

$$(j, n) \in \mathbf{Z}^2$$

$$c_{j,n} = \sum_x f(x) \cdot \psi_{j,n}(x) \quad [4]$$

$$(j, n) \in \mathbf{Z}^2$$

In Eq. 3 and Eq. 4, $c_{j,n}$ is referenced as coefficients of the wavelet transform and defined as inner product, written as $c_{j,n} = \langle \psi_{j,n}, f \rangle$. Eq. 4 is referenced as wavelet decomposition of signal $f(x)$.

One can imagine that the forms of Eq. 3 and Eq. 4 are similar with the Fourier transform pair:

$$f(n) = \sum F(\omega) \cdot \exp^{j\omega n}$$

$$F(\omega) = \sum f(n) \cdot \exp^{-j\omega n}$$

For the Fourier transform, any periodic function is represented as a summation of orthonormal basis functions: the sinusoids. For wavelet transform, any measurable and square integrable function is represented as a Summation of orthonormal basis functions: the wavelets. Normally $F(\omega)$ is referenced as the coefficients of Fourier transform, while $c_{j,n}$ is referenced as the coefficients of wavelet transform.

Mallat [1989] interpreted the wavelet representation of a 2-d signal $f(x,y)$ as the multiresolution signal decomposition. The quadrature mirror filters h, \tilde{h}, g and \tilde{g} , which are derived from the scaling function Φ and the mother wavelet Ψ , are employed to form his successive algorithm. The block diagrams of decomposition and reconstruction algorithm proposed by *Mallat* are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

In Fig. 1 and Fig. 2, $A_{2^j}f$ is the approximation image at resolution 2^j ; $D_{2^j}^1f, D_{2^j}^2f$ and $D_{2^j}^3f$ are the detail images of *horizontal, vertical*

and *diagonal* edges at resolution 2^j respectively. The decomposition at final is interpreted in a pyramid structure shown in Fig. 3.

A non-error reconstruction of wavelet transform algorithm proposed by *Zhou and Dorrer [1994]* is used in this paper. The following quadrature mirror filters based on a modified *Haar mother wavelet* are employed:

$$\tilde{h}^T = \frac{1}{2} [0,1,1] \quad \tilde{g}^T = \frac{1}{2} [0,-1,1] \quad (\text{decomp.}) \quad [5]$$

$$h^T = [1,1,0] \quad g^T = [1,-1,0] \quad (\text{reconstr.})$$

By combining the quadrature mirror filters in Eq. 5, four 2-d wavelet transform filters are generated for decomposition:

$$\tilde{h}_A = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \tilde{h}_{D^1} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{h}_{D^2} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \tilde{h}_{D^3} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad [6]$$

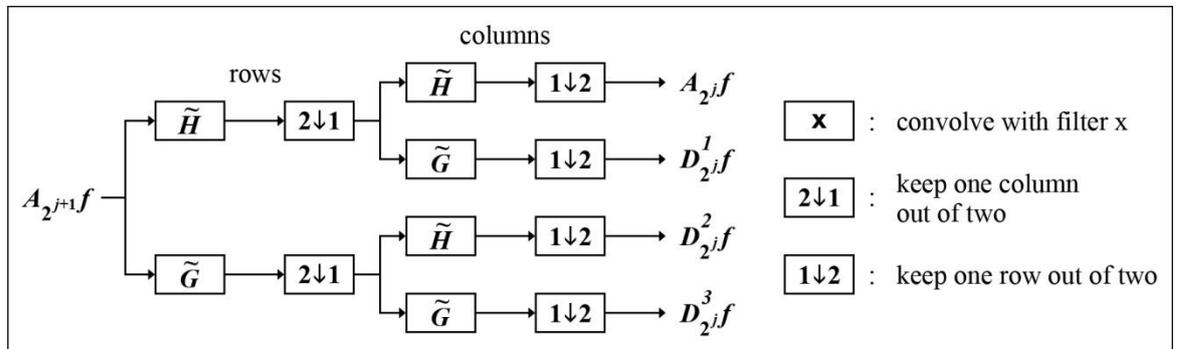


Fig. 1: Block diagram of image wavelet representation algorithm from *Mallat*

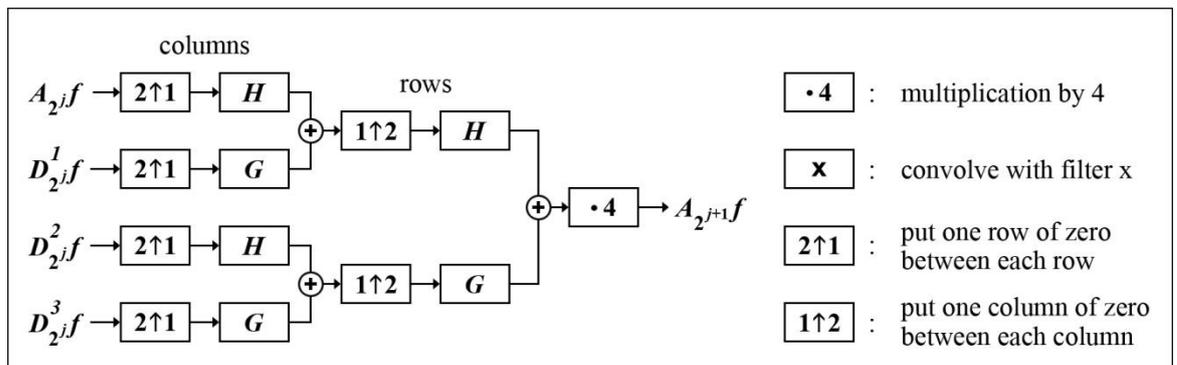
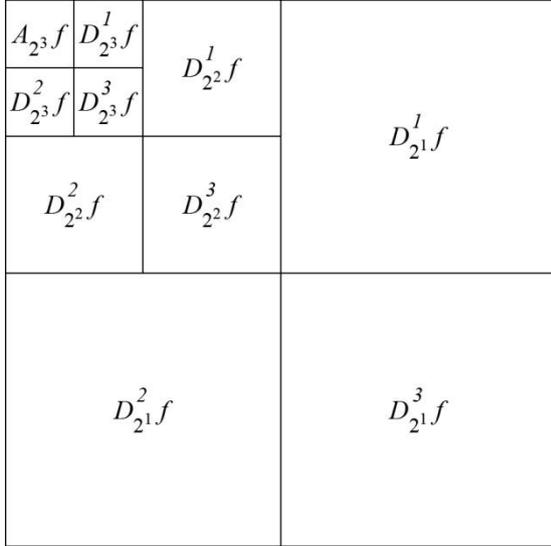


Fig. 2: Block diagram of image reconstruction algorithm from *Mallat*


Fig. 3: Wavelet representation pyramid structure

The reconstruction filters respective to Eq. 6 are:

$$h_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad h_{D^1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h_{D^2} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad h_{D^3} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[7]

By removing the zero components in the Eq. 6 and Eq. 7, the filters can be rewritten as:

$$\tilde{h}_A = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1^* & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad h_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1^* \end{bmatrix}$$

$$\tilde{h}_{D^1} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1^* & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad h_{D^1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1^* \end{bmatrix}$$

$$\tilde{h}_{D^2} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1^* & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad h_{D^2} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1^* \end{bmatrix}$$

$$\tilde{h}_{D^3} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1^* & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad h_{D^3} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1^* \end{bmatrix}$$

[8]

The components denoted by * in Eq. 8 represent the locations of the filters in convolution operated image. This means, for the four filters \tilde{h}_x , $x = A, D^1, D^2, D^3$ the convolution outputs $O_{\tilde{h}_x}(x, y)$ are:

$$O_{\tilde{h}_x}(x, y) = \sum_{n=0}^1 \sum_{m=0}^1 f(x+m, y+n) \cdot \tilde{h}_x(m, n)$$

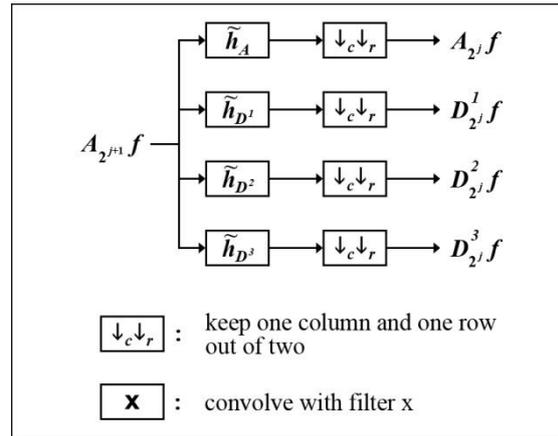
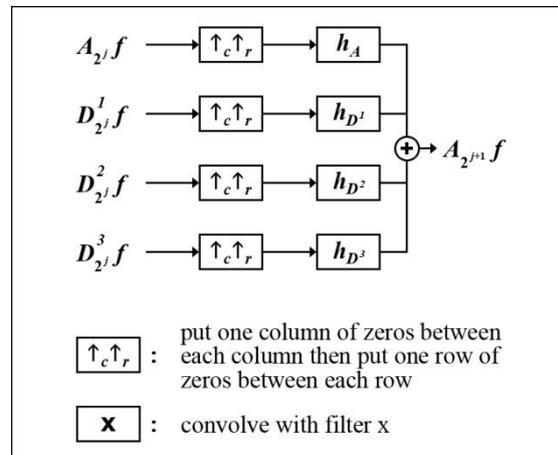
$$\begin{aligned}
 O_{\tilde{h}_x}(x, y) &= f(x, y) \cdot \tilde{h}_x(0,0) \\
 &\quad + f(x, y+1) \cdot \tilde{h}_x(0,1) \\
 &\quad + f(x+1, y) \cdot \tilde{h}_x(1,0) \\
 &\quad + f(x+1, y+1) \cdot \tilde{h}_x(1,1) \quad [9]
 \end{aligned}$$

The convolution outputs $O_{h_x}(x, y)$ respective to the filters h_x , $x = A, D^1, D^2, D^3$, are:

$$O_{h_x}(x, y) = \sum_{n=0}^1 \sum_{m=0}^1 f(x+m-1, y+n-1) \cdot h_x(m, n)$$

$$\begin{aligned}
 O_{h_x}(x, y) &= f(x-1, y-1) \cdot h_x(0,0) \\
 &\quad + f(x, y-1) \cdot h_x(1,0) \\
 &\quad + f(x-1, y) \cdot h_x(0,1) \\
 &\quad + f(x, y) \cdot h_x(1,1) \quad [10]
 \end{aligned}$$

The block diagrams of decomposition and reconstruction algorithms are shown in Fig. 4 and Fig. 5 respectively.


Fig. 4: Block diagram of image wavelet transform algorithm

Fig. 5: Block diagram of image reconstruction algorithm

One advantage of this algorithm is that there is no error in the reconstructed image [Zhou and Dorner, 1994]. It is useful for matching in the hierarchy. Another advantage is fast speed. For a 512 x 512 image, the total time of 9 levels of decompositions and reconstructions takes only 0.3 seconds. Fig. 6 shows an original Mars VIKING remote sensing image. Fig. 7 shows a 3 level decomposition image following the pyramid structure in Fig. 3. Fig. 8 shows the same decomposition image but with linear stretch of gray levels in the three detail subbands. Fig. 9 shows the reconstructed image.

3. The rotating and Wavelets Weighting Laplacian Variance Matching Algorithm

As described in Section 1, LSM first needs quite accurate approximation of the patches in the left and right images. The algorithm presented in this paper attempts to get coarse global matching and to reach the approximation based on the wavelet transform described in the above section.

Normally, the remote sensing stereo images partly overlap each other as shown in Fig. 10.

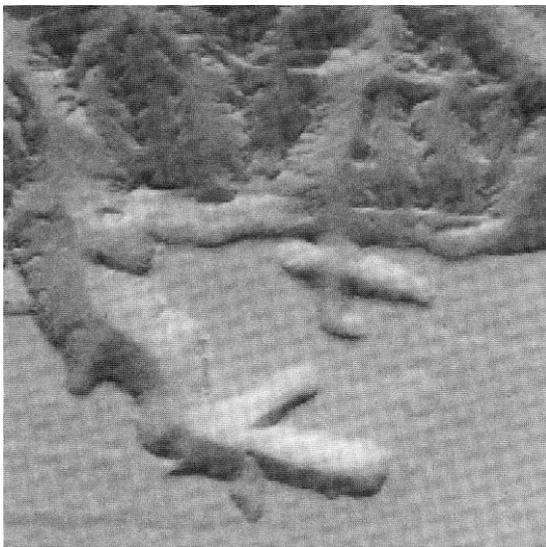


Fig. 6: An original Mars remote sensing image



Fig. 7: 3 levels decomposition image

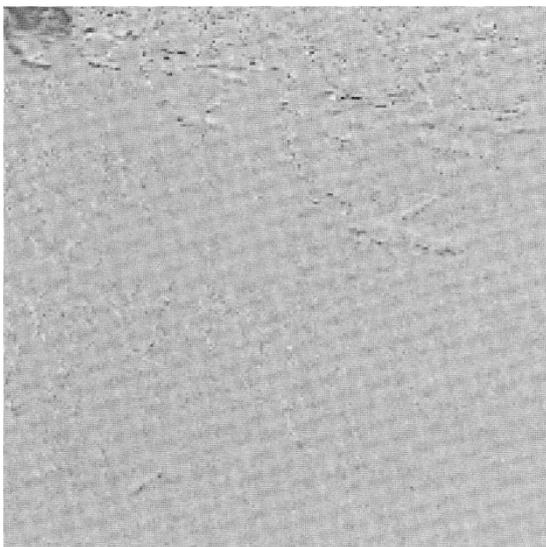


Fig. 8: Linear stretch of gray levels in the three detail subband

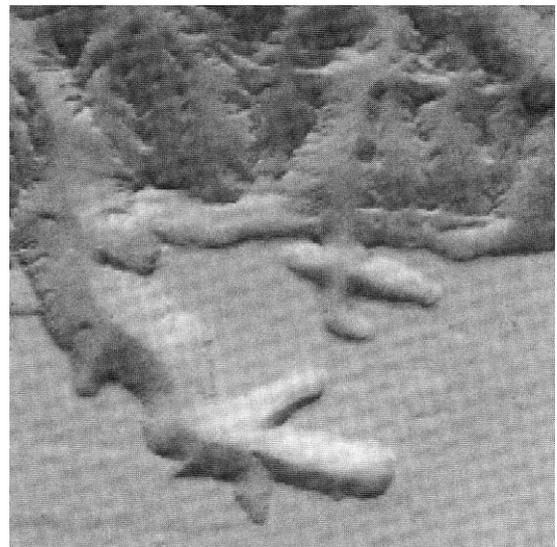


Fig. 9: Reconstructed image

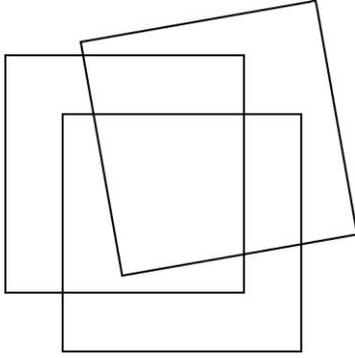


Fig. 10: Example of overlapping images

One problem is to register the overlapping areas in the stereo pairs automatically. As is well known, there are disparities between the stereo pairs, such as the radiometric and geometric differences. These differences are mainly effected by the following factors: illumination, reflectivity, geometry, the position and properties of the sensor [Marr, 1979]. Many matching applications suffer from the fact that the two overlapping images have different orientations (geometric difference). Thus, all the existing methods based on signal matching are not rotation invariant [Lemmens, 1988].

For human eyes, it may be not difficult to find the coarse match area in two overlapping images. If two overlapping images were transparent, one may register the match area by manual work in the following way: first put one image over the other, then move and rotate both, or one against the other, until the difference of the overlaying part is minimized.

The algorithm of this paper is developed by means of simulating the manual work described above. It is done by shifting and rotating one image relative to the other and measuring the similarities between the two images in all possible overlapping cases (see Fig. 11).

There exist several algorithms for similarity measure: Least Squares Measure, cross correlation measure, Laplacian variance measure, etc.. The simplest one is the Laplacian variance measure [Hannah, 1989; Lemmens, 1988]:

$$R^{ts}(x, y) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g^t(m, n) - g_{x,y}^s(m, n)| \quad [11]$$

where $g^t(m, n)$ and $g_{x,y}^s(m, n)$, $m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$, are the target (template) in the left image and the search area in right image respectively. (x, y) are the lower-right coordinates of the

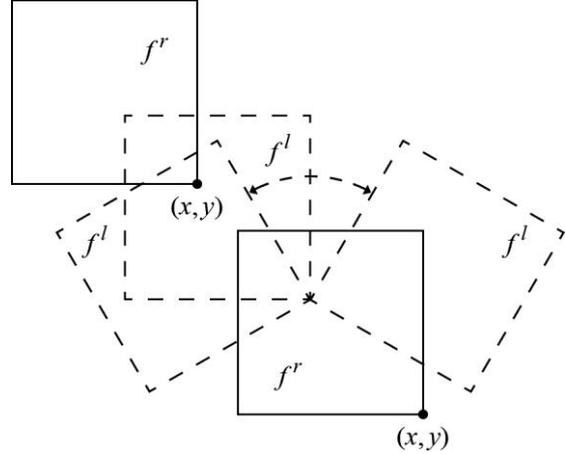


Fig. 11: Search the match area by rotating left image f^l and shifting right image f^r

search area. Eq. 11 counts the sum of absolute values of the differences. It can also be normalized by the mean values of the target and search areas:

$$R^{ts}(x, y) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g^t(m, n) - \bar{g}^t - g_{x,y}^s(m, n) + \bar{g}_{x,y}^s| \quad [12]$$

where \bar{g}^t and $\bar{g}_{x,y}^s$ are the mean values of g^t and $g_{x,y}^s$ respectively.

Obviously, Eq. 11 and Eq. 12 give only rotation dependent local similarity measures. For the global and rotation invariant match at resolution 2^j of the image pyramid, Eq. 11 is modified to:

$$R_{A_{2^j}}^{lr}(x, y, \theta) = \frac{1}{S} \cdot \sum_{(m,n) \in O} |A_{2^j} f_{\theta}^l(m', n') - A_{2^j} f^r(m + M - x, n + N - y) + \overline{A_{2^j} f^r} - \overline{A_{2^j} f^l}| \quad [13]$$

where $A_{2^j} f^l$ and $A_{2^j} f^r$ are the left and right approximate images at 2^j resolution respectively, (x, y) are the lower-right coordinates of right image relative to the left, θ is the rotating angle, (m', n') are the rotated coordinates of (m, n) with $m' = m \cdot \cos \theta - n \cdot \sin \theta$ and $n' = m \cdot \sin \theta + n \cdot \cos \theta$, $\overline{A_{2^j} f^l}$ and $\overline{A_{2^j} f^r}$ are the mean values of left and right images respectively, S is the total number of elements in O , O is the set of overlapping pixels:

$$\begin{aligned} O = \{ (m, n) \mid & 0 \leq m' < M \\ & \cap 0 \leq n' < N \\ & \cap 0 \leq m + M - x < M \\ & \cap 0 \leq n + N - y < N \} \end{aligned} \quad [14]$$

It is known that the edge information plays an important role in computational theories on human stereo vision [Marr and Poggio, 1979]. So a weight function $w(m, n)$ being proportional to the strength of edge is introduced in Eq. 13 to obtain Eq. 15:

$$R_{A_{2j}}^{lr}(x, y, \theta) = \frac{1}{S} \cdot \sum_{(m,n) \in O} w(m, n) \cdot |A_{2j}f_{\theta}^l(m', n') - A_{2j}f^r(m + M - x, n + N - y) + \overline{A_{2j}f^r} - \overline{A_{2j}f^l}| \quad [15]$$

where $w(m, n)$ is a weight function computed in Eq. 16. As the »detail images« D_{2j}^1f , D_{2j}^2f and D_{2j}^3f of the wavelets contain the edge information at resolution 2^j (see Section 2), the weight function $w(m, n)$ may be computed from them. Let $D_{2j}f^l$ and $D_{2j}f^r$ be the details at resolution 2^j of left and right images defined as:

$$D_{2j}f^l = D_{2j}^1f^l + D_{2j}^2f^l + D_{2j}^3f^l \quad [16]$$

$$D_{2j}f^r = D_{2j}^1f^r + D_{2j}^2f^r + D_{2j}^3f^r$$

then the weight function is obtained as:

$$w(m, n) = 1 + |D_{2j}f_{\theta}^l(m', n') - D_{2j}f^r(m + M - x, n + N - y)| \quad [17]$$

Eq. 17 means that if two points compared in Eq. 15 have same edge strength (normally being in the smooth area or at the match edge), the weight value will be 1. Otherwise, it will be larger than 1 (i.e. the comparison between points on an edge and in structureless area, for which there is no matching possibility). The larger weight values will increase the summation of differences to reduce the probability of erroneous matching. The introduced weight function $w(m, n)$, which favours the similarity measure at edge locations, makes Eq. 15 having more or less the effect of the combination of area-based and feature-based matching methods. Therefore, Eq. 15 combines both the advantage of area-based algorithms and of feature-based algorithms. The first makes use of all the local data and the second takes the structures (i.e. edges) under concern.

In order to reduce the calculation of rotation, two look-up tables are calculated firstly:

$$T_{m'}(m, n) = m \cdot \cos \theta - n \cdot \sin \theta \quad [18]$$

$$T_{n'}(m, n) = m \cdot \sin \theta - n \cdot \cos \theta$$

Then Eq. 15 and Eq. 17 become:

$$R_{A_{2j}}^{lr}(x, y, \theta) = \frac{1}{S} \cdot \sum_{(m,n) \in O} w(m, n) \cdot |A_{2j}f_{\theta}^l(T_{m'}(m, n), T_{n'}(m, n)) - A_{2j}f^r(m + M - x, n + N - y) + \overline{A_{2j}f^r} - \overline{A_{2j}f^l}| \quad [19]$$

$$w(m, n) = 1 + |D_{2j}f^l(T_{m'}(m, n), T_{n'}(m, n)) - D_{2j}f^r(m + M - x, n + N - y)| \quad [20]$$

Thus for all shifts (x, y) , the rotated coordinates are obtained simply by look-up operations.

The shift coordinate (x, y) and rotating angle θ satisfying Eq. 21, for which the largest similarity (or minimized value of $R_{A_{2j}}^{lr}(x, y, \theta)$) is calculated, are taken as the corresponding matched position and orientation of two images.

$$R_{A_{2j}}^{lr}(x, y, \theta) < R_{A_{2j}}^{lr}(x', y', \theta') \quad [21]$$

with $x \neq x'$, $y \neq y'$, $\theta \neq \theta'$

The task to search for (x, y, θ) satisfying Eq. 21 is carried out through the pyramid hierarchy of wavelet transform. The algorithm can be described as follows:

- The image multiresolution pyramids of left and right images are generated by means of the wavelet transform in Section 2.
- Start matching at the highest level of the pyramids by using Eq. 19 and Eq. 21. As there is no prior information, the search range should be as wide as possible. Suppose the image size of the highest level is $M \times N$. In order to guarantee a proper result, the overlapping area must be made large enough. Thus the search range of position starts from $(\Delta x \times \Delta y)$ to $(2 \cdot M - \Delta x, 2 \cdot N - \Delta y)$ with $\Delta x \times \Delta y$ being the number of minimum pixels. The search range of angle can be $\pm \Delta \theta$, which is dependent on the orientation of the stereo pairs.
- The matching operation is performed successively down to the second lowest level of the hierarchy (the lowest level is original image). The prior information gained from higher level

is used to guide matching at the present level to reduce the search range. Let x_{j+1} , y_{j+1} and θ_{j+1} be the match results at level $j + 1$, the search range at level j only takes a small range around these results. For example, the search range may be chosen as: $x_{j+1} \pm 2$, $y_{j+1} \pm 2$, $\theta_{j+1} \pm j$ (consider that the scale ratio between two levels is 2 and the orientation difference is mainly detected at the highest level).

- The last matching search is carried out between the original image pairs. As there is no wavelet subbands for the calculation of weight function, Eq. 13 is used to measure the similarity instead of Eq. 19.
- The match area is calculated based on (x_1, y_1, θ_1) , which are obtained from the last search in original image pairs. Fig. 12 shows that knowing the size (in x and y) of both images one can calculate the shaded area from the knowledge of x_1 , y_1 , and θ_1 , using simple geometric method.

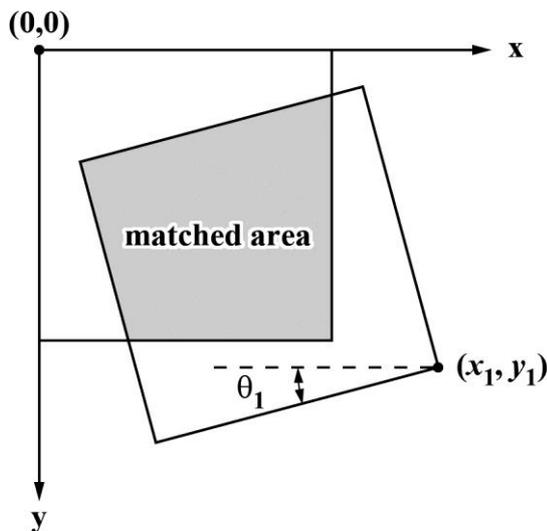


Fig. 12: Matched area

At last, the relative pixel pairs in the matched area are then taken as the corresponding matched point pairs. The reader might think that this algorithm is time consuming. But the computation time is dependent on the image size and the magnitude of rotation angles taken into account. As in image pyramid, the image size of highest level is many times reduced, say to 16×16 , and only a small range of rotation is taken into account, the computation time should be acceptable (see next section).

4. Experiments and Conclusion

The matching algorithm was tested with ten stereo pairs of remote sensing images of Mars (VIKING imagery). The VIKING image size is 1204×1056 . In the experiments, the interesting parts with size 512×512 were copied as working images. Six levels image multiresolution pyramids (including the original image level) based on wavelet transform were obtained. At highest level, the image size was 16×16 . The search range for shifts of the low-right point of right image started from the coordinate $(5,5)$ to $(27,27)$. The search range for rotation is set to $\pm 30^\circ$. Normally this is enough for most remote sensing images. At the subsequent levels j , the shift search range was ± 2 around the matched position (x_{j+1}, y_{j+1}) obtained from the previous level $j + 1$. The rotation search range is $\theta_{j+1} \pm j$ ($j = 5, 4, 3, 2, 1$ from the second higher level to the original image level).

These experiments showed that good results are obtained always for the images containing more or less structures, and also for different orientations. Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 show the match results. Fig. 13 contains complex structures, which Fig. 14 does not contain. In Fig. 15, in order to simulate the case of different orientation, image VIKING / 65 A 08 was firstly rotated by 25° as left image, then matched with right image VIKING / 65 A 10. The frames in the images denote the match area, the small crosses are the corresponding pixel pairs sampled in a fixed spatial interval to show the matching precision. By manual checking on the eight times zoomed resulting images, the match precision was equal or less than two pixels. On the SUN SPARC system 10 workstation (within a local area network, with a disc mounted from another SUN SPARC station 2), the computation time, including wavelet transform, reconstruction and matching, takes about two minutes.

In different applications, different matching precisions are required. As the aim of this algorithm is for automatic global approximate matching, the matching precision may not be satisfying in some applications. If high matching precision is needed, based on the results of this algorithm one can successively perform the least squares matching.

As all of the area based algorithms, the algorithm described in this paper is not scale in variant and does not satisfy the case of too many occlusions in the images, also it may cause pronounced match if the image is very smooth. But, unlike area based algorithm, this algorithm is invariant to rotations.

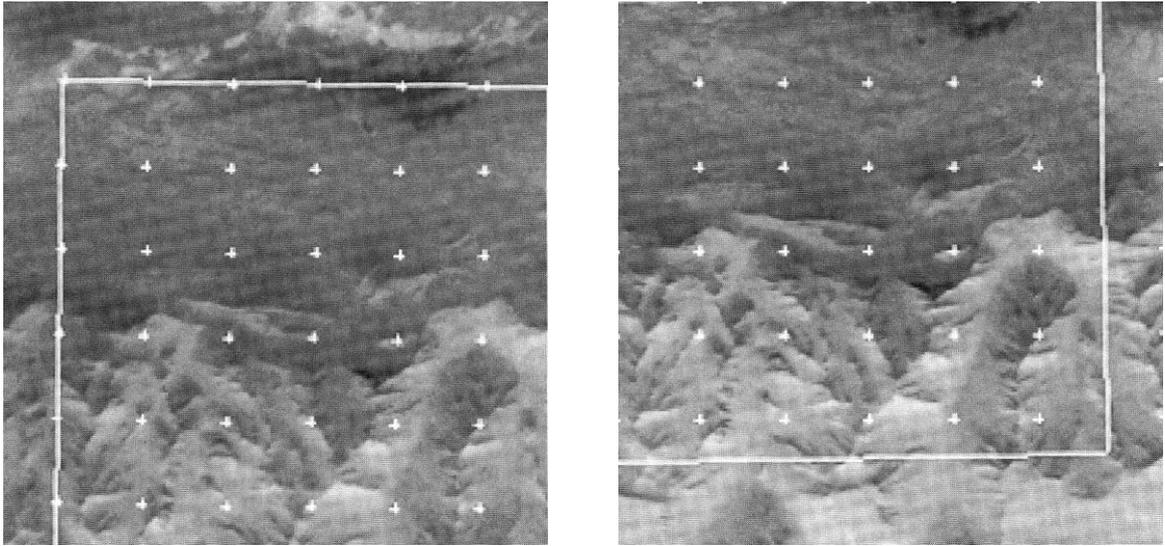


Fig. 13: Match result of the images: VIKING / 65 A 13 (left) and VIKING / 65 A 14 (right)

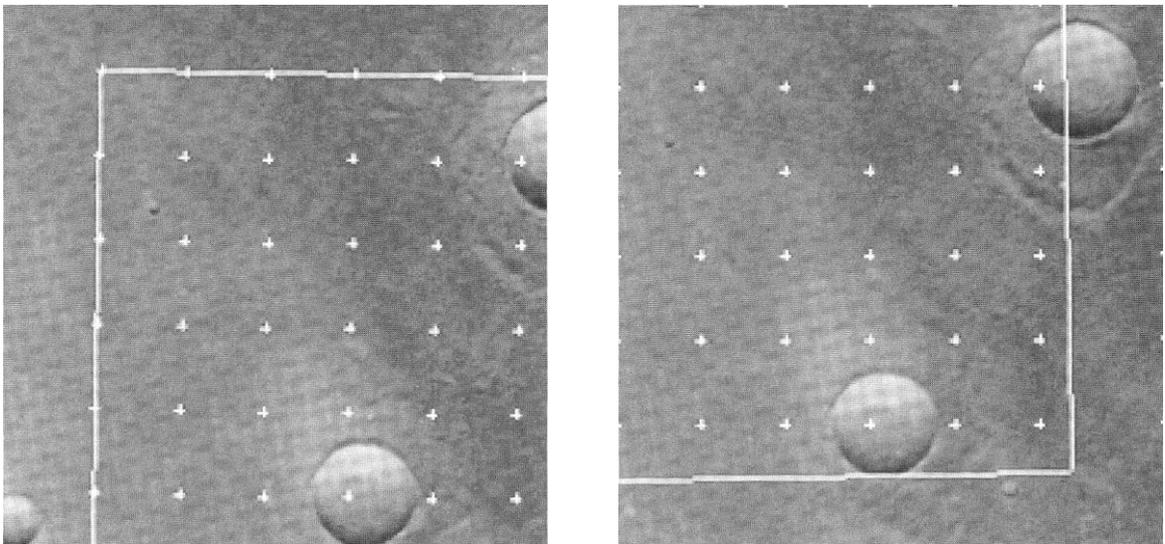


Fig. 14: Match result of the images: VIKING / 66 A 02 (left) and VIKING / 66 A 04 (right)

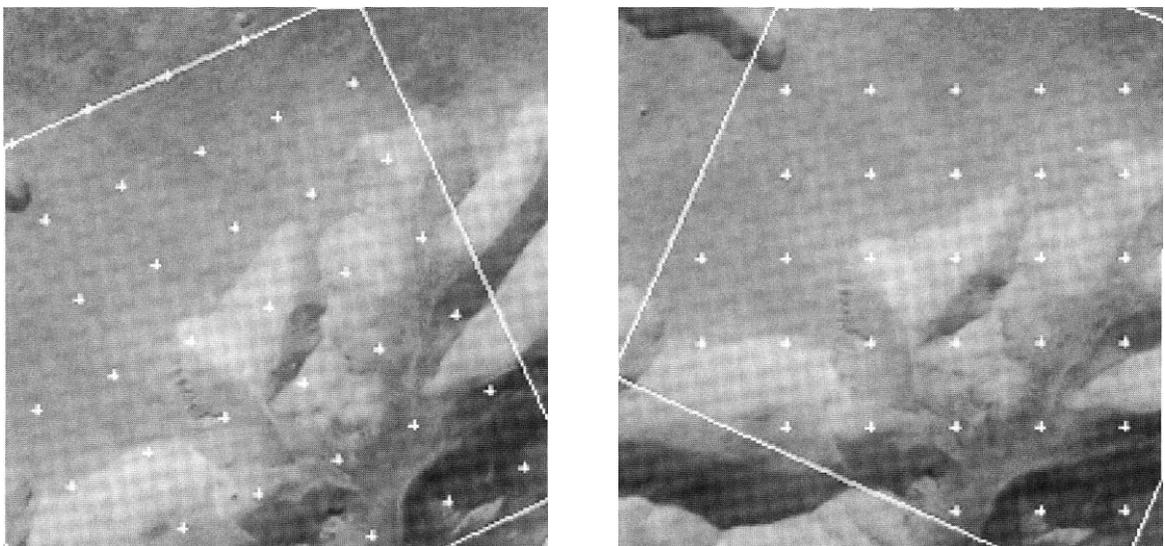


Fig. 15: Match result of the images: VIKING / 65 A 08 (left) and VIKING / 65 A 10 (right)

5. Acknowledgements

This work is part of the research work as a guest professor supported by DFG. The support is here gratefully acknowledged. The author would like to thank Prof. Dr.-Ing. E. Dorrer for a lot of help and useful discussions.

References

- Ackermann, F. [1984]:* Digital image correlation: performance and potential applications in photogrammetry. *Photogrammetric Record*, Vol. 11, No. 64, London, pp. 429-439
- Ackermann, F., and Hahn, M. [1991]:* Image pyramids for digital photogrammetry. - In: *Ebner, H. (Ed.): Digital Photogrammetric Systems*. Wichmann, Karlsruhe, pp. 43-58
- Barnea, D., and Silverman, H. [1972]:* A class of algorithms for fast digital image registration. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-21, No. 2, New York, pp. 178-186
- Burt, P., and Adelson, E. [1983]:* The Laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-31, New York, pp. 532-540
- Cucka, P., and Rosenfeld, A. [1992]:* Linear feature compatibility for pattern-matching relaxation. *Pattern Recognition*, Vol. 25, No. 2, Oxford, pp. 189-196
- Daubechies, I. [1988]:* Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 49, New York, pp. 909-996
- Förstner, W. [1982]:* On the Geometric precision of digital correlation. *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium 1982*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, Part 3, pp. 176-189
- Förstner, W. [1986]:* A feature based correspondence algorithm for image matching. *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium*, August 19-22, 1986, Rovaniemi, Finland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 3.3, Rovaniemi, pp. 150-166
- Grossmann, A., and Morlet, J. [1984]:* Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 15, Philadelphia, pp. 723-736
- Grün, A. [1985]:* Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14, No. 3, Newlands, pp. 175-187
- Hannah, M. [1989]:* A system for digital stereo image matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 12, Falls Church, VA., pp. 1765-1770
- Lemmens, M. [1988]:* A survey on stereo matching techniques. *Proceedings of the 16th International ISPRS Congress, Commission V*, Kyoto, Japan, 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 8, Kyoto, pp. V/11-V/23
- Mallat, S. [1989]:* A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-11, No. 7, New York, pp. 674-693
- Marr, D., and Poggio, T. [1979]:* A theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, Vol. 204, London, pp. 301-328
- Murtagh, F. [1992]:* A feature-based $O(N^2)$ approach to point matching. *Proceedings of the 11th International Conference on Pattern Recognition*, The Hague, Sept. I - 4, 1992, Vol. B, The Hague, pp. 174-177
- Otto, G., and Chau, T. [1989]:* "Region-growing" algorithm for matching of terrain images. *Image and Vision Computing*, Vol. 7, No. 2, Haywards Heath, Sussex, pp. 83-94
- Papanikolaou, K., and Derenyi, E. [1988]:* Structural matching of digital images and terrain models. *Proceedings of the 16th International ISPRS Congress, Commission III*, Kyoto, Japan, 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 3, Kyoto, pp. 669-678
- Rosenholm, D. [1986]:* Accuracy improvement of digital matching for evaluation of digital terrain models. *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium*, August 19-22, 1986, Rovaniemi, Finland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 3.2, Rovaniemi, pp. 573-587
- Shapiro, L., and Haralick, R. [1987]:* Relational matching. *Applied Optics*, Vol. 26, New York, pp. 1845-1851

Zhou, X., and Dorrer, E. [1994]: A non-error reconstruction of multiresolution discrete wavelet representation and its fast algorithm. Proceedings "Wavelet Applications" (Ed. H. H. Szu), Orlando, SPIE Vol. 2242, Bellingham, Washington/USA, pp. 236-247

Zong, J., Li, J., and Schenk, T. [1992]: Aerial image matching based on zero-crossing. Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission III, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B 3, Washington D.C., pp. 144-150

Anhang

Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer

1. **Der Einfluß von Modelldrehungen auf die Orientierungselemente in photogrammetrischen Auswertegeräten.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 30. Jahrgang, Heft 2, Karlsruhe, 1962, S. 71-75
2. **Präzisionswinkelmessung in der Antarktis.**
Zeitschrift für Polarforschung, 33. Jahrgang, Band 5, Heft 1-2, Goslar, 1963, S. 188-190
3. **Photogrammetrische Gletschermessungen in Norwegen.** Zur Kartenbeilage Tunsbergdalsbre mit den Gletscheränderungen seit Finsterwalders Aufnahme 1937.
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 71. Jahrgang, Heft 11, Karlsruhe, 1964, S. 425-432
[zusammen mit *W. Kick*]
4. **Algorithm 240: Coordinates on an Ellipsoid**
Communications of the ACM, Vol. 7, No. 9, Baltimore, 1964, S. 546
5. **The Ross Ice Shelf Survey (RISS) 1962-1963.**
Antarctic Research Series, Vol. 2, American Geophysical Union, Publication No. 1197, Washington D. C., 1964, S. 83-118
[zusammen mit *W. Hofmann* und *K. Nottarp*]
6. **Präzisionswinkelmessung bei der Ross-Ice-Shelf-Survey-Expedition 1962-63.**
Zeitschrift für Vermessungswesen, 90. Jahrgang, Heft 4, Stuttgart, 1965, S. 125-128
7. **Eine allgemeine numerische Lösung der ersten geodätischen Hauptaufgabe.**
Zeitschrift für Vermessungswesen, 90. Jahrgang, Heft 10, Stuttgart, 1965, S. 348-351
8. **Direkte numerische Lösung der geodätischen Hauptaufgaben auf Rotationsflächen.**
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 90, Bayerische Akademie der Wissenschaften / Verlag Beck in Komm., München, 1966, 75 S.
9. **Bericht über den Kurs für Hochgebirgs- und Polarforschung in Obergurgl, September 1966.**
Zeitschrift für Vermessungswesen, 92. Jahrgang, Heft 4, Stuttgart, 1967, S. 149-151
10. **Die Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit ausgedehnter Gletschergebiete.** Ein Beitrag zur Erfassung horizontaler Bodenbewegungen mit geodätischen Methoden.
Zeitschrift für Vermessungswesen, 92. Jahrgang, Heft 5, Stuttgart, 1967, S. 183-189
11. **Bericht über „Papers Presented at the Symposium on Glacier Mapping, Ottawa 1965“.**
Zeitschrift für Vermessungswesen, 92. Jahrgang, Heft 6, Stuttgart, 1967, S. 235-236
12. **Algorithm 322: F-Distribution**
Communications of the ACM, Vol. 11, Baltimore, 1968, S. 116
13. **Bericht über das Symposium über rechnende Photogrammetrie vom 4.-8. Dezember 1967 in Gaithersburg, Maryland, USA.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 36. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, 1968, S. 163-170
14. **Geodetic Results of the Ross Ice Shelf Survey Expeditions, 1962-63 and 1965-66.**
Journal of Glaciology, Vol. 8, Cambridge, 1969, S. 67-90
[zusammen mit *W. Hofmann* und *W. Seufert*]
15. **Applications of Photogrammetry in Mining Surveying**
The Canadian Surveyor, Vol. 24, No. 1, Ottawa, 1970, S. 76-85
16. **Movement Determination of the Ross Ice Shelf, Antarctica**
International Association of Scientific Hydrology, Publications No. 86, Gent/Brügge, 1970, S. 467-471
17. **Stereoplotter and Desk Computer in Open-loop System**
Proceedings of the 1970 ASP Symposium on Computational Photogrammetry, January, 7.-9, 1970, Alexandria, VA., USA. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA., 1970
18. **Utilization of Complex Numbers in Block Adjustment**
Proceedings of the 1970 ASP Symposium on Computational Photogrammetry, January, 7.-9, 1970, Alexandria, VA., USA. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA., 1970

- 19. Stereoauswertegerät und Tischrechner.**
Zeitschrift für Vermessungswesen, 96. Jahrgang, Heft 4, Stuttgart, 1971, S. 138-149
[zusammen mit C. K. Wong]
- 20. Movement of the Ward Hunt Ice Shelf, Ellesmere Island, N.W.T., Canada.**
Journal of Glaciology, Vol. 10, No. 59, Cambridge, 1971, S. 211-225
- 21. Complex Numbers for Block Adjustment.**
Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 1, Falls Church, VA., 1971, S. 85-98
- 22. Geodätische Geschwindigkeitsbestimmungen auf dem Ross-Schelfeis in der Antarktis.** Ein Beitrag zur Messung und Berechnung eines Polygonzuges auf beweglichem Untergrund.
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 181, Bayerische Akademie der Wissenschaften / Verlag Beck in Komm., München, 1971, 65 S.
[zusammen mit W. Hofmann, K. Nottarp und W. Seufert]
- 23. Computer Simulation of Analogue Stereoplotters.**
Proceedings of the 37th Annual Meeting of ASPRS, March 1971, Washington D.C., USA. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA., 1971, S. 650-667
- 24. Micro- and Mini-Computers in Photogrammetry.**
Proceedings of the FIG Meeting, Tel Aviv, June 1972. Tel Aviv, 1972, S. 279-317
- 25. Report on the "Discussion on Man-Machine Interface in Photogrammetry", Fredericton, N.B., Canada, August 7-9, 1972.**
Photogrammetria, Vol. 28, Amsterdam, 1972, S. 201-203
- 26. Symposien über rechnende Photogrammetrie der Amerikanischen Gesellschaft für Photogrammetrie.** Ein Bericht.
Bildmessung und Luftbildwesen, 41. Jahrgang, Karlsruhe, 1973, Heft 1, S. 29-33, Heft 2, S. 57-62, Heft 3, S. 84-90
- 27. Proceedings of the "Discussion on Man-Machine Interface in Photogrammetry", Fredericton, N.B., Canada, August 7-9, 1972.**
University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., 1973, 206 S.
[Herausgeber]
- 28. Low - Cost Online Photogrammetry.**
Proceedings of the "Discussion on Man-Machine Interface in Photogrammetry", Fredericton, N.B., Canada, August 7-9, 1972. University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., 1973, S. 148-168
- 29. Testing and Calibration of Photogrammetric Instruments.**
Lecture Notes No. 29. University of New Brunswick, Department of Surveying Engineering, Fredericton, N.B., 1973
- 30. Plotter Interfaced with a Calculator.**
Photogrammetric Engineering, Vol. 39, No. 10, Falls Church, VA., 1973, S. 1065-1076
[zusammen mit B. Kurz]
- 31. Digital Simulation of Mechanical Stereoplotters.**
Photogrammetria, Vol. 29, Amsterdam, 1973, S. 63-76
[zusammen mit K. H. Mostafa]
- 32. 34. Photogrammetrische Woche vom 10.-15.9.1973 in Stuttgart.** Ein Bericht.
Bildmessung und Luftbildwesen, 41. Jahrgang, Heft 6, Karlsruhe, 1973, S. 202-205
- 33. Gegenwärtiger Stand und Tendenzen der Digitalisierung in der Photogrammetrie.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 42. Jahrgang, Karlsruhe, 1974, Heft 2, S. 34-39, Heft 3, S. 94-96
- 34. Arbeitskreis „Numerische Photogrammetrie“. 2. Tagung am 6./7. Juni 1974 in Frankfurt.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 42. Jahrgang, Heft 5, Karlsruhe, 1974, S. 178-179
[zusammen mit M. Stephani]
- 35. Analog to Hybrid Stereoplotter.**
Photogrammetric Engineering, Vol. 40, No. 3, Washington D.C., 1974, S. 271-280
[zusammen mit E. Lander und K. V. Toraskar]
- 36. Gedanken zum digitalen Geländemodell.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 43. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, 1975, S. 90-91
- 37. Contribution to a General Stereoscopic Block Analytical Aerotriangulation.**
Proceedings of the ISP Commission III Symposium, Stuttgart, Sept. 1973. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 214, Bayerische Akademie der Wissenschaften / Verlag Beck in Komm., München, 1975, S. 125-136

- 38. Online Instrument Testing and Orientation Procedures.**
Proceedings of 41st ASP Annual Meeting, March 9-14, 1975, Washington D.C., American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1975, S. 112-121
[zusammen mit *V. Tsvos*]
- 39. Rechnergestützte Stereokartierung – Aufgaben, Rechenprogramme, Erfahrungen.**
Vorträge der 35. Photogrammetrischen Woche, September 1975 in Stuttgart. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 2, Stuttgart, 1976, S. 181-191
- 40. Climatological and Photogrammetric Speculations on Mass-Blance Changes of McCall Glacier, Brooks Range, Alaska.**
Journal of Glaciology, Vol. 17, No. 77, Cambridge, 1976, S. 479-490
[zusammen mit *G. Wendler*]
- 41. Software Aspects in Desk-Top Computer-Assisted Stereoplotting.**
Photogrammetria, Vol. 33, Amsterdam, 1977, S. 1-18
- 42. The Impact of Digital Image Processing on Photogrammetry and Cartography: Present Realities, Future Potentials.**
Proceedings of the Image Processing Symposium. Mitteilungen der Geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 29, Graz, 1977, S. 41-45
- 43. Proceedings “Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems”.** Workshop held in Munich, Federal Republic of Germany, 1-2 June 1977.
Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 2, Neubiberg, 1978, 181 S.
[Herausgeber, zusammen mit *A. Chrzanowski*, unter Mitwirkung von *J. McLaughlin*]
- 44. Effect of Aircraft Attitude Changes on Image Geometry of Linear Array Sensors.**
Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II, Heft 36, Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main, 1978, S. 67-77
- 45. A Contribution to Sequential Online Aerial Triangulation.**
Paper presented at ISP Commission III Symposium, Moscow, July 31 to August 3, 1978. 7 S.
- 46. Programming Language APL and its Potential for Computational Photogrammetry.**
Report of the National Research Council of Canada, Publications No. NRC-18004, P PR-50, Ottawa, 1979, 80 S.
- 47. Suffix and Tensor Notation for Analytical Photogrammetry.**
Manuscripta Geodaetica, Vol. 5, Nr. 1, Berlin, 1980, S. 91-143
- 48. Analytische Photogrammetrie und APL.**
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 87. Jahrgang, Heft 6, Karlsruhe, 1980, S. 237-246
- 49. Elementardrehwinkel einer Orthogonalmatrix.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 49. Jahrgang, Heft 2, Karlsruhe, 1981, S. 50-54
- 50. Real Time Orientation as Integral Part of Online Analytical Aerial Triangulation.**
Photogrammetria, Vol. 36, Amsterdam, 1981, S. 111-118
- 51. Tagung des Arbeitskreises Numerische Photogrammetrie am 19. November 1981 in München.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 50. Jahrgang, Heft 4, Karlsruhe, 1982, S. 122-123
- 52. Applications of APL to Numerical Computations in Analytical Photogrammetry.**
Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium „Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control“, Helsinki, June 7-11, 1982. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, Part B3, Helsinki, 1982, S. 97-113
- 53. Ergonomische Aspekte der On-Line Aero-triangulation.**
Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium „Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control“, Helsinki, June 7-11, 1982. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, Part B3, Helsinki, 1982, S. 563-575
[zusammen mit *F. S. Kröll*]
- 54. Desirable Extensions to APL for Handling Numerical Multidimensional Arrays.**
Proceedings of the APL-82 Conference. APL Quote Quad, Vol. 13, No. 1, New York, 1982, S. 90-95
- 55. An Interactive Single-User Computer Graphics Supported Stereocompilation System.**

- Proceedings of the ISPRS Commission IV Symposium, Crystal City, VA., August 25-28, 1982. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, Part B4, Falls Church, VA., 1982, S. 179-189
[zusammen mit *M. T. Erez* und *R. Tille*]
- 56. APL – Modernes Hilfsmittel für Geodäsie und Photogrammetrie?**
Berichte über die Vollsitzung der Deutschen Geodätischen Kommission, München, 28./29. Oktober 1982. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften / Verlag Beck in Komm., München, 1983, S. 176-206
- 57. Photogrammetric Stereocompilation Supported by Interactive Computer Graphics.**
Proceedings of the International Conference Eurographics '83, Zagreb, Yugoslavia, 31 August - 2 September, 1983. Zagreb, 1983, S. 145-156
- 58. Photogrammetric Data Acquisition Using an Interactive Computer Graphics System.**
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 2, Washington D.C., 1984, S. 183-188
[zusammen mit *M. T. Erez*]
- 59. Ein einfaches GDV-gestütztes Stereoauswertesystem.**
Bildmessung und Luftbildwesen, 52. Jahrgang, Heft 1, Karlsruhe, 1984, S. 13-22
[zusammen mit *M. T. Erez* und *R. Tille*]
- 60. Operational Aspects of On-Line Phototriangulation.**
Proceedings of the 15th International ISPRS Congress, Rio de Janeiro, 1984. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 25, Part A8a, Rio de Janeiro, 1984, S. 195-237
- 61. Operational Aspects of On-Line Phototriangulation.**
Photogrammetria, Vol. 40, No. 3, Amsterdam, 1986, S. 257-298
- 62. From Tensor and Suffix Notation to APL.**
APL Quote Quad, Vol. 16, No. 4, New York, 1986, S. 59-64
- 63. Precision Analytical Underwater Photogrammetry.**
Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Ottawa, 1986. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 5, Ottawa, 1986, S. 176-184
- 64. Motografie: Symposium 11./12. März 1986.**
Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 23, Neubiberg, 1987, 280 S.
[Herausgeber, zusammen mit *J. Peipe*]
- 65. Motografie und Photogrammetrie.**
In: *Dorrer, E., Peipe, J. (Hrsg.): Motografie: Symposium 11./12. März 1986.* Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 23, Neubiberg, 1987, S. 7-41
- 66. GPS-gestützte Aerophotogrammetrie. Grundlegendes und Experimente.**
Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 86. Jahrgang, Heft 11, Olten, 1988, S. 595-604
- 67. Experiments with GPS-supported Aerotriangulation.**
Proceedings of the Symposium on Instrumentation Theory and Analysis for Integrated Geodesy, Sopron, Hungary, 16.-20. May 1988, Vol. 2, Sopron, 1988, S. 75-91
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 68. Experimental GPS-supported Aerial Triangulation.**
Proceedings of the 16th International ISPRS Congress, Commission I, Kyoto, 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B9, Supplement, Kyoto, 1988, S. I-80-I-91
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 69. Current Status of On-Line Point Positioning in Commercial Systems.**
Proceedings of the 16th International ISPRS Congress, Commission III, Kyoto, 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B11, Supplement, Kyoto, 1988, S. III/450-455
- 70. Deformationsmessung mit Hilfe der Motografie.**
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 96. Jahrgang, Heft 10, Karlsruhe, 1989, S. 366-372
[zusammen mit *J. Peipe*]
- 71. APL – Ideale Mensch-Maschine-Schnittstelle.**
In: *Köberle, G., Wagner, B. und Zebisch, H.-J. (Hrsg.): Computer und Ausbildung. Ingenieurqualifikation für das Jahr 2000, Band 2.* Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 1989, S. 75-82
- 72. Photogrammetrie.**
In: *Rohrbach, Chr. (Hrsg.): Handbuch für ex-*

- perimentelle Spannungsanalyse. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989, S. 419-428
[zusammen mit *J. Peipe*]
- 73. Zur Bildgeometrie von Landschaftsgemälden.** Bildanalysen am Beispiel zweier Gletschergemälde von Schlagintweit aus dem Jahre 1856.
In: Festschrift Wilhelm Kick. Acta Albertina Ratisbonensia, Regensburger Naturwissenschaften, Band 46, Regensburg, 1989, S. 29-38
- 74. Kinematic GPS and Aerial Triangulation – A Comparative Study.**
Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium on „Progress in Data Analysis“, 20.-25. May, 1990, Wuhan, China. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part 3.2, Wuhan, 1990, S. 107-131
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 75. Einsatz des GPS im kinematischen Modus zur Stützung photogrammetrischer Blöcke.**
In: *Schödlbauer, A. (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Teil I: Global Positioning System. Beiträge zum 22. DVW-Seminar, 12.-14. April 1989. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 38-1, Neubiberg, 1990, S. 163-183
[zusammen mit *G. W. Hein*]
- 76. German Canadian Experiment in Airborne INS-GPS Integration of Photogrammetric Applications.**
In: *Bock, Y., Leppard, N. (Eds.):* Global Positioning Systems: An Overview. IAG General Meeting, Edinburgh, August 7-8, 1989. Series of the International Association of Geodesy Symposia 102, Springer Verlag, Berlin/New York, 1990, S. 328-333
[zusammen mit *G. Baustert, M. E. Cannon, G. W. Hein, H. Krauss, H. Landau und P.-P. Schwarz*]
- 77. Current Status of On-Line Point Positioning in Commercial Photogrammetric Systems.**
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 45, No. 1, Washington D.C., 1990, S. 47-54
- 78. Die Pseudolinksinverse bei partitionierten Fehlergleichungssystemen.**
In: Festschrift Gottfried Konecny zum 60. Geburtstag. Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Heft 13, Hannover, 1990, S. 105-108
- 79. Ein entzerrtes Panoramamosaik der Südseite des Nanga-Parbat-Massivs.**
In: *Brunner, K., Ebner, H. (Hrsg.):* Festschrift für Rüdiger Finsterwalder zum 60. Geburtstag. Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München, München, 1990, S. 41-49
- 80. Bestimmung der Exzentrizität Kamera-Antenne in der GPS-gestützten Aerophotogrammetrie.**
Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 59. Jahrgang, Heft 3, Karlsruhe, 1991, S. 99-103
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 81. Aufgaben und Ziele der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung.**
Vermessungstechnik, 39. Jahrgang, Heft 4, Berlin, 1991, S. 110-113
- 82. Real Time Processing of MOMS-02 Linear Array Imagery for Analytical Stereo Restitution.**
Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission II, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B2, Washington D.C., 1992, S. 140-144
[zusammen mit *L. Hoch*]
- 83. Limits of KDGPS-Supported Aerial Triangulation for High Precision Point Determination.**
Proceedings of the 17th International ISPRS Congress, Commission I, Washington D.C., August 2-14, 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B1, Washington D.C., 1992, S. 254-259
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 84. Analoge und digitale photogrammetrische Koordinatenmeßtechnik.**
In: *Welsch, W. et al. (Hrsg.):* Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau. Schriftenreihe des DVW, Band 1/1992, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1992, S. 113-147
- 85. Aerotriangulation mit kinematischer GPS-Positionierung.** Experimente für kleinmaßstäbige Anwendungen.
Mitteilungsblatt des DVW-Bayern, 44. Jahrgang, Heft 2, München, 1992, S. 177-189
[zusammen mit *Chr. Schwiertz*]
- 86. Vorträge 12. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und Thüringer**

**Geodätentag, 14.-17. Oktober 1992, Jena:
Neue Horizonte in der Photogrammetrie
und Fernerkundung.**

Publikationen der Deutschen Gesellschaft für
Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 1,
Berlin, 1993, 404 S.

[Herausgeber]

**87. The School of Surveying Engineering at
Munich Bundeswehr University, Germany,
and Current Research Activities with
Particular Emphasis on Photogrammetry
and Remote Sensing.**

Moniterra, Rok VII, Jahrgang 76-77-78,
Nr. 10-11-12, Kraków, 1993, S. 19-24

**88. A Non-Error Reconstruction of Multireso-
lution Discrete Wavelet Representation
and its Fast Algorithm.**

Proceedings „Wavelet Applications“ (Hrsg.
H. H. Szu), Orlando/USA, SPIE Vol. 2242,
Bellingham/USA, 1994, S. 236-247

[zusammen mit *X. Zhou*]

**89. An Automatic Image Matching Algorithm
Based on Wavelet Decomposition.**

Proceedings of the ISPRS Commission III
Symposium on „Spatial Information from Di-
gital Photogrammetry and Computer Vision“,
5-9 September, 1994, München. International
Archives of Photogrammetry and Remote
Sensing, Vol. 30, Part 3/2, SPIE, Bellingham/
USA, 1994, S. 951-960

[zusammen mit *X. Zhou*]

Anschriften der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie
Straße des 17. Juni 135
D - 10623 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner

Universität der Bundeswehr München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary

Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr. Adam Chrzanowski

University of New Brunswick
Department of Surveying Engineering
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

J. Hughes Clarke

University of New Brunswick
Department of Geodesy and Geomatics
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

Prof. Eugene E. Derenyi

University of New Brunswick
Department of Surveying Engineering
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

Dr. Robert Ecker

Technische Universität Wien
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Gußhausstraße 25-209/122
A - 1040 Wien

Dr. Moshe T. Erez

Chief Photogrammetric Engineer
Survey of Israel
P.O. Box 14171
Tel-Aviv 61140
Israel

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Faig

University of New Brunswick
Faculty of Engineering
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Finsterwalder

Technische Universität München
Lehrstuhl für Kartographie und Reproduktionstechnik
Arcisstraße 21
D - 80290 München

Prof. Dr.-Ing. Günter W. Hein

Universität der Bundeswehr München
Institut für Erdmessung und Navigation
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr.-Ing. Hansbert Heister

Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Dipl.-Ing. Ludwig Hoch

Bayerische Vereinsbank AG
Lorenzer Platz
D - 90402 Nürnberg

Prof. Dr. Wilhelm Kick

Macheinerweg 35
D - 93051 Regensburg

Prof. Dr.-Ing. Gottfried Konecny

Universität Hannover
Institut für Photogrammetrie und Ingenieur-
vermessungen
Nienburger Straße 1
D - 30167 Hannover

Prof. Larry Mayer

University of New Brunswick
Department of Geodesy and Geomatics
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

Prof. Dr.-Ing. Karl Krauss

Technische Universität Wien
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Gußhausstraße 25-209/122
A - 1040 Wien

Dipl.-Ing. Jürgen Peipe

Universität der Bundeswehr München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr.-Ing. Friedrich S. Kröll

Universität der Bundeswehr München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr.-Ing., Dr. rer. Nat. h.c.

Heinz Schmidt-Falkenberg

Stresemannstraße 14
D - 61462 Königstein/Taunus

Prof. em. Dr.-Ing. Günther Kupfer

Mühlenviertel 8
Gimmersdorf
D - 53343 Wachtberg

Prof. Dr.-Ing. Albert Schödlbauer

Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D - 85577 Neubiberg

Prof. Dr. Bernd J. Kurz

University of New Brunswick
Faculty of Computer Science
P.O. Box 4400
Fredericton, N.B., E3B 5A3
Canada

Dr.-Ing. Christian Schwiertz

Bayerische Vereinsbank AG
Am Tucherpark 16
D - 80538 München

Dr.-Ing. Keren Li

Hansa Luftbild GmbH
Elbestraße 5
D - 48145 Münster

Dr.-Ing. Manfred Stephani

Technische Universität München
Lehrstuhl für Photogrammetrie
Arcisstraße 21
D - 80290 München

Prof. Dr.-Ing. Kennert Torlegård

University of Stockholm
The Royal Institute of Technology
Department of Geodesy and Photogrammetry
S - 10044 Stockholm

Dr. S. E. Masry

Universal Systems Ltd.
270, Rookwood Avenue
Fredericton, N.B., E3B 2M2
Canada

Dipl.-Ing. Bernhard Weber

Universität Bonn
Institut für Photogrammetrie
Nußallee 15
D - 53115 Bonn

Prof. Dr.-Ing. Walter M. Welsch
Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D-85577 Neubiberg

Prof. Xiuguang Zhou
Universität der Bundeswehr München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Werner-Heisenberg-Weg 35
D-85577 Neubiberg

Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

- 1/78 *A. Schödlbauer*: Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München. 53 S.; DM 10,-; vergriffen
- 2/78 *A. Chrzanowski and E. Dorrer (Eds.)*: Proceedings "Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems". Workshop held in Munich, 1-2 June 1977. 181 S.; DM 20,-
- 3/78 *W. Caspary und A. Geiger*: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. 62 S.; DM 10,-
- 4/79 *E. Baumann, W. Caspary, H. Dupraz, W. Niemeier, H. Peluer, E. Kuntz, G. Schmitt, W. Welsch*: Seminar über Deformationsanalysen. 106 S.; DM 15,-
- 5/81 *K. Torlegård*: Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. 68 S.; DM 10,-
- 6/82 *W. Caspary und W. Welsch (Hrsg.)*: Beiträge zur großräumigen Neutrassierung. 268 S.; DM 20,-
- 7/82 *K. Borre and W. M. Welsch (Eds.)*: Proceedings „Survey Control Networks“. Meeting of FIG-Study Group 5 B, Aalborg, July 7-9, 1982. 428 S.; DM 35,-
- 8/82 *A. Geiger*: Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente. 124 S.; DM 10,-
- 9/83 *W. Welsch (Hrsg.)*: Deformationsanalysen '83. 336 S.; DM 25,-
- 10/84 *W. Caspary, A. Schödlbauer und W. Welsch (Hrsg.)*: Beiträge aus dem Institut für Geodäsie. 241 S.; DM 20,-
- 11/84 *W. Caspary und H. Heister (Hrsg.)*: Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. 268 S.; DM. 20,-; vergriffen
- 12/84 *P. Schwintzer*: Analyse geodätisch gemessener Punktlageänderungen mit gemischten Modellen. 155 S.; DM 15,-
- 13/84 *G. Oberholzer*: Landespflege in der Flurbereinigung. 80 S.; DM 10,-
- 14/84 *G. Neukum mit Beiträgen von G. Neugebauer*: Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. 100 S.; DM 25,-
- 15/84 *A. Schödlbauer und W. Welsch (Hrsg.)*: Satelliten-Doppler-Messungen. Beiträge zum Geodätischen Seminar 24./25. September 1984. 394 S.; DM 30,-
- 16/85 *M. K. Szacherska, W. M. Welsch*: Geodetic Education in Europe. 230 S.; DM 20,-; vergriffen
- 17/86 *B. Eissfeller, G. W. Hein*: A Contribution to 3d-Operational Geodesy, Part 4: The Observation Equations of Satellite Geodesy in the Model of Integrated Geodesy. 189 S.; DM 20,-
- 18/85 *G. Oberholzer*: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil II. 114 S.; DM 12,-
- 19/86 *H. Landau, B. Eissfeller and G. W. Hein*: GPS Research 1985 at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy. 210 S.; DM 20,-
- 20/85 *W. Welsch and L. A. Lapine (Eds.)*: Proceedings "Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys". Joint Meeting of Study Groups 5 B and 5 C, July 1-3 1985; 2 Bände. 630 S.; DM 50,-
- 21/86 *G. Oberholzer*: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil III. 97 S.; DM 12,-
- 22/87 *W. Caspary, G. Hein, A. Schödlbauer (Hrsg.)*: Beiträge zur Inertialgeodäsie. Geodätisches Seminar 25./26. September 1986. 388 S.; DM 30,-
- 23/87 *E. Dorrer und J. Peipe (Hrsg.)*: Motografie. Symposium 11./12. März 1986. 280 S.; DM 30,-
- 24/87 *G. Neugebauer (Hrsg.)*: Brenta-Monographie – Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. 188 S.; DM 30,-
- 25/87 *A. Perelmutter*: Beiträge zur Ausgleichung geodätischer Netze. 75 S.; DM 10,-

- 26/87 *W. Ellmer:* Untersuchung temperatur-induzierter Höhenänderungen eines Groß-turbinentisches. 105 S.; DM 12,--
- 27/87 *H. Heister:* Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. 210 S.; DM 20,--
- 28/87 *E. H. Paßberger:* Systemstudie zur Sicherung ökologischer Vorrangflächen mittels Bodenordnung in Bayern. 183 S.; DM 20,--
- 29/87 *H. Glasmacher:* Die Gaußsche Ellipsoid-Abbildung mit komplexer Arithmetik und numerischen Näherungsverfahren. 121 S.; DM 13,--
- 30/87 *Y. Zhang:* Beiträge zum Entwurf von optimalen Beobachtungsplänen für tektonische Überwachungsnetze. 145 S.; DM 15,--
- 31/88 *W. Lechner:* Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. 159 S.; DM 15,--
- 32/88 *R. König:* Zur Fehlertheorie und Ausgleich inertialer Positionsbestimmungen. 138 S.; DM 15,--
- 33/88 *H. Borutta:* Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. 158 S.; DM 15,--
- 34/88 *H. Landau, K. Hehl, B. Eissfeller, G. W. Hein, I. W. Reilly:* Operational Geodesy Software Packages. 323 S.; DM 30,--
- 35/88 *G. Oberholzer, E. Paßberger:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil IV. 149 S.; DM 15,--
- 36/88 *H. Landau:* Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. 284 S.; DM 28,--
- 37/88 *B. Eissfeller:* Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS. 321 S.; DM 32,--
- 38/89 *A. Schödlbauer (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil I: Global Positioning System. 354 S.; Teil II: Nivellement, Vermessungskreisel. 194 S.; DM 50,--
- 39/89 *N. Kersting, W. Welsch (Hrsg.):* Rezente Krustenbewegungen. Seminar 08./09. Juni 1989. 303 S.; DM 30,--
- 40/89 *G. Oberholzer:* Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung. 210 S.; DM 20,--
- 41/90 *G. W. Hein, K. Hehl, B. Eissfeller, M. Ertel, W. Jacoby, D. Czerek:* On Gravity Prediction Using Density and Seismic Data. 148 S.; DM 15,--
- 42/92 *N. Kersting:* Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. 246 S.; DM 25,--
- 43/92 *K. Hehl:* Bestimmung von Beschleunigungen auf einem Träger durch GPS und digitale Filterung. 215 S.; DM 20,--
- 44/92 *W. Oswald:* Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. 128 S.; DM 13,--
- 45/93 *Institut für Geodäsie (Hrsg.):* Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. Mai 1993. 314 S.; DM 30,--
- 46/94 *K. Brunner und J. Peipe (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. 254 S.; DM 20,--
- 47/94 *K.-H. Thiemann:* Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Band 1: Kapitel 1-3, 420 S.; Band 2: Kapitel 4-5, 220 S.; DM 50,--
- 48/94 *Chr. Schwiertz:* Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. 189 S.; DM 20,--

