

Vermessung
Photogrammetrie
Kulturtechnik

Mensuration
Photogrammétrie
Génie rural ■

September 1994
Septembre 1994
92. Jahrgang
92e année

9 | 94



Fachtagung
"Neuerungen in
der Vermessung"
Schützenhaus
Albisgüetli
8045 Zürich

Leica

Leica AG
Kanalstrasse 21
8152 Glattbrugg

Aerotriangulation mit digitalen Bilddaten im Rahmen des OEEPE-Testprojektes

Th. Kersten, D. Stallmann

Die OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales) führte 1993 das Testprojekt «Aerotriangulation using digitized images» mit dem Ziel durch, praktische Ergebnisse und einen Überblick über den Status photogrammetrischer Aerotriangulationen mit digitalen Bilddaten zu erhalten. In diesem Artikel werden die Untersuchungen und Ergebnisse des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich als Beitrag zu diesem OEEPE-Testprojekt beschrieben. Für den internationalen Test wurden zwei digitale Bilddatensätze mit einer Auflösung von 15 μm und 30 μm verteilt. Die Bildmessungen der Rahmenmarken sowie der signalisierten und natürlichen Verknüpfungspunkte erfolgten an einer Arbeitsstation von SUN Microsystems in ausgeschnittenen Teilbildern durch Template und Image Matching. Für beide Datensätze lieferte die Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung eine Standardabweichung für die Bildkoordinaten von 1/4 der Pixelgrösse. Für die 15 μm Bilddaten konnte eine praktische Genauigkeit von 26 mm in der Lage und 38 mm in der Höhe erreicht werden.

L'OEEPE a mené, en 1993, le projet test intitulé «Aerotriangulation using digitized images», en vue d'obtenir quelques résultats concrets et un aperçu général sur l'état des aérotriangulations avec des données numériques.

Les recherches effectuées et les résultats atteints par l'Institut de Géodésie et de Photogrammétrie de l'EPF Zurich seront présentés dans cet article en tant que contribution au projet test de l'OEEPE. Deux jeux de données images numériques, ayant 15 μm et 30 μm pour résolution, furent distribués dans le cadre du test international. Les mesures des marques fiducielles et des points de liaison naturels et signalisés ont été effectuées sur une station de travail SUN Microsystems en appliquant la méthode «Template and Image Matching» sur des extraits d'image. La compensation par faisceaux avec étalonnage automatique a fourni, pour les deux jeux de données, un écart-type pour les coordonnées de l'image égal à un 1/4 de la taille d'un pixel. Une précision de 26 mm en planimétrie et de 38 mm en altimétrie peut être obtenue pour les données dont la résolution est de 15 μm .

1. Einleitung und Motivation

Mit der Entwicklung hochauflösender Scanner sind zunehmend digitale Bilddaten hoher Qualität verfügbar, mit denen Punktbestimmungen durch Aerotriangulation auf Digitalen Photogrammetrischen Arbeitsstationen (DPA) durchgeführt werden können. Ausserdem treten die DPA's durch schnellere Bildverarbeitung und hochauflösende Bildschirme mit der Option der Stereobetrachtung der Bilder zusehends in Konkurrenz zu konventionellen Analytischen Plottern hinsichtlich Genauigkeit und Funktionalität, zum Beispiel durch den höheren Automationsgrad für die Datenerfassung und Bearbeitung. Um praktische Erfahrungen und Resultate von photogrammetrischen Aerotriangulationen mit digitalen Bilddaten hoher Qualität zu erhalten und um den Status und das Potential dieser Anwendungen aufzuzeigen, wurde 1993 das internationale OEEPE-Testprojekt «Aerotriangulation using digitized images» durchgeführt. Das Hauptinteresse galt der geometrischen

Genauigkeit der Kontrollpunkte und der Funktionalität des gesamten Auswerteprozesses.

Seit der Markteinführung der ersten digitalen photogrammetrischen Systeme Anfang der achtziger Jahre wurden verschiedene Untersuchungen unternommen, die Aerotriangulation mit digitalen Bilddaten zu automatisieren. Die digitale Ära in der Aerotriangulation begann mit der digitalen Punktübertragung durch Bildkorrelation an Analytischen Plottern. Für diesen Zweck wurden Punkte in Bildausschnitten gemessen, die durch am Analytischen Plotter installierte CCD-Kameras digitalisiert wurden, wie zum Beispiel am Planicomp C 100 (Pertl, 1984; Ackermann/Schneider, 1986), am Kern Korrelator des DSR 11 (Bethel, 1986) und am Prime-Wild S9-AP (Wilkins, 1990). Zur automatischen Auswahl und Messung von Verknüpfungspunkten bei der Blocktriangulation entwickelte Helava das Digitale Comparator Correlator System (DCCS), das 1987 in Interlaken auf der Konferenz für «Fast Processing of Photogrammetric

Data» vorgestellt wurde. Über erste praktische Erfahrungen und Resultate mit dem DCCS berichtete u.a. Han (1992).

Eine Aerotriangulation von zwei Bildstreifen mit insgesamt 8 Modellen auf dem PC-basierten Digital Video Plotter (DVP), der an der Universität Laval (Kanada) entwickelt wurde und von Leica vermarktet wird, beschreiben Agnard et al. (1992). Algorithmische Aspekte finden sich in die Arbeit von Tsingas (1991), der erste Resultate einer automatischen Aerotriangulation vorstellt. Die Punktauswahl erfolgte durch einen Interest Operator, während die Übertragung und Messung der Verknüpfungspunkte für einen digitalen 5 x 5 Bildverband automatisch ablief. In seinem Test simulierte er einen Bildflug mit einer CCD-Kamera über ein künstliches Modell. Für die Kontrollpunkte konnte eine Genauigkeit von 0.2 Pixel in der Lage und von 1.0 Pixel in der Höhe nachgewiesen werden. Den Ansatz eines künstlichen neuronalen Netzwerkes benutzten Kepuska/Mason (1991) für das Erkennen und Auffinden signalisierter Punkte in digitalen Bildern. Aufgrund unterschiedlicher Orientierungen, Bildhintergründe, Massstäbe sowie radiometrischer und geometrischer Deformationen der Signalisierung erfolgte die Initialisierung des Neuronalen Netzes in einer Trainingsphase. 85 % der signalisierten Punkte in insgesamt 34 Bildern konnten erkannt werden.

Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich nahm aktiv an dem internationalen OEEPE-Test teil. Die Untersuchungen und Ergebnisse des IGP mit den weltweit ausgeteilten, digitalen Bilddaten werden im folgenden vorgestellt. Vordergründige Motivation war die Durchführung der Aerotriangulation an einer herkömmlichen Arbeitsstation anstatt an einer kommerziellen DPA. Die am Institut entwickelte Software konnte so getestet werden. Die Arbeiten wurden von Vermessungsstudenten des 7. Semesters im Rahmen ihres Vertiefungsblockes unterstützt.

2. OEEPE-Testdaten

Für den OEEPE-Test wurden 28 Luftbilder am Zeiss/Intergraph PhotoScan 1 mit einer Pixelgrösse von 15 μm gescannt. Pro Bild fielen dadurch 256 Mbyte digitale Daten an. Aus diesen hochauflösenden Bilddaten wurde ein jeweils zweiter Datensatz mit 30 μm Auflösung (64 Mbyte) generiert. Die 28 Luftbilder bilden einen Teilblock eines Luftbildverbandes, der 1989 über der kleinen Stadt Forssa, im südlichen Finnland circa 120 km nordwestlich von Helsinki, befliegen wurde. Relevante Bildflug- und Blockdaten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Das entsprechende Kamerakalibrierungsprotokoll, 3-D Objekt-

Gebiet:	Forssa (Finnland)
Gebietsgrösse:	1,5 x 2,5 km ²
Mittlere Geländehöhe:	100 m
Flughöhe über N.N.:	600 m
Kamera:	Wild RC 20 15/4, UAGA-F, Nr. 13118
Bildmassstab:	1:4000
Längs- und Querüberdeckung:	60%/34% (24%–49%)
Anzahl Streifen:	4
Anzahl Bilder/Streifen:	7
Befliegungsdatum:	3. Mai 1989, 11:40 Uhr
Film/digitale Bilddaten:	Farbdiafilm/Grauwertbilder
Scanner:	Zeiss/Intergraph PhotoScan 1
Pixelgrösse:	15 µm/30 µm

Tab. 1: Befliegungs- und Blockdaten der OEEPE-Testdaten.

punktkoordinaten von 14 Passpunkten sowie genäherte Pixelkoordinaten der signalisierten Punkte aus allen Bildern wurden zusätzlich ausgeteilt.

3. Hardware und Software

Für die Bearbeitung der Testdaten wurden Hardwarekomponenten der Digitalen Photogrammetrischen Station II (DIPS II, Grün/Beyer, 1990) des IGP benutzt. DIPS II besteht aus zwei Fileservern und 13 Arbeitsstationen von SUN Microsystems, die untereinander via Ethernet mit einigen externen Komponenten der digitalen Bildakquisition und -ausgabe verbunden sind. Zur Zeit ist DIPS II, die als Plattform für alle photogrammetrischen Forschungsprojekte des IGP dient, mit insgesamt 15 Gbyte Festplattenspeicherkapazität ausgestattet. Effektiv konnten davon 2 Gbyte für die OEEPE-Testdaten genutzt werden. Die relevanten benutzten Programme sind im folgenden aufgeführt:

- «Viewing Tool» für die Darstellung der Bilder am Bildschirm, für die manuellen Messungen von Bildpunkten sowie für das Ausschneiden von Teilbildern (sogenannte Region Of Interest ROI).
- «Matching Tool» für das Template und Image Matching der Rahmenmarken, der signalisierten und natürlichen Punkte.
- Bündelblockausgleichungsprogramm mit Selbstkalibrierung für die Ausgleichung und Analyse der Messungen.
- Verschiedene Programme für Affintransformationen, für Reduktionen (Erkrümmung, Refraktion, Verzeichnung) der Bildkoordinaten und für Datenformat-Umwandlungen.

4. Vorverarbeitung der Bilddaten

Für die photogrammetrische Punktbestimmung durch Aerotriangulation sind nur bestimmte Bildregionen von Interesse: die

Rahmenmarken werden für die Transformation in das Bildkoordinatensystem benötigt, die signalisierten Punkte für eine Transformation in den Objektraum und die natürlichen Verknüpfungspunkte in und quer zur Streifenrichtung für eine zuverlässige Verknüpfung der Bilder. Arbeitet man allerdings mit den vollen Bildern, so erfordert die Ein- und Ausgabe solcher grosser digitaler Bilder (64 Mbyte bzw. 256 Mbyte) und deren Visualisierung am Bildschirm sowohl grosse Mengen an Speicherplatz auf der Festplatte als auch lange Ein- und Ausgabezeiten. Aus diesen Gründen wurden nur ROIs der acht Rahmenmarken, aller sichtbaren signalisierten Punkte und der ausgewählten Verknüpfungspunkte für die Messungen der Bildpunkte verwendet. Anhand der Pixelkoordinaten, die als Näherung exemplarisch in einem Bild (30 µm) manuell gemessen wurden, wurden die Bildausschnitte der Rahmenmarken ausgeschnitten. Die Grösse der Bildausschnitte betrug für die Rahmenmarken und die signalisierten Punkte 64 x 64 Pixel (30 µm) und 128 x 128 Pixel (15 µm). Genäherte Pixelkoordinaten der signalisierten Punkte wurden für alle Bilder von der Koordinationsstelle des OEEPE-Testprojektes mitgeliefert. Die Benutzung dieser Näherungskordinaten wurde den Projektteilnehmern freigestellt, jedoch hätten sie auch manuell in den Bildern gemessen werden können. Mit diesen Näherungen wurden die Bildausschnitte ausgeschnitten.

Um Verknüpfungspunkte auswählen zu können, wurden in den sogenannten sechs «von Gruber-Positionen» Teilbilder (30 µm Bilddaten) in einer Grösse von 512 x 512 Pixel ausgeschnitten. Dazu wurden in den 30 µm Bildern Bildregionen mit guter Textur am Bildschirm ausgewählt und ausgeschnitten, die sich für Bildkorrelation (Matching) eignen. Um eine zuverlässige Verknüpfung quer zur Streifenrichtung zu garantieren, wurden anschliessend die korrespondierenden Bildausschnitte in dem Modell der überlappenden Streifen ausgeschnitten. Für das Ausschneiden

der Verknüpfungspunkte in dem 15 µm Datensatz wurden die Pixelkoordinaten der gemessenen Punkte (30 µm) als Näherungskordinaten genutzt. Eine Bildverbesserung wurde für alle ausgeschnittenen Bilder nicht durchgeführt.

5. Bildpunktmessung durch Template und Image Matching

Die Messungen aller Bildpunkte (Rahmenmarken, signalisierte und natürliche Punkte) erfolgte durch Matching in den Bildausschnitten. Der verwendete Korrelationsalgorithmus ist bekannt als Image Matching nach der Methode der kleinsten Quadrate mit geometrischen Zusatzbedingungen (Grün/Baltsavias, 1988) und erlaubt Bildpunktmessungen mit Subpixelgenauigkeit. Bei unseren Auswertungen wurde der Algorithmus ohne geometrische Zusatzinformationen benutzt. In diesem Fall ist das eine Bild üblicherweise eine künstliche und ideale Version des Punktes, dessen Position in den anderen Bildern zu bestimmen ist. Wählt man ein künstlich generiertes Template (Muster) zum Matching, spricht man von Template Matching, während man das Matching eines manuell gemessenen natürlichen Punktes in den korrespondierenden Bildern als Image Matching bezeichnet. Das Matching erfolgte interaktiv mit dem Matching Tool von DIPS II, wobei in der Benutzeroberfläche alle Parameter für die jeweilige Matching-Aufgabe optimal gesetzt und nach der Messung die Matching-Ergebnisse visuell überprüft werden können. Verschiedene künstliche Templates wurden für die Rahmenmarken beider digitalen Datensätze und für die signalisierten Punkte kreiert (Abbildung 1). Für die Messung der natürlichen Verknüpfungspunkte wurde ein markanter Punkt als Template ausgewählt, während die korrespondierenden Punkte in den entsprechenden Bildausschnitten durch Matching bestimmt wurden. Eine Qualitätskontrolle erfolgte durch visuelle Überprüfung der Matching-Resultate. Falls ein Punkt mit den gesetzten Parametern nicht zufriedenstellend bestimmt werden konnte, wurde der Vorgang mit anderen, besseren Parametern wiederholt, indem entweder die Grösse des Suchfensters (Patch) für das Template verändert oder eine eingeschränktere Transformation für die Bildanpassung gewählt wurde.

5.1 Messung der Rahmenmarken

Zuerst wurden die Rahmenmarken in jedem Bild gemessen. Weil die Rahmenmarken in den Bildern klar abgebildet waren, konnte das Matching ohne Probleme durchgeführt werden. In den 30 µm Bilddaten wurden jeweils die vier Rah-

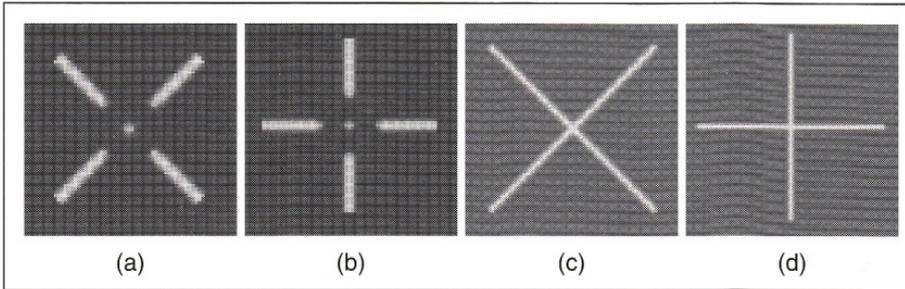


Abb. 1: Templates für die Rahmenmarken (a, b) und die signalisierten Punkte (c, d).

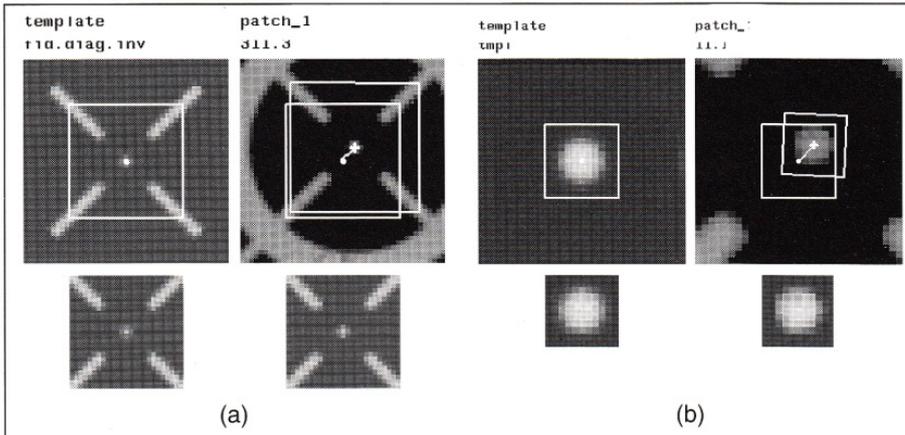


Abb. 2: Template Matching der Rahmenmarken in 30 µm (a) und 15 µm (b) Bilddaten.

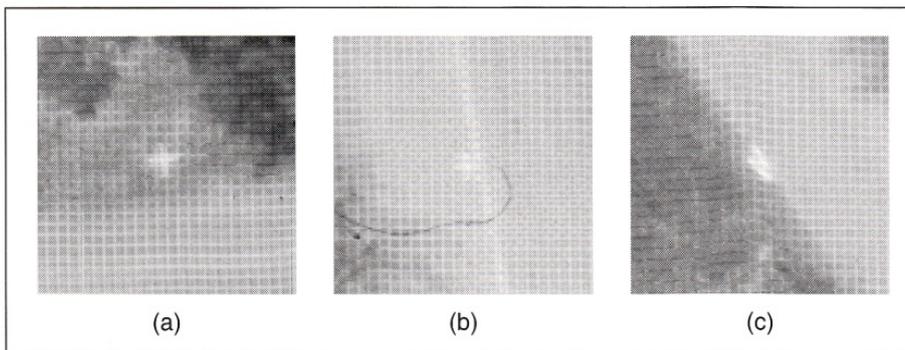


Abb. 3: Beispiele für eine gute (a), schlechte (b) und zerstörte Signalisierung (c).

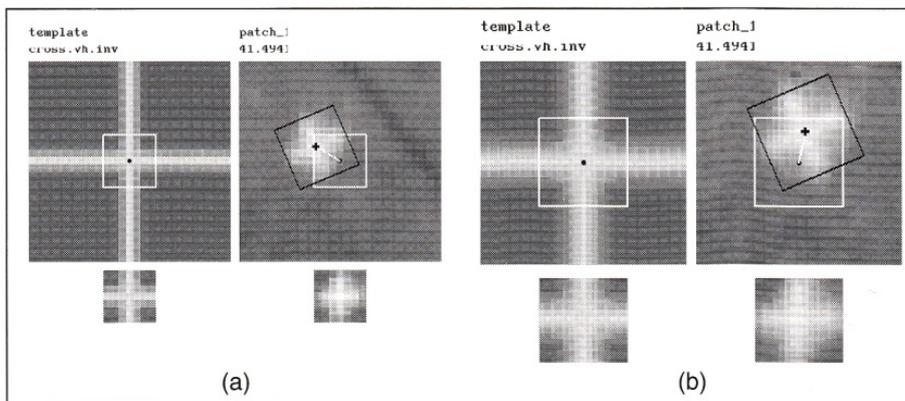


Abb. 4: Template Matching der signalisierten Punkte in 30 µm (a) und 15 µm (b) Bilddaten.

menmarken in den Bildecken sowie die vier Diagonalen gemessen. In Abbildung 2a zeigen exemplarisch die grossen Bilder das Matching zwischen dem Template und

dem Suchfenster, wobei die Startposition als Punkt und die endgültige Position als Kreuz abgebildet ist. Die unteren kleinen Bilder zeigen das Ergebnis des Matching.

Als Patchgrösse wurde 25 x 25 Pixel gewählt (siehe weisses Quadrat im Template von Abbildung 2a). Das Matching erfolgte mit einer Affintransformation, durch die das Patch dem Template angepasst wurde.

Mit den gleichen Matching-Parametern konnten jeweils alle acht Rahmenmarken aus den 15 µm Bilddaten auf einmal gemessen werden. Hier betrug die Patchgrösse nur 5 x 5 Pixel, wodurch nur der Kreis im Zentrum der Rahmenmarke abgebildet wurde (Abbildung 2b).

5.2 Messung der signalisierten Punkte

Etwas aufwendiger gestaltete sich das Matching der signalisierten Punkte in den 30 µm Bildausschnitten, da Form, Helligkeit und Kontrast der Punktsignalisierung in den Bildern variiert. Abbildung 3 zeigt jeweils ein Beispiel für eine gute, eine schlechte und eine zerstörte Signalisierung, die hier zur besseren Darstellung vom 15 µm Bildmaterial gewählt wurde. Im Durchschnitt bedeckte die Signalisierung ein Quadrat von 5-7 Pixeln (30 µm) bzw. 10-14 Pixeln (15 µm) im Bild. Die Originalgrösse der Signalisierungstreifen betrug 10 cm x 60 cm. Wegen der schlechten Qualität der signalisierten Punkte in den 30 µm Bilddaten konnte das Template Matching nur mit zwei Translationsparametern bei einer Patchgrösse von 7 x 7 Pixeln durchgeführt werden. Bei dieser Bildqualität sind die Grauwertinformationen von 7 x 7 Pixeln gerade noch ausreichend, um Punkte zuverlässig durch Template Matching bestimmen zu können. Das Template Matching eines signalisierten Punktes (30 µm Bilddaten) zeigt exemplarisch Abbildung 4a. Die visuelle Überprüfung des Matching-Resultates dokumentiert nachhaltig die geringe Qualität der Signalisierung in diesem Bildmaterial.

Dagegen konnten in den hochauflösenden Bildausschnitten alle signalisierten Punkte mit demselben Template (siehe Abbildung 1d) gemessen werden. Für das Matching wurde eine Ähnlichkeitstransformation bei einer durchschnittlichen Patchgrösse von 15 x 15 Pixel verwendet. Das Template Matching eines signalisierten Punktes zeigt Abbildung 4b. Der Vergleich der Matching-Resultate (kleine Bilder in Abbildung 4a und 4b) zeigt eindrucksvoll den Qualitätsunterschied der Signalisierung in beiden Datensätzen. Auch schlechte Signale in den 15 µm Bildern konnten erfolgreich durch Matching bestimmt werden, sofern gute Näherungen und unterschiedliche Patchgrössen benutzt wurden. Insgesamt wurden jeweils 257 signalisierte Punkte in beiden Datensätzen gemessen.

5.3 Messung der natürlichen Punkte

Meistens konnten sehr gut definierte Punkte in den Bildausschnitten ausgewählt werden, normalerweise Punkte in

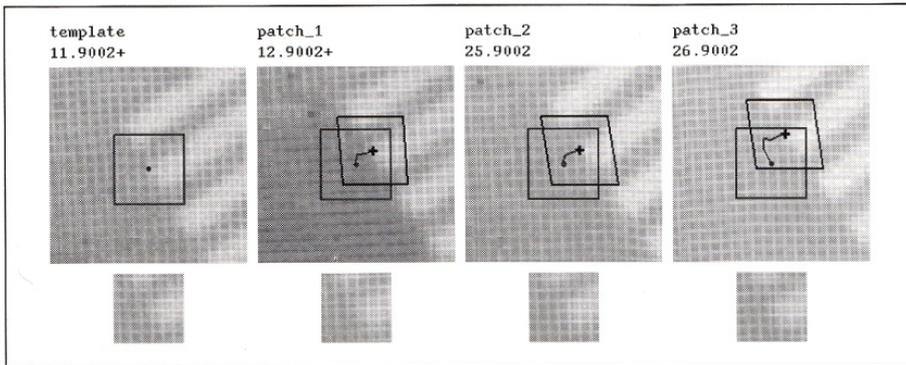


Abb. 5: Image Matching von vier natürlichen Verknüpfungspunkten (30 μm Bild-daten).

Version	A	PP Lage Höhe	KP Lage Höhe	ZP	$\hat{\sigma}_0$ [μm]	σ_{xy} [mm]	σ_z [mm]	μ_{xy} [mm]	μ_z [mm]
PPV1	30	14 14	59 68	0	7.7	31.9	73.5	58.7	68.5
		14 14	59 68	12	7.5	33.3	75.0	56.6	65.7
		14 14	59 68	44	7.6	35.2	81.7	56.1	65.5
PPV2	30	4 8	66 78	0	7.4	46.1	81.7	126.3	65.7
		4 8	66 78	12	7.3	55.1	87.2	116.9	62.8
		4 8	66 78	44	7.5	59.7	124.5	125.1	66.6
PPV1	15	14 14	62 71	0	3.9	17.2	39.2	32.4	41.9
		14 14	62 71	12	3.8	17.5	39.7	25.9	38.2
		14 14	62 71	44	3.8	18.0	42.2	25.9	37.8
PPV2	15	4 8	67 81	0	3.8	25.2	43.8	37.8	48.2
		4 8	67 81	12	3.7	29.2	46.3	28.3	62.3
		4 8	67 81	44	3.8	31.0	65.0	34.2	42.2

A Auflösung des digitalen Datensatzes [μm] $\hat{\sigma}_0$ geschätzte Standardabweichung
 PP Anzahl der Passpunkte σ_{xyz} theoretisches Genauigkeitsmass
 KP Anzahl der Kontrollpunkte μ_{xyz} praktisches Genauigkeitsmass
 ZP Anzahl der zusätzlichen Parameter

Tab. 2: Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen für die OEEPE-Testdaten.

flachen Gebieten, so dass das Matching ohne Probleme durchgeführt werden konnte. Wie bereits erwähnt, wurde dabei ein Punkt als das ideale Abbild des Punktes durch manuelles Messen festgelegt und die korrespondierenden Punkte wurden in den anderen Bildausschnitten durch Matching bestimmt. Auch hier war die Patchgröße im Durchschnitt 15 x 15 Pixel, und für das Matching konnte die Affintransformation verwendet werden. Aus Zuverlässigkeitsgründen wurden in den 512 x 512 Pixel grossen Bildausschnitten zwei Punkte gemessen. Insgesamt wurden 460 (442) Verknüpfungspunkte in den 30 μm (15 μm) Bild-daten gemessen. Exemplarisch ist in Abbildung 5 das Image Matching von vier signalisierten Punkten aus zwei Streifen abgebildet, wobei auch hier die Startposition als Punkt und das Resultat des Matching als Kreuz dargestellt ist.

6. Bündelblockausgleichung

Die gemessenen Pixelkoordinaten wurden über alle acht Rahmenmarken durch

eine Affintransformation in das Bildkoordinatensystem transformiert. Anschliessend wurden die Bildkoordinaten a priori um die radialsymmetrische Verzeichnung und um den Einfluss der Refraktion und Erdkrümmung korrigiert. Die Ausgleichung der reduzierten Bildkoordinaten wurde mit dem Programmpaket BUN des IGP durchgeführt. Das Programm umfasst mehr als 40 Programme, die in die vier

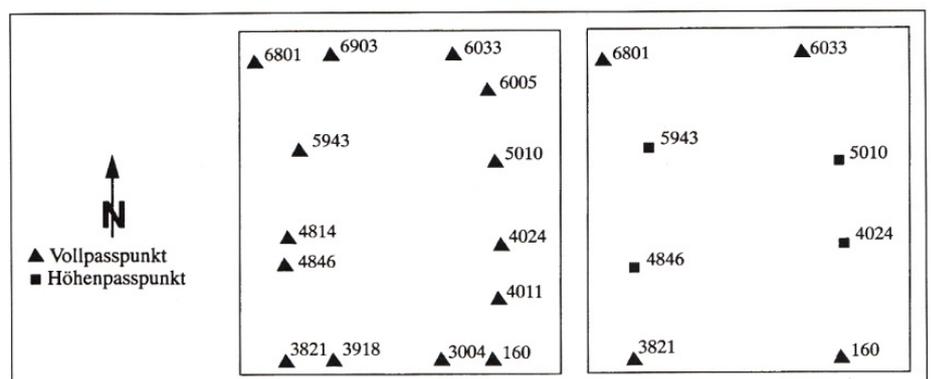


Abb. 6: Dichte (rechts) und dünnbesetzte (links) Passpunktkonfiguration.

Module Vorverarbeitung und Vorbereitung der Messdaten, Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung, Analyse der Resultate und graphische Darstellung von Daten und Ergebnissen aufgeteilt sind. Der mathematische Hintergrund der implementierten Bündelausgleichung, eine FORTRAN-Version und Weiterentwicklung des Programms MBOP der TU München, wird in Grün (1976) beschrieben. Das Bündelausgleichungsprogramm, der Hauptteil von BUN, erlaubt die automatische Berechnung der Näherungswerte, wobei in diesem Stadium die Daten auf grobe Fehler überprüft werden, die dann automatisch eliminiert werden. Für die Kompensation systematischer Fehler bei der Ausgleichung von Daten aus Luftbildern können wahlweise 12 zusätzliche Parameter (ZP) von Ebner (1976) oder 44 ZP's von Grün (1978) verwendet werden. Die Bildkoordinaten wurden in die Ausgleichung mit einer a priori Standardabweichung von 7 μm (5 μm) für die Bilddaten mit geringer (hoher) Auflösung eingeführt. Die Standardabweichung der Passpunktkoordinaten wurde für Lage und Höhe mit 20 mm von der OEEPE-Koordinationsstelle vorgegeben.

Die Ausgleichung erfolgte ohne und mit Selbstkalibrierung (12 und 44 ZP) für jeweils eine dichte und dünne Passpunkt-konfiguration (Abbildung 6). Insgesamt wurden 12 verschiedene Bündelausgleichungen gerechnet. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der Bündelausgleichungen zusammen.

Die dichte Passpunktversion (PPV1) umfasst 14 Passpunkte, die um den Blockrand verteilt sind, während bei der dünnbesetzten Version (PPV2) der Luftbildverband auf vier Vollpasspunkte in den Blockecken und auf vier Höhenpasspunkte am Blockrand gelagert wurde (siehe Abbildung 6). Beide Passpunkt-konfigurationen wurden von der OEEPE-Koordinationsstelle vorgegeben. Abbildung 7 zeigt das Design des Bildverbandes und die Verteilung der Pass- und Verknüpfungspunkte mit der Anzahl ihrer Strahlen. Insgesamt wurden im 30 μm (15 μm) Datensatz zehn (vier) Beobachtungen von natürlichen Verknüpfungspunkten als grobe Fehler

Datenverarbeitungsschritt	Zeiten für Bilddatensatz [h]	
	30 μm	15 μm
Einlesen der Bilddaten vom Video 8 Band	1,5	8,5
Ausschneiden der ROIs (Rahmenmark. + sig. Pkt)	0,3	1,5
Auswahl der natürlichen Verknüpfungspunkte	16 ¹⁾	–
Ausschneiden der natürlichen Verknüpfungspunkte	0,5	10 ¹⁾
Matching der Rahmenmarken	3,5	2,5
Matching der signalisierten Punkte	10	8
Matching der natürlichen Verknüpfungspunkte	10	8
Bündelblockausgleichung + Datenanalyse	4	4
Datenverwaltung	4	4
Zeit total	49,8	46,5

¹⁾ Beinhaltet auch das Einlesen der Bilddaten von Band

Tab. 3: Zeitaufwand für die Aerotriangulation der digitalen OEEPE-Testdaten.

während der Ausgleichung detektiert und eliminiert. Die empirischen Genauigkeitsmasse μ_{xy} , μ_z wurden aus dem Vergleich zwischen den photogrammetrisch bestimmten Punkten und den Kontrollpunkten ermittelt. Kontrollpunkte sind die geodätischen Koordinaten der signalisierten Punkte, die in der Bündelausgleichung nicht als Passpunkte verwendet wurden. Diese praktischen Genauigkeitsmasse sind das quadratische Mittel aller x- und y-Differenzen. Durch Inversion des Normalgleichungssystems wurden die theoretischen Genauigkeitsmasse σ_{xy} , σ_z aller Neupunkte bestimmt, die mit der a posteriori Standardabweichung $\hat{\sigma}_0$ berechnet

wurden. Für die 30 μm (15 μm) Bilddaten lieferte die Ausgleichung mit 44 ZP's und der dichten Passpunktconfiguration als bestes Ergebnis eine praktischen Genauigkeit von 56 mm (26 mm) in der Lage und 66 mm (38 mm) in der Höhe. Die Ausgleichung mit 12 ZP's und ohne Selbstkalibrierung führte zu vergleichbaren Ergebnissen. Die theoretischen Genauigkeiten waren teilweise in der Lage besser und in der Höhe schlechter als die praktischen Genauigkeiten. Für die 30 μm Daten verschlechterte sich in PPV 2 die praktische Lagegenauigkeit um mehr als Faktor 2, während die Höhengenaugkeit gegenüber PPV1 gleich blieb.

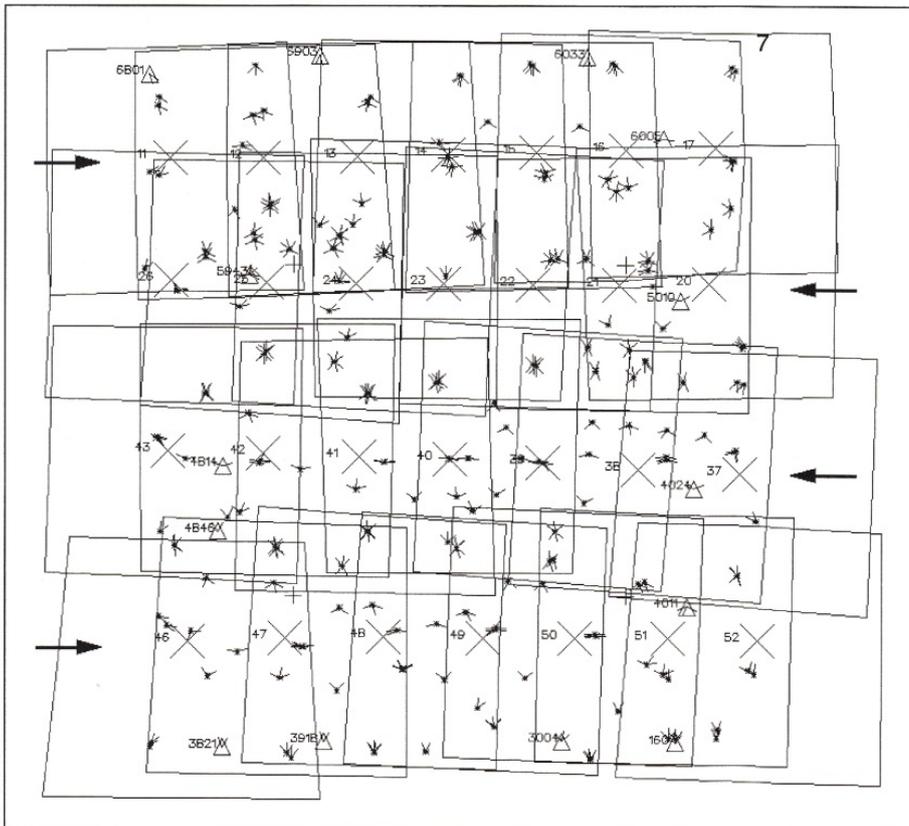


Abb. 7: OEEPE-Testblockdesign und Punktverteilung (Pfeile geben die Flugrichtung an).

Insgesamt ist die Genauigkeit der 15 μm Bilddaten gegenüber den 30 μm Daten um den Faktor 2 besser, was auch den Unterschied in der Auflösung wiedergibt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Einsatz der Zusatzparameter in den Ausgleichungen bis auf eine Ausnahme leichte Verbesserungen in der praktischen Genauigkeit für beide Datensätze brachte.

7. Zeitaufwand und Kritikpunkte

Drei Studenten unterstützten diese Arbeiten für das OEEPE-Testprojekt in Rahmen ihres Vertiefungsblockes Photogrammetrie. Für die Bearbeitung eines Datensatzes wurden knapp 50 Arbeitsstunden investiert. Der Zeitaufwand für die Aerotriangulation beider Datensätze ist in Tabelle 3 detailliert aufgeführt. Die angegebenen Zeiten sind abgeschätzt und unterscheiden nicht immer zwischen effektiver Arbeit und Testphasen. Aber sie geben dennoch einen Überblick über den erforderlichen Zeitaufwand für bestimmte Arbeitsprozesse der Aerotriangulation.

Die meiste Zeit wurde bei den 30 μm Bilddaten für die Auswahl der Verknüpfungspunkte verwendet, während dies bei dem 15 μm Datensatz entfiel, weil dort die Pixelkoordinaten des 30 μm Datensatzes als Näherungen verwendet wurden. Dagegen war beim 15 μm Bildmaterial das Einlesen der grossen Bilddaten von Band am zeitaufwendigsten. Generell erfolgte das Messen der Bildpunkte in einem 15 μm Bild etwas schneller, da man hier bei der Handhabung der Programme von den Erfahrungen bei der Auswertung des 30 μm Datensatzes profitieren konnte. Die Benutzeroberfläche der Software erwies sich nicht immer als sehr benutzerfreundlich für die Studenten, die diese Arbeit das erste Mal durchführten. Ausserdem waren die Schnittstellen zwischen den einzelnen Softwaremodulen nicht optimal, so dass eine Integration aller notwendigen Programme in einem komfortablen Softwarepaket wünschenswert wäre.

In allen Arbeitsschritten der Aerotriangulation kann durch eine optimierte Software und durch leistungsfähigere Hardware Zeit eingespart werden. Falls genügend Festplattenkapazität vorhanden ist, entfällt zumindest nach dem Abspeichern der Bilddaten das mehrmalige Einlesen vom Band. Die Datenhandhabung und ihr Zugriff kann entscheidend durch das sogenannte Image-Tiling (Bildteilung in gleichgrosse Teile) und durch die Benutzung von Bildpyramiden verbessert werden. Die Aufteilung von Bildern in Tiles erlaubt einen schnelleren Zugriff bei der Visualisierung und Verarbeitung von Bildern. Der Einsatz von Bildpyramiden unterstützt ausserdem die Möglichkeit, einen schnell-

len Überblick bei unterschiedlichen Bildmassstäben zu erhalten. Durch die Organisation der digitalen Bilder in Tiles und durch die Ableitung von Bildpyramiden entfällt das aufwendige Ausschneiden von ROIs. Die Auswahl von natürlichen Verknüpfungspunkten in den Bildpyramiden durch einen Interest Operator und die Messung der Rahmenmarken kann weitgehend automatisiert werden. Berücksichtigt man die zuvor erwähnten Aspekte, so sollte es möglich sein, circa 30% der verwendeten Zeit bei dieser Triangulation einzusparen.

Im folgenden sollen noch einige Kritikpunkte am OEEPE-Test aufgeführt werden. In den 28 Bildern der bearbeiteten Testblocks waren 113 signalisierte Punkte abgebildet, von denen aber nur bei 85 Punkten 3-D Koordinaten bestimmt werden konnten. Die Objektpunktkoordinaten von 28 Punkten konnten nicht bestimmt werden, weil entweder das Matching aufgrund der schlechten Signalisierung in den Bildern nicht möglich war oder weil für die Ausgleichung letztendlich nur ein Strahl dieses Punktes vorlag.

Generell ist die Form und Grösse der Signalisierung nicht sehr geeignet für Template Matching. Für zukünftige Projekte und Test sind Scheiben als Signalisierung zu empfehlen. Wilkins (1990) berichtet über zufriedenstellende Ergebnisse bei der Punktbestimmung in einer Aerotriangulation mit digitalen Daten durch Template Matching, in denen die Punkte durch Scheiben signalisiert wurden.

Ausserdem war die Passpunktkonfiguration für eine Bündelausgleichung nicht optimal gewählt. Um eine robuste und zuverlässige Geometrie des Luftbildblocks sicherzustellen, müssten in der dichten Passpunktversion zwei zusätzliche Höhenpasspunkte im Blockinnern angebracht werden, während für die dünn besetzte Passpunktverteilung ein zusätzlicher Höhenpasspunkt im Zentrum des Blocks genügen würde. Für eine eingehende Analyse der Resultate war die a priori Genauigkeit der Passpunkte bei einem Bildmassstab von 1:4000 zu schlecht.

Als ein weiterer Kritikpunkt stellte sich im Laufe der Arbeiten die radiometrische Qualität der gescannten Bilder heraus, d.h. es gab markante Grauwertunterschiede in benachbarten Zonen und vertikale Streifen in den digitalen Bildern, was auf eine unzureichende Kalibrierung des Scanners schliessen lässt. Die radiometrischen Fehler in diesem Bildmaterial sind in Baltsavias (1993) und in Kersten/Stallmann (1994) beschrieben. Die Auswirkung auf möglicherweise resultierende Messfehler wurde nicht konsequent getestet. Einige exemplarisch untersuchte Zonen zeigten jedoch eine ausreichende geometrische Genauigkeit der Bildmessungen im Subpixelbereich.

8. Schlussbemerkungen

Unsere Arbeiten für das OEPPE-Testprojekt «Aerotriangulation using digitized images» ergaben eine Standardabweichung der Bildkoordinaten von 1/4 Pixel für beide digitalen Bilddatensätze. Für die 15 µm Bilddaten konnte mit der dichten Passpunktconfiguration eine praktische Genauigkeit von 26 mm in der Lage und 38 mm in der Höhe erreicht werden. Die theoretische Lagegenauigkeit war hier geringfügig besser. Die Ergebnisse der 30 µm Bilddaten waren um den Faktor 2 schlechter. Das bestätigt, dass digitale Bilddaten mit niedriger Auflösung nicht geeignet sind für eine genaue Punktbestimmung durch Aerotriangulation.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse des OEEPE-Testes mit den Bilddaten hoher Auflösung etwas schlechter sind als Resultate von Aerotriangulationen am Analytischen Plotter. Das Projekt Uster (Grün, 1986) lieferte eine praktische Genauigkeit von $\mu_{xy} = 2.0$ µm und $\mu_z = 3.6$ µm (Bildmassstab 1:10000), das Projekt Heinzenberg (Grün/Runge, 1987) bestätigte diese Genauigkeit mit $\mu_{xy} = 1.9$ µm und $\mu_z = 3.3$ µm (Bildmassstab 1:15000). Zum Vergleich wurde in dem OEEPE-Test (Bildmassstab 1:4000) eine praktische Genauigkeit von $\mu_{xy} = 6.5$ µm und $\mu_z = 9.5$ µm erzielt.

Der Zeitaufwand für die Aerotriangulation im Rahmen des OEEPE-Testes war deutlich höher als für konventionelle Triangulationen an Analytischen Plottern. Setzt man voraus, dass ein professioneller Operateur bis zu 12 Modelle pro Tag triangulieren kann und die Bündelausgleichung insgesamt einen Tag beansprucht, kann die ganze Aerotriangulation in weniger als 30 Stunden durchgeführt werden. Dieses ist um den Faktor 1.7 schneller als der geschätzte Zeitaufwand für die Bearbeitung dieses Projektes. Um das Leistungsvermögen der benutzten Prozedur für die Aerotriangulation zu optimieren, können und müssen folgende Rahmenbedingungen und Arbeitsschritte verbessert werden:

- leistungsfähigere Hardware, grössere Speicherkapazitäten
- benutzerfreundlichere Programmoberflächen und bessere interne Schnittstellen
- Nutzung von Image Tiling und Bildpyramiden
- automatisiertes Messen der Rahmenmarken und automatische relative Orientierung.

Eine vollautomatische Aerotriangulation mit digitalen Bildern wird wahrscheinlich in naher Zukunft nicht möglich sein, da eine zuverlässige Methode, signalisierte Punkte in digitalen Bildern aufzufinden und zuzuordnen, fehlt. Alle anderen Arbeits-

schritte liessen sich jedoch automatisieren. Zusätzlich bietet die Aerotriangulation mit digitalen Bildern den Vorteil, in unbegrenzt vielen Bildern identische Punkte gleichzeitig messen zu können.

Danksagung

Wir danken Andrea Keller, Luc Ewen und Christian Schmid für ihr Engagement und ihre Unterstützung bei der Bearbeitung des OEEPE-Testprojektes, das hauptsächlich im Rahmen ihres Vertiefungsblockes in Photogrammetrie am IGP der ETH Zürich durchgeführt wurde.

Literatur:

- Ackermann, F., Schneider, W., 1986. High Precision Aerial Triangulation with Point Transfer by Digital Image Correlation. Int. Archives of Photo. and Remote Sensing, 26(3/1), pp. 18–27.
- Agnard, J.-P., Nolette, C., Gagnon, P.-A., 1992. PC-Based Integrated Digital Pugging and Measurements for Block Adjustments. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B2, pp. 339–344.
- Baltsavias, E. P., 1993. Evaluation of DTP Scanners – a Case Study with the Agfa Horizon. Proc. of ISPRS Commission I Workshop «Digital Sensors and Systems», 21–25 June, 1993, Trento, Italy.
- Bethel, J., 1986. The DSR11 Image Correlator. Proc. ASPRS Annual Convention (Washington D.C.), (4), pp. 44–49.
- Ebner, H., 1976. Self Calibrating Block Adjustment. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 21, Part 3, Invited Paper, Commission III, ISP Congress, Helsinki.
- Grün, A., 1976. Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchner Bündelprogramm MBOP. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 21, Part 3, Presented Paper, Commission III/1, ISP Congress, Helsinki.
- Grün, A., 1978. Experiences with Self-Calibrating Bundle Adjustment. Presented Paper, ASP Convention, Washington D.C., Febr./März.
- Grün, A., 1986. Projekt «Uster» – ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung. VPK - Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 4.
- Grün, A., Runge, A., 1987. Projekt «Heinzenberg» – Präzisionsphotogrammetrie im Gebirge. VPK - Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 7.
- Grün, A., Baltsavias, E.P., 1988. Geometrically Constrained Multiphoto Matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(5), pp. 633–641.
- Grün, A., Beyer, H., 1990. DIPS II - Turning a Standard Computer Workstation into a Digital Photogrammetric Station. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part. 2, pp. 247-255 und ZPF – Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Nr. 1/91, pp. 2–10.

Partie rédactionnelle

Han, C.S., 1992. Digital Photogrammetry at the Survey Department. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B2, pp. 297–302.

Helava, U.V., 1987. Digital Comparator Correlator System. Proc. of the ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, pp. 404–418.

Kepuska, V.Z., Mason, S.O., 1991. An Artificial Neural Network Approach to Signalised Point Recognition in Aerial Photographs. First Australian Photogrammetric Conference, Sydney, Vol. 2, Nr. 37.

Kersten, Th., Stallmann, D., 1994. Aerotriangulation with digital OEEPE test image data. Unveröffentlichter Bericht über den OEEPE-Test an der ETH Zürich, Januar, 1994.

Pertl, A., 1984. Digital Image Correlation with the Analytical Plotter Planicom C 100. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 25(A3b), pp. 874–882.

Tsingas, V., 1991. Automatische Aerotriangulation. Vorträge der 43. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart, Heft 15, pp. 253–268.

Wilkins, D., 1990. Digital Photogrammetric Applications with the Prime-Wild S9 Analytical Plotter. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 28, Part. 2, pp. 35–42.

Adresse der Verfasser:
Thomas Kersten
Dirk Stallmann
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH Höggerberg
CH-8093 Zürich

150 Jahre
WELTMARKE **HAFF**

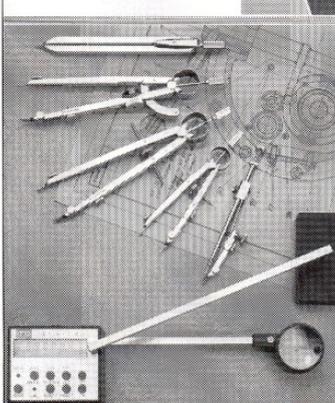
Die Garantie für Qualität und Präzision in allen Bereichen:
SCHULE. TECHNIK. VERMESSUNG

Informations-Coupon

Prospekt Schulreisszeuge
 HAFF-Gesamtkatalog
 Prospekt Planimeter

Senden an:
Firma/Name:
PLZ/Ort:

Racher & Co. AG
Marktgasse 12
8025 Zürich 1
Tel. 01 261 92 11
Fax 01 262 06 77

Gesucht guterhalten oder neuwertig kpl.

KERN-Reflektorhalter

(mit 1 Verlängerung und Zweibein-Stativ).

Zuschriften bitte unter Chiffre 1118 an
SIGWERB AG, Dorfmatenstrasse 26,
CH-5612 Villmergen.

SIEMENS NIXDORF

SICAD-CH/open – Das Softwarekonzept für Geoinformationssysteme.

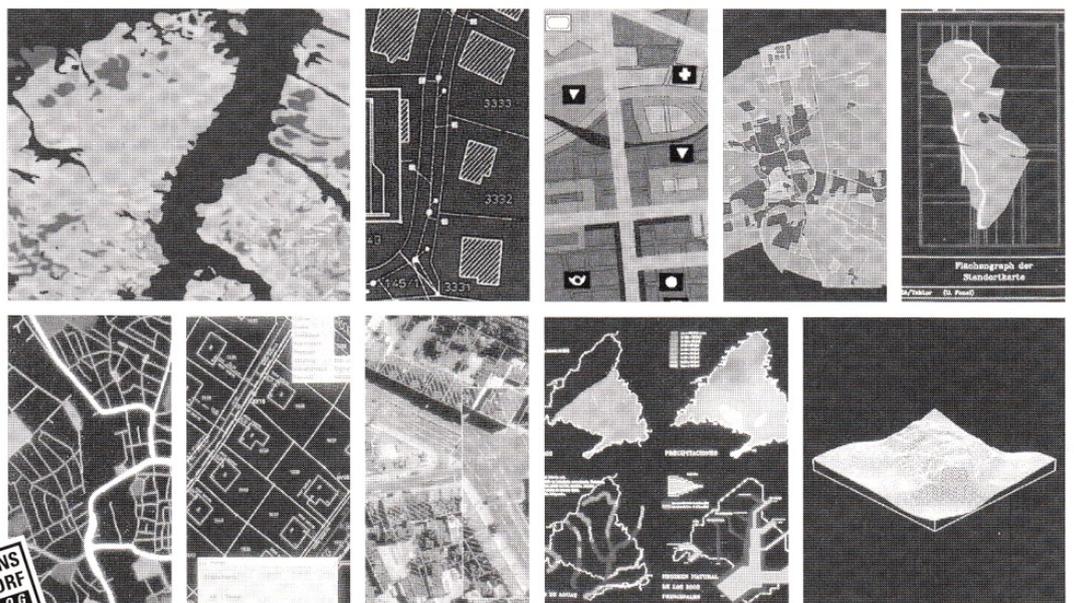
Mit SICAD-CH/open stellt Siemens Nixdorf jetzt die ganze Lösungsbreite unter UNIX zur Verfügung – mit den Standards der offenen Welt.

Herausragende Eigenschaften von SICAD-CH/open sind:

- Turn Key-Lösungen für Versorgung, Entsorgung und Gemeinden
- Datenbanken Oracle und Informix
- Verteilte Geo- und Alphadatenhaltung
- Verteilte Verarbeitung mit Client-Server-Architektur
- Hochleistungs-RISC-Workstations
- Standardisierte Eingabe unter OSF/Motif und X-Window
- Verarbeitung von Vektor- und Rasterdaten

Wenn Sie über SICAD-CH/open mehr wissen wollen: Herr Urs Wyss gibt gerne Auskunft.

Siemens Nixdorf Informationssysteme AG, Bereich GIS
Obstgartenstr. 25 8302 Kloten



**SIEMENS
NIXDORF
DIALOG**
☎ 155 8488

orbit 94
Halle 204
Stand F72

Synergy at work