

Erzeugung digitaler Geländemodelle  
durch automatische Bildzuordnung

Von der Fakultät  
für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Eberhard Gülch

aus Göppingen-Bezgenriet

München 1994

---

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften  
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Marshallplatz 8 • D – 80 539 München

Telefon (089) 23 031 113 • Telefax (089) 23 031 – 100/ – 240

Telex 5 213 550 dgfi d • E-mail hornik@dgfi.badw-muenchen.de

Hauptberichter: ern. Prof. Dr.-Ing. Dr.techn.h.c. Friedrich Ackermann

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing.habil. Dieter Fritsch

Prof. Dr. Kennert Torlegård

Tag der mündlichen Prüfung: 22.7.1993

---

© 1994 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,  
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung</b>	7
<b>1 Einleitung</b>	9
1.1 Digitale Geländemodelle, photogrammetrische Datenerfassung	9
1.2 Automatische DHM Generierung, Erwartungen und Möglichkeiten	10
1.3 Aufgabenstellung und Gliederung der Arbeit	12
<b>2 Klassifizierung von Bildzuordnungsverfahren</b>	14
2.1 Definition von Bildzuordnung	15
2.2 Lokale und regionale Bildinhalte zur Zuordnung	16
2.2.1 Bildausschnitte für die rasterorientierte Zuordnung	16
2.2.2 Merkmale und Strukturen für die merkmalsgestützte Zuordnung	17
2.2.3 Attribute von Bildausschnitten und Bildmerkmalen für die Zuordnung	21
2.2.4 Wahl von Bildausschnitten oder Bildmerkmalen für die Zuordnung	22
2.3 Annahmen über die Objekte der Zuordnung und die Bildentstehung	25
2.3.1 Epipolarbedingung	26
2.3.2 Opazität und Transparenz der Oberfläche	26
2.3.3 Modelle für die lokale Oberflächengeometrie bei der Zuordnung	28
2.3.4 Modelle für die globale Oberflächengeometrie bei der Zuordnung	31
2.3.5 Eindeutigkeit der Zuordnung	32
2.3.6 Topologische Nachbarschaft bei der Zuordnung	33
2.3.7 Radiometrische Ähnlichkeit von homologen Bildbereichen	34
2.4 Zuordnungsalgorithmen	34
2.4.1 Gütemaß für die Zuordnung	35
2.4.2 Lokale Konsistenzfindung bei der Zuordnung	36
2.4.3 Globale Konsistenzfindung bei der Zuordnung	37
2.4.4 Konvergenzbereich bei iterativen Zuordnungsalgorithmen	38
2.4.5 Interne Qualitätsmaße für Bildzuordnung	38
2.5 Objektbeschreibung	38
2.5.1 Resultate der Zuordnung	38
2.5.2 Ableitung einer gewünschten Objektbeschreibung	39
2.6 Kontrollstrategie für die Steuerung der Zuordnung	39
2.6.1 Bereitstellung von Steuerparametern für die Zuordnung	40
2.6.2 Methoden der Näherungswertbestimmung für den Zuordnungsalgorithmus	41
2.6.3 Selbstdiagnose der Zuordnung	43

<b>2.7 Kleinste Quadrate Zuordnung (LSM)</b>	44
2.7.1 Ausgangssituation	45
2.7.2 Die LSM Methode im Detail	46
2.7.3 Vereinfachung im Epipolarfall	49
2.7.4 Charakterisierung der LSM Methode im Überblick	49
2.7.5 Andere Bildzuordnungsverfahren nach der Kleinsten Quadrate Methode	50
<b>2.8 Merkmalsgestützte Zuordnung (FBM)</b>	51
2.8.1 Ausgangssituation	51
2.8.2 Die FBM Methode im Detail	52
2.8.3 Vereinfachung im Epipolarfall	54
2.8.4 Charakterisierung der FBM Methode im Überblick	55
2.8.5 Andere Verfahren der merkmalsgestützten Zuordnung	55
<b>3 Experimentelle Vergleiche</b>	57
<b>3.1 Test Design</b>	58
3.1.1 Datenmaterial	58
3.1.2 Aufgabenstellung und Durchführung	59
3.1.3 Fragenkataloge für Verfahren und Bearbeitung	60
<b>3.2 Zuordnungsansätze - Verfahren und Strategien</b>	61
3.2.1 Klassifizierung der Zuordnungsansätze	61
3.2.2 Einteilung der Zuordnungsansätze nach Genauigkeit und Automationsgrad	63
3.2.3 Detailbeschreibung aller Ansätze	64
<b>3.3 Testauswertung</b>	70
3.3.1 Art der Vergleichsmessungen	70
3.3.2 Genauigkeit der manuellen Vergleichsmessungen	70
3.3.3 Qualitätsmaße zur vergleichenden Beurteilung der empirischen Testergebnisse	71
<b>3.4 Ergebnisse im Überblick</b>	72
<b>3.5 Anwendbarkeit und Flexibilität der Verfahren</b>	77
3.5.1 Abhängigkeit von der Komplexität der Objektoberfläche	77
3.5.2 Abhängigkeit vom Bildmaßstab	79
3.5.3 Diskussion ausgewählter Ansätze	80
<b>3.6 A priori Erwartungen</b>	84
3.6.1 Abhängigkeit von der Epipolargeometrie	84
3.6.2 Automationsgrad der Zuordnungsverfahren	85
3.6.3 Genauigkeitsklassen der Zuordnungsverfahren	86
<b>3.7 Genauigkeit und Zuverlässigkeit - Ansätze im Vergleich</b>	88
3.7.1 Vergleich der Ansätze je Bildpaar	88
3.7.2 Bewertung der Ansätze	88
<b>3.8 Selbstdiagnose</b>	92
3.8.1 Interaktive Kontrolle und verbale Beurteilung der Zuordnung	92
3.8.2 Automatische Kontrolle und numerische Beurteilung	93

3.9	<b>Gesamtbewertung</b>	94
4	<b>Automatische DGM/DHM Erzeugung</b>	96
4.1	<b>Geländebeschreibung und Geländemodellierung</b>	96
4.2	<b>Konventionelle photogrammetrische DGM/DHM Erzeugung</b>	97
4.2.1	Konventionelle Methoden der photogrammetrischen DHM Erfassung	98
4.2.2	Konventionelle DGM/DHM Generierung	98
4.3	<b>Automatische DHM Generierung durch digitale Bildzuordnung</b>	99
4.3.1	Anforderungen an die automatische DHM Generierung	99
4.3.2	Eignung von Bildzuordnungsverfahren zur DHM Messung	101
4.4	<b>Realisierung automatischen DHM Generierung</b>	103
4.4.1	Technische Voraussetzungen für die Automation der DHM Generierung	103
4.4.2	Konzeptionelle Realisierungsmöglichkeiten	103
4.5	<b>Ein erstes konkretes Konzept zur automatischen DHM Generierung</b>	104
5	<b>Ein Pilotsystem zur automatischen DHM Generierung</b>	106
5.1	<b>Hardware Voraussetzungen</b>	107
5.2	<b>Vorbereitung der Messung</b>	110
5.2.1	Orientierung	110
5.2.2	Sensorkalibrierung	110
5.2.3	Digitalisierung der Meßgebiete	111
5.2.4	Steuerung der Messung	111
5.2.5	Auswahl der Prozeßparameter	112
5.2.6	Eingabe von Startpunkten	112
5.3	<b>Messung</b>	112
5.3.1	Datenstruktur	112
5.3.2	Meßmodule	116
5.4	<b>DHM Generierung</b>	116
5.5	<b>Nachbearbeitung</b>	118
6	<b>Prinzipierprobung des entwickelten DHM Pilotsystems</b>	119
6.1	<b>Ziele der Prinzipierprobung</b>	119
6.2	<b>Testdatenmaterial</b>	120
6.3	<b>Testdesign</b>	121
6.3.1	Messung der FBM-Daten	123
6.3.2	Reduktion der FBM-Daten mit interner Genauigkeitsanalyse	124
6.3.3	Ableitung des FBM-DHM und externe Genauigkeitsanalyse der reduzierten FBM-Daten	126
6.3.4	Messung der LSM-Daten, Genauigkeitsanalyse und Ableitung des LSM-DHM	127
6.3.5	Manuelle DHM Erfassung	127
6.3.6	Genauigkeit der manuell ermittelten Vergleichsdaten	127
6.3.7	Vergleiche der automatisch gemessenen Höhenmodelle mit dem manuellen DHM	129

<b>6.4 Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen</b>	129
6.4.1 Anzahl automatisch gemessener Punkte	129
6.4.2 Ergebnisse eines Teilprojekts - Methodische Zusammenstellung	131
6.4.3 Zahlenmäßige Ergebnisse aller Projekte im Überblick	135
<b>6.5 Detailanalyse und Diskussion</b>	136
6.5.1 Analyse der erreichten Genauigkeit	137
6.5.2 Analyse der erreichten Zuverlässigkeit	143
6.5.3 Einflüsse der Lage im Stereomodell	147
6.5.4 Einflüsse der Texturrichtung	147
6.5.5 Datenmengen, Geschwindigkeit, Anwendbarkeit	149
<b>6.6 Spezifikationen für ein operationelles System</b>	151
<b>Schlussbetrachtung und Ausblick</b>	153
<b>Literaturverzeichnis</b>	156
<b>Anhang A</b>	162
<b>Danksagung</b>	168
<b>Lebenslauf</b>	168

## ZUSAMMENFASSUNG

### Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung

Digitale Geländemodelle und ihre Folgeprodukte spielen eine immer größere Rolle für Anwendungen im Bereich der Geowissenschaften. Die Methoden der digitalen Bildverarbeitung bieten weitgehende Möglichkeiten die photogrammetrische Erfassung eines digitalen Geländemodells, bzw. eines digitalen Höhenmodells, DHM, zu automatisieren. Entscheidende Hindernisse sind die 3D-Störungen hinsichtlich einer zu erfassenden Geländeoberfläche, also z.B. Häuser oder Vegetation, die insbesondere in mittleren bis größeren Bildmaßstäben in Erscheinung treten, sowie Bruch- und Strukturlinien des Geländes.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden digitale Bildzuordnungsverfahren im Hinblick auf praktische Anwendung theoretisch untersucht. Es werden dazu systematische Kriterien zur Klassifikation von Zuordnungsverfahren eingeführt. Die Zuordnungsverfahren gliedern sich hauptsächlich in rasterorientierte und in merkmalsgestützte Zuordnung. Aus der Analyse eines umfangreichen empirischen Tests an realem Bildmaterial konnten schließlich Empfehlungen für den Einsatz bestimmter Zuordnungsverfahren unter den wesentlichen Gesichtspunkten von Anwendbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit abgeleitet werden. Es hat sich gezeigt, daß vor allem die Messtrategie eine herausragende Rolle spielt, was die Anwendbarkeit betrifft. Mit rasterorientierten Verfahren zur Feinzuordnung werden Genauigkeiten in der automatischen Parallaxenmessung erreicht, die besser oder gleich der stereoskopischen Meßgenauigkeit des Menschen sind. Auch einige der merkmalsgestützten Verfahren können nahezu die gleiche Genauigkeit erreichen.

In einem zweiten Teil der Arbeit werden Anforderungen an eine automatische Erfassung digitaler Geländemodelle formuliert und in ein konkretes Konzept umgesetzt. Dieses Konzept beruht gegenüber der konventionellen photogrammetrischen DHM Erfassung auf einer völlig neuen Philosophie, nämlich erstens der schnellen Messung sehr vieler, u.U. weniger genauen Punkte und einer daran anschließenden statistischen Analyse der redundanten Messungen. Im Ergebnis erreicht man sehr genaue und zuverlässige Geländepunkte und die Elimination von 3D-Störungen. Zweitens werden Messung und DHM Generierung nicht mehr getrennt betrachtet, sondern integriert.

Dieses Konzept wurde als Pilotsystem für die automatische Generierung digitaler Geländemodelle aus digitalisierten Luftbildern für kleine und mittlere Bildmaßstäbe realisiert. Das Pilotsystem arbeitete mit zwei verschiedenen Bildzuordnungsverfahren, rasterorientiert und merkmalsgestützt, und einer speziell ausgearbeiteten Meßstrategie zur topographischen Geländeerfassung. Die Tragfähigkeit und Güte des Konzepts wurde anhand der bisher umfangreichsten empirischen Untersuchung dieser Art an realem Bildmaterial nachgewiesen.

Dieses Pilotsystem war in der Lage, die in kleinen und mittleren Maßstäben auftretenden 3D-Störungen durch algorithmische Methoden sicher zu eliminieren. Bruch- und Strukturlinien können genügend genau durch die hohe Punktdichte repräsentiert werden. Eine merkmalsgestützte Zuordnung vieler Punktmerkmale war ausreichend, um mit der anschließenden Reduktion der redundanten Messungen auf repräsentative Geländepunkte eine Genauigkeit der automatisch generierten digitalen Höhenmodelle unter 0.1 % der Flughöhe zu erreichen. Sie ist somit vergleichbar mit der Genauigkeit sehr guter manuell gemessener Höhenmodelle. Vorarbeiten und Akzeptanzüberprüfung wurden vorerst noch vom Operateur übernommen, die Messung erfolgte automatisch.

Aus den Erfahrungen der Prinzipuntersuchung des Pilotsystems konnten abschließend Spezifikationen für ein operationell einsetzbares System zur Generierung von digitalen Geländemodellen mit digitaler Bildzuordnung gegeben werden. Dieser Entwurf ist inzwischen von dritter Seite weitgehend in ein operationelles System umgesetzt worden, das die geäußerten hohen Erwartungen an die Genauigkeit, Brauchbarkeit und Schnelligkeit erfüllt, so daß die hier verfolgte Entwicklung ihre Bestätigung erfahren hat.



# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Digitale Geländemodelle, photogrammetrische Datenerfassung

In den letzten Jahren hat das **digitale Geländemodell** (DGM) als topographische Beschreibung der Erdoberfläche zunehmend an Bedeutung gewonnen. Als eigenständiges Produkt ist es Bestandteil von Geographischen Informationssystemen (GIS), auf das, je nach Anwendung, viele Folgeprogramme zugreifen. Insbesondere ist es ein Hilfsmittel für die Orthophotoherstellung und dient zur Ableitung von Höhenschichtlinien- und Neigungskarten. Sprachlich und inhaltlich sollte man zwischen dem digitalen Geländemodell (DGM) und dem digitalen Höhenmodell (DHM) unterscheiden. In der bisherigen Diskussion und in der Programm-Realisierung ist das DGM jedoch stets identisch mit einem DHM, d.h. es handelt sich um die flächenhafte Höhendarstellung und die morphologische Beschreibung der Erdoberfläche, so daß im folgenden DGM und DHM als synonyme Bezeichnungen verwendet werden, solange nichts anderes angegeben ist.

Die **Datenerfassung** für ein DHM erfolgt entweder durch terrestrische Vermessung, durch die Digitalisierung von Höhenschichtlinien in Karten oder durch photogrammetrische Methoden. Der überwiegende Teil der Datenerfassung geschieht auf photogrammetrischem Wege und soll hier im Mittelpunkt stehen.

Die konventionellen Methoden zur photogrammetrischen Erfassung eines digitalen Höhenmodells stützen sich bisher auf den menschlichen Operateur, der geeignete Punkte zur Messung auswählt und die jeweilige stereoskopische Höhenmessung im Stereomeßgerät (z.B. Analytischer Plotter) nach erfolgter Orientierung durchführt. Aus den Höhenmessungen wird dann das DHM rechnerisch abgeleitet. Die traditionellen Verfahren zur photogrammetrischen Geländeerfassung wurden im Laufe der Jahre immer weiter entwickelt, um den Operateur bei der Messung zu unterstützen und die Erfassung effizient zu gestalten. Zu nennen sind hier stellvertretend für andere die Arbeiten über Progressive Sampling (Makarovic, 1973) und Composite Sampling (Makarovic, 1979). Diese Methoden einschließlich ihrer späteren Verfeinerungen zielen auf die Erfassung der Geländeoberfläche mit einer hinreichenden, aber doch möglichst geringen Anzahl von zu messenden Geländepunkten. Die Erfassungs-Strategie und entsprechend die damit einhergehende Entwicklung der Programme zur DHM Berechnung (Ebner, 1980; Köstli, 1986; Kraus, 1982) ist somit gekennzeichnet durch eine möglichst geringe Anzahl von Geländepunkten zur allgemeinen Flächenbeschreibung und der besonderen Berücksichtigung signifikanter geomorphologischer Strukturen, wie Bruch- und Strukturlinien. Beide Komponenten ergänzen sich gegenseitig.

Betrachtet man den manuellen **Gesamtaufwand** bei der photogrammetrischen Erfassung eines DHM durch Operateur-Messungen, so ist typischerweise für ein durchschnittlich geeignetes Stereomodell von einer halben Stunde Vorbereitungszeit (einschließlich Orientierung), 2-3 Stunden für die Messung von ca. 5000 Massenpunkten und einer weiteren Stunde für die Erfassung von Bruch- und Strukturlinien des Geländes, die z.B. mit 2000 zusätzlichen Punkten repräsentiert werden, auszugehen. Häufig werden gleich viele Bruchlinienpunkte wie Massenpunkte erfaßt, womit der Aufwand entsprechend steigt. Insgesamt ist zu ersehen, daß der Operateur für drei recht unterschiedliche Aufgaben eingesetzt wird. Erstens für die photogrammetrische **Vorbereitung**, d.h. die innere, relative und absolute Orientierung, z.B. am Analytischen Plotter. Danach folgt als getrennter Schritt zweitens der doch meist recht eintönige Vorgang der **Höhenmessung** der flächenhaft verteilten Massenpunkte und drittens die intelligente Auswahl und **Erfassung der signifikanten, morphologisch charakteristischen Geländemerkmale**. Die anspruchsvolleren Aufgaben 1 und 3 stellen also zeitlich gesehen in der Regel den kleineren Teil des manuellen Meßaufwandes dar, sie erfordern aber den erfahrenen und stets sehr aufmerksamen und konzentrierten Operateur. Für den größten Teil der Messung wird dem Operateur, abgesehen von der Punktauswahl, keine besondere Intelligenzleistung abverlangt, er wird mit eintönigen und ermüdenden Aufgaben belastet, die aber dennoch stets höchste Aufmerksamkeit verlangen.

Schon aus dieser Sicht besteht ein Bedürfnis zur Automation der Höhenmessung für die Erfassung eines DHM's, welche das Thema dieser Arbeit bildet.

## 1.2 Automatische DHM Generierung, Erwartungen und Möglichkeiten

Die automatische Generierung eines digitalen Höhenmodells steht auch aus allgemein technischen Gründen im Mittelpunkt derzeitiger Entwicklungen. Eine Höhenmessung gleichgesetzt mit einer  $x$ -Parallaxenmessung bzw.  $x$ -Parallaxen Beseitigung ist ein objektiver, mathematisch definierbarer Prozeß, der daher grundsätzlich zur **Automation** offensteht. Die automatisierte Höhenmessung zur Erfassung eines DHM geht allerdings über das Problem einer reinen Parallaxenmessung hinaus. Es lassen sich drei **Problemebenen** unterscheiden.

- (1) Die Geländeoberfläche ist sichtbar. Die Höhenmessung ist automatisierbar. Zu unterscheiden bleibt noch zwischen regelmäßiger oder unregelmäßiger Punktanordnung, eventuell müssen die am besten meßbaren Punkte gesucht werden. Die Punktdichte kann z.B. von der Krümmung der Geländeoberfläche abhängig gemacht werden.
- (2) Die Geländeoberfläche ist nicht sichtbar. Es liegen 3D-Störungen vor, also Vegetation und Bebauung, die berücksichtigt bzw. ausgeklammert werden müssen.
- (3) Morphologische Qualität ist gefragt, also die Erfassung von signifikanten Geländemerkmale mittels Bruch- und Strukturlinien. Weitergehende Interpretationsarbeit ist erforderlich. Allerdings kann die Notwendigkeit der Erfassung von Bruchkanten möglicherweise durch hohe Punktdichte zum Teil kompensiert werden.

Bisher hat der **Mensch** alle diese Probleme bei der Messung mehr oder weniger **gleichzeitig gelöst**.

Hinsichtlich einer **Automation** der DHM Erfassung sind vorerst folgende **Stufenlösungen** denkbar.

- (a) Die Aufgaben der Problemebene (1) werden automatisiert, die restlichen Probleme (2) und (3) werden interaktiv gelöst.
- (b) 3D-Störungen werden automatisch erkannt und berücksichtigt, wobei größere Flächen, in denen nicht gemessen werden kann, interaktiv ausgeschieden werden.
- (c) Bruchlinien werden interaktiv erfaßt. Da es sich um ein geometrisches Problem handelt, ist auch dieser Vorgang potentiell automatisierbar.
- (d) Interaktive Erfassung und Beschreibung künstlicher Objekte und von Vegetation.
- (e) Interaktive Qualitätskontrolle der DHM Erfassung. Sie ist für alle Stufen (a)-(d) von Bedeutung und kann in hohem Maß mit automatischen Methoden unterstützt werden.

Mit neuen Werkzeugen können auch neue Methoden verwendet werden, anstatt nur bestehende Verfahrensabläufe zu kopieren, was nicht alleiniger Zweck einer Automation sein sollte.

Zur Lösung dieser Aufgaben sind sowohl algorithmische Lösungen als auch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) denkbar. Bei algorithmischen Lösungen muß vom bisher gültigen Prinzip minimaler Punktmengen abgegangen werden. Bisher sollten aus Aufwandsgründen so wenig Punkte wie möglich gemessen werden, nun kann in algorithmische Lösungen Vorwissen eingebracht werden und die fehlende Intelligenz durch die Messung und statistische Analyse einer großen Zahl von Punkten ersetzt werden. Bei den Verfahren der Künstlichen Intelligenz müssen Vorwissen, Strategien und Regeln in geeigneter Weise in wissensbasierte Systeme eingebracht werden. Speziell die Interpretationsprobleme können mit solchen Methoden angegangen werden. Der menschliche Operateur sollte sich eigentlich nur auf die Vorbereitung und die Qualitätskontrolle konzentrieren, d.h. es sollte keine Interaktion während des Meßvorgangs erfolgen müssen.

Es ist offensichtlich, daß die zunächst angestrebten algorithmischen Lösungen der Stufe (a) einen wesentlichen Teil der automatischen DHM Erfassung leisten können, der in vielen Fällen auch ausreichend sein mag, der aber dem Anspruch einer vollständigen DHM Erfassung nicht genügen kann. Algorithmische Lösungen sind darüber hinaus für die Aufgaben der Stufen (b) und (c) möglich. Verfahren der künstlichen Intelligenz eignen sich im Prinzip für Lösungen auf den Stufen (b), (c) und (d). Die interaktive Qualitätskontrolle (e) sollte sich über die Resultate aller Stufen erstrecken und kann sowohl durch algorithmische, als auch wissensbasierte Methoden unterstützt werden. Unabhängig davon, welcher Lösungsweg gewählt wird, sollten die Verfahren der automatischen DHM Erfassung potentiell schnell und

bezüglich der weitergehenden Erfassung künstlicher Objekte und der Vegetation (Stufe d) ausbaubar sein, der letzten gegenwärtig abzusehenden Stufe.

### **Was kann die digitale Bildverarbeitung zur automatisierten DHM Erfassung beitragen?**

Das moderne Werkzeug zur Automation der DHM Erfassung ist die **Bildverarbeitung**, die selbst einen Weg von der analogen Bildverarbeitung zur digitalen Bildverarbeitung beschritten hat. Welche Möglichkeiten der Bildverarbeitung bisher zur Automation der DHM Erfassung ausgenutzt wurden, soll im folgenden umrissen werden.

Schon in den fünfziger Jahren gab es Ansätze und Entwicklungen, um mittels elektronischer Bildkorrelation den Vorgang der Parallaxen- bzw. Höhenmessung automatisch und schnell durchzuführen. Zu nennen sind hier insbesondere die frühen Arbeiten von G. Hobrough mit dem Stereomat und dem GESTALT PHOTOMAPPER (Hobrough, 1959, 1978). Ein Überblick über die Entwicklungen kann z.B. (Konecny, 1981) entnommen werden. Der GESTALT PHOTOMAPPER und der BENDIX AS-11 sind Beispiele für Geräte mit automatischer elektronischer Höhenmessung, die Eingang in die Praxis gefunden haben. Aus verschiedenen Gründen konnte sich die elektronische Bildkorrelation aber nicht im größeren Umfang durchsetzen, so wurde z.B. 1968 auch die Entwicklung des Systems A2000 bei der Firma WILD abgebrochen. Die elektronische Korrelation erlaubt zwar eine schnelle Höhenmessung, aber es hat sich frühzeitig gezeigt, daß die sogenannten 3D-Störungen, also Vegetation, Bebauung usw. große Probleme darstellen. Der Anwendungsbereich blieb daher auf kleine Bild- und Kartenmaßstäbe beschränkt, da nur dort die 3D-Störungen klein genug sind, um vernachlässigt werden zu können. Zudem hatten die Bildkorrelatoren Probleme in der Detailgenauigkeit und waren hinsichtlich der Korrelationsmethode nicht sehr flexibel, da stark an die Hardware gebunden.

Mit dem Einzug der Methoden der digitalen Bildzuordnung in die Photogrammetrie ab den siebziger Jahren ergaben sich vollkommen neue und interessante Aspekte für die Automation der DHM Erfassung, verbunden mit der Erwartung, die Schwierigkeiten bei der elektronischen Korrelation durch methodisch bessere Ansätze zu überwinden. Die erfolgte Entwicklung ist in erster Linie durch methodische Entwicklungen und ihre Umsetzung in Computer Programme gekennzeichnet. Die parallele, enorme Entwicklung der Computer-Hardware hat aber die realistische Umsetzung erst ermöglicht. In (Helava, 1976, 1988b) sind Übersichten über digitale photogrammetrische Systeme und Konzepte gegeben, die die digitale Höhenmessung als Modul vorsehen.

Im wesentlichen lassen sich drei Hauptrichtungen der Entwicklung digitaler photogrammetrischer Systeme insbesondere für die automatische Höhenmessung unterscheiden. Unter völliger Loslösung von jeglicher photogrammetrischer Hardware werden **Zuordnungsalgorithmen** für die Parallaxenmessung auf im Computer gespeicherte, digitalisierte Bilder angewandt und in **Batch Prozessen** verarbeitet. Beispiele hierfür sind u.a. die Verfahren, die in (Kreiling, 1976; Claus, 1983; Boochs, 1987) beschrieben sind. Diese Ansätze stellen hohe Anforderungen an Speicherkapazität und Rechengeschwindigkeit, die heute, durch die Entwicklung schneller Arbeitsstationen, nicht mehr so kritisch sind (Mayr, 1991; Kaiser, 1991). Eine zweite wesentliche Entwicklungsrichtung zielte in Richtung **hybrider Systeme**. Unter Beibehaltung des Mediums Film als Datenträger wurden Analytische Plotter oder Komparatoren durch CCD Kameras ergänzt, mit denen kleine Bildausschnitte digitalisiert werden, um on-line im angeschlossenen Rechner verarbeitet zu werden. In (Ackermann, 1983; Pertl, 1985) ist ein derartiges System in Verbindung mit dem ZEISS-PLANICOMP beschrieben. Cogan u.a. (Cogan, 1984) berichten von einer entsprechenden Entwicklung auf dem analytischen Plotter KERN-DSR 11. In (Helava, 1987) wird ein System in Verbindung mit einem Monokomparator vorgestellt. Diese Systeme werden heute als Zwischenstufe angesehen, die bereits als überholt gilt. Die dritte Entwicklungslinie zielt auf **digitale photogrammetrische Arbeitsstationen** mit leistungsfähiger Computer-Hardware, implementierter photogrammetrischer Software z.B. zur Automation der Höhenmessung und Einrichtungen, die dem Operateur die stereoskopische Betrachtung und Messung und somit die interaktiven Arbeiten zur Umgehung von 3D-Störungen und zur Erfassung von Bruchlinien ermöglichen. Beispiele für solche Entwicklungen sind in (Cogan, 1988; Konecny, 1988; Euget, 1988) dargestellt. Ein System im Einzelbild Modus wird von (Stokes, 1988) beschrieben.

Die konzeptionelle Entwicklung hat sich besonders auf Algorithmen zur Zuordnung konzentriert, wobei eine gewisse Beeinflussung aus dem Fachgebiet des Computer Sehens erfolgte. Schon früh wurden Korrelationsverfahren (z.B. Kreiling, 1976) eingesetzt, die auch in neueren Systemen (Konecny, 1988) die Grundlage für die Zuordnung bilden, da sie sehr schnell sind und leicht implementiert werden können. Ein wesentlicher Beitrag der Photogrammetrie lag in der Ausarbeitung und Weiterentwicklung von Zuordnungsverfahren unter Verwendung der Kleinsten Quadrate Methode. In

(Wrobel, 1988) sind die verschiedenen Verfahren der Kleinste Quadrate Zuordnung dargestellt. In den letzten Jahren haben auch Verfahren zur merkmalsgestützten Zuordnung Einzug in der Photogrammetrie gefunden, z.B. (Benard, 1986; Förstner, 1986). Ein Überblick über die gebräuchlichsten Zuordnungsverfahren in der Photogrammetrie und im Bereich Computer Sehen kann (Lemmens, 1988) und (Hannah, 1988) entnommen werden. Es bleibt festzuhalten, daß eine sehr große Zahl von Bildzuordnungsverfahren existiert, über die vereinzelt auch Angaben hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Anwendung auf Luftbilder vorliegen. Vergleichende Untersuchungen haben aber nur in sehr beschränktem Umfang stattgefunden. Ehlers (Ehlers, 1983) hat verschiedene Korrelationsmethoden empirisch mit Hilfe digitalisierter Luftbilder untersucht. Day u.a. (Day, 1988) berichten über den Vergleich dreier Zuordnungsverfahren für SPOT Bilder. Auch über die mögliche Verknüpfung verschiedenartiger Bildzuordnungsverfahren zu einem Gesamtmodul und über hierarchische Lösungen sind nur wenige Versuche bekannt.

Die Verknüpfung von Bildzuordnung und Meßstrategien zur Erfassung eines digitalen Geländemodells aus Luftbildern und die Integration in ein digitales photogrammetrisches System ist in den letzten Jahren verstärkt angegangen worden, nachdem sich die Entwicklungsarbeit anfänglich auf die Oberflächenerfassung in der Nahbereichsphotogrammetrie konzentriert hatte (Schewe, 1986). Die Erfassung der Geländeoberfläche ist ein Problem von oftmals wesentlich größerer Komplexität. Die Entwicklungen in diesem Bereich können sich auf keine vergleichenden Untersuchungen zur Eignung von Zuordnungsverfahren im Luftbild stützen. Auch für die eigentliche Organisation der Messung und die Einbeziehung des Operateurs liegen wenige Ansätze vor.

### **Fazit**

Man kann also feststellen, daß die technischen Voraussetzungen gegeben sind, um eine Automation der DHM Erfassung anzugehen. Sowohl die **Hardware Voraussetzungen** als auch Methoden zur **Bildzuordnung** existieren, um zumindest die oben umrissenen Stufen (a) und (b) der automatisierten DHM Erfassung zu bearbeiten. Was dagegen fehlt ist erstens ein detailliertes **Konzept für die Realisierung** der Stufen (a) und (b), sowie zweitens eine Studie über die Eigenschaften der Bildzuordnungsverfahren im Hinblick auf ihre spezielle Eignung zur automatischen digitalen Geländeerfassung.

## **1.3 Aufgabenstellung und Gliederung der Arbeit**

Das Ziel dieser Arbeit ist somit die Erstellung und Untersuchung von Konzepten für die automatische DHM Generierung. Ausgangspunkt dazu ist eine umfassende, vergleichende empirische Untersuchung von Bildzuordnungsverfahren. Dazu wird das Testmaterial der 1984 eingesetzten Arbeitsgruppe III/4 der ISPRS (Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung) verwendet, die im Bereich der Photogrammetrie zum ersten Mal eine breite vergleichende Untersuchung von Bildzuordnungsverfahren an realem Bildmaterial organisiert hat (Gülch, 1988). Diese Untersuchung erstreckt sich auf einen großen Teil der in Frage kommenden Verfahren und ihrer Eignung zur DHM Messung.

Als Ergebnis der vom Verfasser erstellten und hier vertieften empirischen Analyse wird ein Konzept zur automatischen DHM Erfassung für den Luftbildfall in kleinen und mittleren Maßstäben entwickelt, das vermittels redundanter Messungen in der Lage ist, 3D-Störungen zu einem hohen Grad zu überwinden. Dieses Konzept beruht auf einer grundsätzlichen Analyse der derzeit absehbaren Anforderungen an eine automatische DHM Erfassung und den Erfahrungen aus dem empirischen Vergleichstest der digitalen Bildzuordnungsverfahren. Dieses Konzept verfolgt nicht die weitverbreitete Methode der reinen Automation bestehender, klassischer Verfahrensabläufe mit herkömmlichen analogen Bildern, sondern stellt einen neuen großen Schritt zur Ausnützung der viel weitergehenden und noch nicht vollständig abzusehenden Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung in der Photogrammetrie dar. Dieses Konzept wurde als Pilotsystem realisiert, das sich neuer Methoden und Strategien bedient, und in der bisher umfassendsten empirischen Untersuchung dieser Art überprüft und analysiert wurde.

Aus dieser Zweiteilung der Aufgabenstellung erfolgt auch eine **Gliederung** der Arbeit in zwei Hauptteile.

Im **ersten Teil** dieser Arbeit (Kapitel 2 bis 4) wird die Eignung verschiedener Bildzuordnungsverfahren bei der Erfassung digitaler Geländemodelle untersucht und werden die konzeptionellen Anforderungen an eine automatische DHM Erfassung formuliert.

In Kapitel 2 werden hierfür als Rüstzeug für die nachfolgenden Betrachtungen die Begriffe der Bildzuordnung sowie die Grundbestandteile der Bildzuordnungsverfahren definiert. Die Ausführungen sind von grundsätzlicher, allgemeiner Art. Die Klassifizierung eines Bildzuordnungsverfahrens nach seinen Grundbestandteilen dient zur tiefergehenden Analyse eines Verfahrens, also z.B. der Eignung für die DHM Erfassung, und bildet die Grundlage für die Vergleiche zwischen Bildzuordnungsverfahren.

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse des empirischen Tests der Arbeitsgruppe III/4 der ISPRS als dem bisher größten und umfassendsten Vergleich einer großen Zahl verschiedener Bildzuordnungsverfahren an realem Bildmaterial unter besonderer Berücksichtigung von Anwendbarkeit, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Flexibilität analysiert. Diese Analyse geht dabei weit über die in (Gülch, 1988, 1991a) schon veröffentlichten Ergebnisse hinaus.

In Kapitel 4 werden als Fazit die Forderungen und Randbedingungen einer automatischen DHM Erfassung zusammengestellt und die in den Kapiteln 2 und 3 betrachteten Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur DHM Erfassung bewertet. Daraus werden Möglichkeiten zur Realisierung der automatischen DHM Erfassung entwickelt.

Im **zweiten Teil** dieser Arbeit (Kapitel 5 und 6) wird dann ein Pilotsystem zur automatischen DHM Generierung vorgestellt und untersucht. Dieses Pilotsystem, das auf den formulierten Anforderungen beruht, wird an Hand empirischer Untersuchungen analysiert und bewertet. Es erfaßt den Luftbildfall für die Bildmaßstäbe von 1:10 000 bis 1:100 000 und kann vermittels redundanter Messungen die kritischen 3D-Störungen weitgehend überwinden. Es verknüpft zwei Verfahren der Bildzuordnung in einer hierarchischen Meßstrategie. Hier erfolgt eine systematische Darstellung des Gesamtsystems (Kapitel 5). Von besonderem Interesse sind dabei die angewandte Meßstrategie und die Strategie zur Verknüpfung der Zuordnungsverfahren sowie die empirische Eignungsanalyse des Konzepts (Kapitel 6), die in Teilen bereits in (Hahn, 1988, 1989) beschrieben ist.

Auf die resultierenden Erfahrungen aufbauend werden abschließend Spezifikationen für ein operationell einsetzbares System gegeben, das weitere Möglichkeiten der Bildverarbeitung aufgreift und das bereits die Phase der praktischen Erprobung erreicht hat (Krzystek, 1991, Ackermann, 1993), das aber nicht weiter Gegenstand dieser Arbeit ist.

Mit einer Diskussion der Auswirkungen des gegenwärtigen und des zu erwartenden Einsatzes digitaler Methoden in der Erfassung des DHM's wird die Arbeit abgeschlossen.

## 2 KLASSIFIZIERUNG VON BILDZUORDNUNGSVERFAHREN

Zuordnung ist ein zentraler Begriff zur Bildauswertung. Es geht um die Identifizierung von Objekten oder Strukturen an Hand von Bildern, bzw. die Zuordnung von Abbildungen desselben Objekts in verschiedenen Bildern. Mit der letzteren Aufgabe haben wir es bei der DHM Erfassung zu tun, wobei die Zuordnung in der Regel auf 2 Bilder beschränkt ist. Vielfach wird dieser Vorgang auch als Bildkorrelation bezeichnet, nach den ersten verwendeten Verfahren. Zuordnung ist ein sehr allgemeiner Begriff, der hier für alle weiteren Betrachtungen im Sinne einer Bildzuordnung zur Objekt-rekonstruktion eingeschränkt wird (2.1).

Um verschiedene Bildzuordnungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Geländeoberflächenrekonstruktion vergleichend untersuchen zu können, ist es vorteilhaft, Kriterien zu definieren, nach denen die Verfahren klassifiziert werden können.

Eine Möglichkeit der Klassifizierung von Bildzuordnungsverfahren besteht in der Auflistung von wenigen repräsentativen Verfahren, wie sie u.a. in (Ayache, 1987; Hannah, 1988; Lemmens 1988; Price, 1985) erfolgt ist. Jede Gruppe von Verfahren besteht dann aus dem repräsentativen Verfahren und allen Varianten. Dieses Vorgehen hat den Nachteil, daß es schwierig ist, Verbindungen zwischen den Verfahrensguppen herzustellen, bzw. neue Verfahren darin aufzunehmen. Die Einteilung ist einer ständigen Veränderung unterworfen und macht neue Klassifizierungen erforderlich. Sie ist somit für die hier beabsichtigte vergleichende Untersuchung nicht gut geeignet.

Es wird hier deshalb ein Weg gewählt, der Bildzuordnungsverfahren nach ihren wesentlichen Grundbestandteilen klassifiziert. Dieser Ansatz beruht darauf, daß sich Bildzuordnungsverfahren in eine Anzahl fester Grundelemente zerlegen lassen, die sich unter Beachtung bestimmter Regeln frei kombinieren lassen. Damit können alle Bildzuordnungsverfahren auf der Basis eines kleinen, aber umfassenden Gerüsts von Klassifizierungskriterien beschrieben werden, die in Tabelle 2.1 zusammengestellt sind.

Diese Grundbestandteile oder Module reichen von dem Gegenstand der Zuordnung (2.2), über getroffene Annahmen zum Objekt und zur Aufnahme (2.3), über den Zuordnungsalgorithmus selbst (2.4) und die Art der Objektbeschreibung durch die Zuordnung (2.5) bis hin zu einer Kontrollstrategie (2.6), die das Bildzuordnungsverfahren steuert und die Verbindung zu übergeordneten Prozessen vermittelt.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Auswahl der Bildobjekte zur Zuordnung</li><li>• Objekt- und Aufnahmemodell der Zuordnung</li><li>• Zuordnungsalgorithmus</li><li>• Objektbeschreibung durch die Zuordnung</li><li>• Kontrollstrategie zur Steuerung der Zuordnung</li></ul> |
|---|

**Tabelle 2.1** Allgemeine Klassifizierungskriterien für Bildzuordnungsverfahren.

Diese Grundbestandteile eines Bildzuordnungsverfahrens werden im folgenden definiert und mit Beispielen erläutert. Durch Hinweise auf jeweils entsprechende typische Bildzuordnungsverfahren wird ein Bezug zu der bisher üblichen, zuerst genannten Klassifizierungsmethode hergestellt. Gleichzeitig werden damit Querverbindungen zwischen verschiedenen Verfahren bzw. einzelnen Teilen aufgezeigt, was ein besseres Verständnis der Funktionsweise einzelner Verfahrensteile erlaubt.

In Kapitel 2.7 und 2.8 werden schließlich zwei Bildzuordnungsverfahren genauer herausgestellt, die später bei der Konzeption für die DHM Messung eine tragende Rolle spielen.

## 2.1 Definition von Bildzuordnung

Der Begriff Zuordnung ist von der Sprache her ein sehr weitgespannter Begriff. Sowohl gleichartige Dinge, wie etwa zwei homologe Punkte in einem Stereobildpaar, als auch verschiedenartige Dinge wie eine Punktnummer und ein Koordinatentripel lassen sich einander zuordnen. In der Bildverarbeitung geht es um die Identifizierung von Objekten in Bildern bzw. um die Zuordnung von Abbildungen desselben Objekts in verschiedenen Bildern. In der Regel ist die Aufgabe, Identifizierungen herzustellen und Zuordnungen zu finden.

In der Bildverarbeitung wird Bildzuordnung oft mit dem englischen „image matching“ gleichgestellt. Nach (Haralick, 1991) bezieht sich „image matching“ auf den Prozeß der Zuordnung von Bildelement zu Bildelement, von Kante zu Kante oder von Region zu Region, und zwar zwischen zwei Bildern der gleichen Szene, die mit unterschiedlichen Sensoren, unter unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen oder von verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Aufnahmerichtungen aufgenommen sein können. Der Begriff des „matching“ ist also schon spezieller, aber immer noch allgemein.

Um Zuordnung im Sinne einer Bildzuordnung für die Objektrekonstruktion zu benutzen, definieren wir den Begriff Bildzuordnung deshalb wie folgt:

- Bildzuordnung umfaßt die Zuordnung von lokalen oder regionalen Inhalten zwischen Abbildung und entsprechendem Objekt, oder zwischen 2 oder mehr Bildern. Wir erlauben zudem eine Zuordnung Bild-Objekt-Bild. Es wird vorausgesetzt, daß Bild zu Objekt, bzw. Bild zu Bild potentiell zuordnungsbar sind, daß also die Bedingung der Überdeckung a priori erfüllt ist.
- Bei der Zuordnung von Bildern werden gleichartige Abbildungsbedingungen vorausgesetzt. Luftbilder sind üblicherweise aus dem optischen sichtbaren Bereich und werden hier allgemein als schwarz/weiß Bilder angenommen. Eine Zuordnung von photographisch registrierten Luftbildern z.B. mit Radarbildern oder mit Strichkarten können wir im Zusammenhang mit der DHM Bestimmung hier ausschließen.
- Zur weiteren Vereinfachung wird das Objekt als unbeweglich angenommen, oder bei beweglichem Objekt wird von gleichzeitigen Aufnahmen ausgegangen. Handelt es sich bei dem Objekt um das Gelände, so ist für den relativ kurzen Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen ein starres Gelände eine berechtigte Annahme, da abgesehen von Bewegungen oder Veränderung der Vegetation, oder von Fahrzeugbewegungen kaum irgendwelche bemerkbaren Veränderungen des Geländes selbst zu erwarten sind.
- Das Objekt (hier: Gelände) wird schließlich einer weiteren Beschränkungen unterworfen, indem nur seine Oberfläche in Betracht gezogen wird. Allerdings ist die in den Bildern sichtbare Oberfläche nicht notwendigerweise die gewünschte Geländeoberfläche.
- Lokale und regionale Inhalte werden im Bild in Form von Bildobjekten (Bildausschnitte, Bildmerkmale, Bildstrukturen) repräsentiert. Diese werden mit den Objekten oder gleichartigen Bildobjekten eines oder weiterer Bilder in Beziehung gesetzt, d.h. zugeordnet. Werden Bildausschnitte einander flächenhaft zugeordnet, so sprechen wir von rasterorientierter Zuordnung („area based matching“). Werden dagegen Bildeinzelheiten einander als Merkmale zugeordnet, so sprechen wir von merkmalsgestützter Zuordnung („feature based matching“).
- In vielen Fällen arbeitet man mit zwei Bildern. So erhält man den Spezialfall der Stereozuordnung, die der stereoskopischen Betrachtung bzw. Messung beim Menschen entspricht.

Im folgenden beschränken wir uns auf Bildpaare, so daß die Bildzuordnung auf den Fall der Stereozuordnung, von Bild zu Bild, eingeschränkt ist, soweit nicht anders angegeben. Es wird immer stillschweigend vorausgesetzt, daß es sich um ein digitales oder digitalisiertes Bild handelt. Jedes Bild liegt in einer Matrix von Grauwerten vor, die radiometrisch üblicherweise in 8 Bit Graustufen quantisiert sind und die sich geometrisch auf die diskrete Pixelmatrix beziehen.

Zunächst ist nun festzustellen, welche Arten von Objekten oder Merkmalen in einem digitalen Bild ausgewählt werden können, um lokale und regionale Bildinhalte zu definieren, die sich für die Stereo-Zuordnung eignen.

## 2.2 Lokale und regionale Bildinhalte zur Zuordnung

Die Bildzuordnung stellt, wie definiert, einen Bezug zwischen lokalen oder regionalen Inhalten vergleichbarer Bilder her. Diese Inhalte bedürfen einer Repräsentation, die geeignet ist für eine Zuordnung. Grundsätzlich werden zur Zuordnung zwei Arten von Bildobjekten ausgewählt, nämlich Bildflächen bzw. **Bildausschnitte** für die rasterorientierte Zuordnung oder einzelne **Bildmerkmale** für die merkmalsgestützte Zuordnung. In beiden Fällen werden die Bildobjekte durch Extraktions- oder Segmentierungsprozeduren aus den originalen Bilddaten gewonnen. Eine detaillierte Zusammenstellung solcher Segmentierungsprozeduren findet sich in (Baltsavias, 1990).

Für die Bereitstellung von Bildflächen oder Bildfenstern zur **rasterorientierten Zuordnung** werden die originalen digitalen Bilddaten, die in Rasterform als Bildmatrix vorliegen, durch den Extraktionsprozeß wieder in Rasterform übergeführt. Man spricht von einem „low-level“ Segmentierungsprozeß. Im einfachsten Fall handelt es sich um die simple Extraktion eines Fensters aus der Originalbildmatrix. Üblicherweise schließen sich daran jedoch verschiedene Schritte der Bildvorverarbeitung (Glättung, Kantenverstärkung, Bildverbesserung) an. Das Ergebnis ist eine Repräsentation in Rasterform, d.h. einer Matrix von Bildelementen, die pro Bildelement einen oder mehrere Werte haben kann.

Für die **merkmalsgestützte Zuordnung** wird die originale oder im obigen Sinne vorverarbeitete rasterförmige Bildinformation in eine Darstellung in Form von abstrakten Bildmerkmalen mit ihren Eigenschaften, sogenannten Attributen, übergeführt. Bildstrukturen entstehen aus der Kombination von Bildmerkmalen. Die Extraktionsverfahren werden in „mid-“ und „high-level“ Segmentierungsprozesse eingeteilt, wobei „high-level“ Prozesse den höchsten Abstraktionsgrad darstellen. Abstraktionsgrad kann man im allgemeinen gleichsetzen mit Datenreduktion, d.h. statt kleiner flächenhafter Ausschnitte (Raster) werden nun Listen von z.B. extrahierten Punkten, Linien oder Regionen mit ihren Attributen und Relationen für die merkmalsgestützte Zuordnung bereitgestellt.

Im folgenden wird zunächst analysiert, welche Bildobjekte für die rasterorientierte- (2.2.1) und merkmalsgestützte Zuordnung (2.2.2) verwendet werden, verbunden mit Hinweisen auf Annahmen und Bedingungen, die dem Extraktionsprozeß aus den Bildern zugrunde liegen. In Ergänzung dazu werden jeweils herausragende Vor- und Nachteile der Bildobjekte (Bildfenster/Bildmerkmale) im Hinblick auf ihre Extraktion und die spätere Zuordnung aufgeführt. Typische Attribute beider Typen von Bildobjekten zur Zuordnung werden gemeinsam beschrieben (2.2.3). Abschließend wird diskutiert, unter welchen Bedingungen die Auswahl eines bestimmten Bildobjekts die nachfolgenden Schritte des Bildzuordnungsverfahrens beeinflusst. Dabei wird speziell auf die Anwendung zur DHM Erfassung Bezug genommen.

### 2.2.1 Bildausschnitte für die rasterorientierte Zuordnung

Die Grundeinheit der rasterorientierten Zuordnung ist ein Bildausschnitt oder eine Bildfläche in Form einer zusammenhängenden Gruppe von Bildelementen (engl. „pixel“), die matrixförmig angeordnet sind. Die Bildelemente sind die kleinste geometrische Einheit eines digitalen/digitalisierten Bildes. Jedem Bildelement des digitalen Originalbildes ist üblicherweise ein Grauwert zugeordnet. Eine explizite Speicherung von Koordinaten ist nicht erforderlich, da diese implizit durch die Zeilen und Spalten der Bildmatrix gegeben sind. Zur rasterorientierten Zuordnung werden Fenster von üblicherweise 3x3 bis maximal mxn Bildelementen bereitgestellt, wobei n bzw. m selten größer als 64 sind. Für die Zuordnung von Bildausschnitten ist der engl. Begriff „area based matching“ (flächenhafte Zuordnung) weitverbreitet, der allerdings hier nicht verwendet werden soll, da auch eine merkmalsgestützte Zuordnung mit Regionen eine flächenhafte Zuordnung ist und es so zu Mißverständnissen kommen kann. Hier soll im weiteren immer von rasterorientierter Zuordnung gesprochen werden.

Die Bildausschnitte werden entweder in originaler oder in vorverarbeiteter Form für die rasterorientierte Zuordnung verwendet. Durch den Vorverarbeitungsprozeß werden besondere Eigenschaften des Bildes hervorgehoben. So kann z.B. eine Kontrastverstärkung („image enhancement“) oder eine Histogrammspreizung vorgenommen werden. Andere Vorverarbeitungsverfahren unterdrücken unerwünschte Störungen, so wird etwa durch Glättungsfiler das Rauschen vermindert. Vorverarbeitung bedeutet jedoch in jedem Fall eine gewisse Manipulation der originalen Bildinformation, d.h. es werden direkt oder indirekt erste Modellannahmen getroffen. Damit bleibt im Detail zu überprüfen, ob durch die

Vorverarbeitung nicht etwa wesentliche Informationen abgeändert oder beeinträchtigt werden. Dies ist besonders wichtig im Hinblick darauf, daß die Zuordnung selbst und alle daraus abgeleiteten Größen letztlich von der Eingangsinformation ausgehen. Wird z.B. durch eine Filterung des Bildes das Rauschen wie gewünscht unterdrückt, so kann es durchaus sein, daß durch den angewandten Filterungsprozeß die Lage von Grauwertkanten verändert wird, was im Hinblick z.B. auf die Genauigkeit der Zuordnung keinesfalls wünschenswert sein kann. Jedem Bildelement des gewählten und eventuell vorverarbeiteten Bildausschnittes sind ein oder mehrere Attribute zugeordnet. Beispiele hierzu sind Grauwert, Farbwert oder andere Attribute, wie die Richtung und Stärke des Grauwertgradienten. Die allgemeinen Eigenschaften der Verwendung von Bildausschnitten für die Zuordnung sind in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

Verfahren zur rasterorientierten Zuordnung sind z.B. die Kreuzkorrelation (Kreiling, 1976) oder die Kleinste Quadrate Verfahren, z.B. nach (Ackermann, 1984; Grün, 1985).

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• schnelle Extraktion</li> <li>• hohes Genauigkeitspotential</li> <li>• geringe Vorkenntnisse erforderlich</li> <li>• die Geometrie ist implizit gegeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Datenmenge</li> <li>• großer Zuordnungssuchraum</li> </ul>

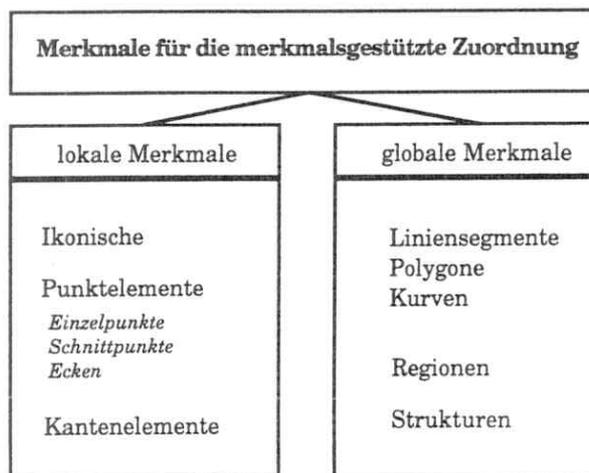
**Tabelle 2.2** Herausragende Vor- und Nachteile der Extraktion und rasterorientierten Zuordnung von Bildausschnitten.

### 2.2.2 Merkmale und Strukturen für die merkmalsgestützte Zuordnung

Bei der merkmalsgestützten Zuordnung werden einzelne Bildmerkmale einander zugeordnet. Darunter versteht man Punkte, Linien, örtliche Regionen, Formen oder Strukturen. Es läßt sich eine grobe Unterteilung in lokale und globale Bildmerkmale vornehmen, je nach der Größe des Bereichs, den das Merkmal repräsentiert. Diese Einteilung ist in Abbildung 2.1 zusammengefaßt und wird anschließend erläutert.

Bildmerkmale sind das Ergebnis eines Segmentierungsprozesses, der das originale oder vorverarbeitete, rasterförmige, digitale Bild in eine abstraktere Repräsentation überführt, die oftmals z.B. in Form von Listen erscheint, z.B. als Liste von Linien mit ihren Anfangs- und Endpunkten oder als Liste von homogenen Regionen mit ihren Begrenzungslinien. Auch für Bildmerkmale gilt, daß ihnen eine Vielzahl von Eigenschaften (Attributen) zugeschrieben werden kann, die entsprechend die Liste erweitern.

Für die Segmentierungsprozesse werden in hohem Maße Bedingungen und Annahmen über das Objekt (2.3) benutzt, die zu Steuerungsparametern der Segmentierung umgesetzt werden. Für die Extraktion von homogenen Regionen wird z.B.



**Abbildung 2.1** Unterscheidung lokaler und globaler Bildmerkmale für die merkmalsgestützte Zuordnung.

ein Kriterium für die Homogenität einer Region benötigt. Das heißt, gegenüber der Extraktion von Bildfenstern wird bei Bildmerkmalen in ungleich größerem Maß Vorwissen bereits bei der Merkmalsextraktion eingesetzt. Im folgenden werden die verschiedenen Merkmalsklassen kurz diskutiert.

#### (a) Lokale Bildmerkmale für die merkmalsgestützte Zuordnung

Lokale Merkmale repräsentieren eine kleine Nachbarschaft um ein einzelnes Bildelement (ikonische Merkmale) oder um einen einzelnen Punkt (Punktelement, Kantenelement). Für die merkmalsgestützte Zuordnung sollen möglichst markante Merkmale bereitgestellt werden. Vorwissen zur Extraktion aus dem Bild ist also zur Wahl der Nachbarschaft und zur Definition von „guten“ Merkmalen erforderlich.

„**Ikonische Merkmale**“ werden aus der Umgebung eines Bildelements abgeleitet. Beispiele hierfür sind statistische Momente wie Mittelwert, Median, Standardabweichung der Grauwerte oder weitere Texturparameter (z.B. Straub, 1987). Die ikonischen Merkmale werden pro Bildelement in einem Merkmalsvektor gesammelt. Durch Anwendung von Schwellwerten werden dann für ausgewählte Bildelemente die relevanten Merkmalsvektoren an die Zuordnung weitergegeben.

„**Punktelemente**“ sind im Gegensatz zu den ikonischen Merkmalen nicht an die starre Bildelementanordnung (Bildmatrix) gebunden. Sie werden zwar ebenfalls aus einer kleinen Nachbarschaft generiert, werden aber durch einen geometrischen Punkt repräsentiert, dessen Bildkoordinaten auch reelle Zahlenwerte, also Subpixelwerte, annehmen können. Der ausgewählte Punkt kann z.B. die Fenstermitte oder ein gewichteter Schwerpunkt eines Bildfensters sein. Weitere Beispiele für Punktelemente sind markante Einzelpunkte, Ecken, Schnitt- oder Endpunkte von Linien. Ein Schwellwert ist erforderlich, um gut geeignete Punkte auszuwählen und eine ausgedünnte („sparse“) Verteilung der Punkte zu erreichen. Um eine homogene räumliche Verteilung der Punktmerkmale zu erreichen, kann ein Bild in Teilbilder zerlegt werden, die dann mit jeweilig verschiedenen Schwellwerten abgearbeitet werden.

Die Attribute eines Punktelements werden zur Reduktion der Rechenzeit aus der Nachbarschaft des Punktes oftmals nur in ausgewählten Richtungen berechnet (Zeilen-, Spaltenrichtung). Gebräuchliche Attribute sind z.B. die Grauwertvarianz oder der Autokorrelationskoeffizient.

Die Werkzeuge zur Extraktion solcher Merkmale sind „Interestoperatoren“, von denen eine ganze Reihe in der Literatur bekannt sind, z.B. in (Moravec, 1977; Barnard, 1980; Dreschler, 1981; Förstner, 1987; Hannah, 1988), und die in der Regel nach dem jeweiligen Autor benannt sind. Punktartige Merkmale dienen als Grundlage sehr vieler merkmalsgestützter Zuordnungsverfahren.

Grauwertkanten, d.h. Diskontinuitätslinien in der Grauwertfläche besitzen einen hohen Informationsgehalt und sind leicht extrahierbar. Eine Grauwertkante kann in einfachster Form als Folge von einzelnen „**Kantenelementen**“ beschrieben werden, die sich auf einzelne Bildelemente beziehen. Die Extraktion von Kantenelementen besitzt dementsprechend eine lange Tradition, und es gibt mittlerweile Dutzende von Kantenoperatoren, die mehr oder wenig erfolgreich im Prinzip die folgenden Schritte durchführen:

- Kantenelement erkennen
- Kantenelement lokalisieren
- Kantenelement beschreiben und Attribute für das Kantenelement ableiten.

Die wichtigsten Verfahren lassen sich z.B. nach (Saarikoski, 1988) in vier Klassen einteilen:

- Masken Suche (z.B. SOBEL, PREWITT, ROBERTS Operatoren), d.h. Suche der optimalen Position einer vorgegebenen Maske, die einen Kantentyp darstellt, im Bild.
- Gradientenmethode (z.B. CANNY Operator), d.h. Suche nach Maxima in der ersten Ableitung der Grauwertfunktion des Bildes.
- „Step fitting“ Methode (z.B. HUECKEL Operator), d.h. Anpassung einer vorgegebenen Kantenfunktion an die Grauwertfunktion des Bildes.
- Zweite Ableitungs Methode (z.B. nach MARR oder nach HARALICK), d.h. Suche nach Nulldurchgängen der zweiten Ableitung der Grauwertfunktion des Bildes.

Kantenelemente sind die gebräuchlichsten lokalen Merkmale für die merkmalsgestützte Zuordnung. Die neueren Entwicklungen beziehen auch die Subpixelschätzung der Kantenposition mit ein, die lange Zeit von geringem Interesse war. Tabelle 2.3 stellt einige herausragende Eigenschaften dieser Art von Merkmalen bei der Extraktion und für die Zuordnung zusammen.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Subpixelspeicherung</li> <li>• hohes Genauigkeitspotential</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Datenmenge und großer Zuordnungssuchraum</li> <li>• viele ähnliche Merkmale</li> <li>• Schwellwerte erforderlich</li> <li>• Maßstabsabhängigkeiten</li> <li>• hohe Rauschsensitivität bei kleiner Fenstergröße</li> </ul>

**Tabelle 2.3** Herausragende Vor- und Nachteile der Extraktion und Zuordnung von lokalen Bildmerkmalen.

**(b) Globale Bildmerkmale vom Typ „Linie“ für die merkmalsgestützte Zuordnung**

Globale Merkmale vom Typ Linie entstehen durch Verknüpfung lokaler Merkmale, der Kantenelemente, unter Annahme von Bedingungen, in erster Linie der Kontinuitätsbedingung. Methoden zur Verknüpfung der Kantenelemente sind z.B. Kantenverfolgung (engl. „edge tracking“) oder „Scan Line“ Methoden (Ayache, 1987, Henriksen, 1986). Die verknüpften Kantenelemente werden anschließend durch verschiedenartige Funktionen angenähert. Annäherung bedeutet in jedem Fall Einbringung von Bedingungen. Vorkenntnisse sind nötig für die Wahl der Annäherungsfunktion und zugehöriger Schwellwerte.

Als einfachste Anpassungsfunktion an eine Folge von lokalen Kantenelementen kann ein „**Gerades Liniensegment**“ gewählt werden. Beispiele für Attribute solcher Liniensegmente sind Position, Orientierung und Stärke der Liniensegmente (Medioni, 1984). Andere Autoren wie Ayache (Ayache, 1987) und Henriksen (Henriksen, 1986) gewichten die Attribute und betrachten die Orientierung des Liniensegments als wichtigstes Attribut für die nachfolgende merkmalsgestützte Zuordnung.

Eine „**Polygonzug aus geraden Liniensegmenten**“ besteht in der einfachsten Form aus einem Knoten und zwei verknüpften Liniensegmenten. Es stützt sich auf bereits extrahierte Liniensegmente, die paarweise miteinander verbunden werden. Dieses Merkmal ist maßstabsinvariant, da üblicherweise nur der Knotenpunkt und der gemeinsame Winkel der Kanten benutzt wird und nicht die Länge der Kanten. Die Extraktion eines Polygonzugs mit einer größeren Zahl von Knoten und Liniensegmenten kann aus mehreren Pixelauflösungsstufen von grob nach fein erfolgen. Dabei wird eine gegebene Sequenz von Kantenelementen in grober Auflösung durch einen Polygonzug approximiert. Bei grober Auflösung ist ein vergrößertes Toleranzband für den Polygonzug erforderlich, wodurch entsprechend wenige Polygon- oder Knotenpunkte und wenige grobe Segmente erhalten werden. Bei feiner Auflösung erhält man feinere Segmente, d.h. eine bessere Approximation, aber auch viele ähnliche Segmente.

Eine Extraktion von Polygonzügen kann auch durch eine Approximation von feiner zu grober Auflösung erfolgen (Bengtsson, 1986). Ausgangsbasis ist in diesem Fall eine Folge von zusammenhängenden Kantenelementen in feinsten Auflösung, die durch gerade Polygonseiten approximiert werden. Im Sinne einer Generalisierung werden dann beim Übergang auf eine gröbere Auflösung die dominanten Bruchpunkte im Polygonzug angehalten und kleinere Unregelmäßigkeiten entsprechend geglättet.

Alle weiteren Typen von Kurven können unter dem globalen Merkmal vom Typ „**Kurve allgemeiner Art**“ zusammengefaßt werden. In der Photogrammetrie gibt es erste Ansätze einer digitalen Linienphotogrammetrie, in der anstelle von Punkten Kurven aller Art gemessen werden (Mulawa, 1989, Zielinski, 1992). Ein Beispiel für kurvenartige Zuordnungsmerkmale sind Splines, z.B. angewandt von Witkin (Witkin, 1987).

Tabelle 2.4 gibt für dieses globale Merkmal die spezifischen Vor- und Nachteile bei der Extraktion und für die Zuordnung an.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"><li>• robustere Zuordnungsergebnisse sind zu erwarten</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• abstrakte Schwellwerte erforderlich</li><li>• geringeres Genauigkeitspotential bei hoher Abstraktion, bzw. aufwendige Fehlerfortpflanzung</li></ul>

**Tabelle 2.4** Herausragende Vor- und Nachteile der globalen Bildmerkmale vom Typ „Linie“ bei der Extraktion und für die merkmalsgestützte Zuordnung.

**(c) Globale Bildmerkmale vom Typ „Region“ für die merkmalsgestützte Zuordnung**

Regionen entstehen entweder durch die Verknüpfung von mehreren lokalen, ikonischen Merkmalen (z.B. Zucker, 1976), oder durch Flächenabgrenzung z.B. aus der Bestimmung von geschlossenen Randlinien, die durch Kanten definiert sind. Eine Region ist somit eine nach einem definierten Kriterium homogene Gruppe von Pixeln, die von einer geschlossenen Grenzlinie umgeben ist. Eine Region kann dabei vollständig in einer anderen Region liegen. Tabelle 2.5 gibt wiederum die herausragenden Eigenschaften dieses Merkmalstyps wieder. Ein Beispiel für die Zuordnung von Regionen ist in (Price, 1987) zu finden.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"><li>• kleine Zahl von Merkmalen</li><li>• robuste Zuordnungsergebnisse durch Einbeziehung der Nachbarschaftsinformation sind zu erwarten</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• abstrakte Schwellwerte erforderlich</li><li>• geringes Genauigkeitspotential bei hoher Abstraktion, bzw. aufwendige Fehlerfortpflanzung</li></ul>

**Tabelle 2.5** Herausragende Vor- und Nachteile der globalen Bildmerkmale vom Typ „Region“ bei der Extraktion und für die merkmalsgestützte Zuordnung.

**(d) Globale Merkmale vom Typ „Struktur“ für die merkmalsgestützte Zuordnung**

Durch die Zusammenfassung von einfacheren lokalen/globalen Merkmalen entstehen Strukturen, z.B. Sätze von Merkmalen, die durch Attribute und Beziehungen zwischen den Merkmalen gekennzeichnet sind. Besondere Bedeutung kommt hier der Behandlung der Relationen zwischen den Merkmalen zu.

An einem Beispiel wird in Tabelle 2.6 gezeigt, welche Vielfalt von Merkmalen und Attributen für die Extraktion einer Struktur, hier einer von extrahierten lokalen Kantenelementen ausgehenden Kombination von Liniensegmenten, erforderlich werden können.

Die Tabelle 2.7 schließlich zeigt für diesen globalen Merkmalstyp einige der herausragenden Eigenschaften bei der Extraktion und für die Zuordnung auf.

Topologische Beziehungen zwischen Kantenelementen, Regionen und ihren Attributen werden z.B. von (Shapiro, 1987; Boyer 1988; Vosselman 1991) für die Zuordnung benützt.

Merkmalsname	Übliche Attribute der Merkmale
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantenelement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stärke oder Größe des Grauwertgradienten</li> <li>• Vorzeichen und Form des Nulldurchgangs der zweiten Ableitung der Grauwertfunktion</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kante aus Gruppen von zusammenhängenden Kantenelementen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stärke der Kanten, berechnet z.B. aus dem mittleren Grauwert aller Kantenpixel oder der mittleren Steigung der Nulldurchgänge</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liniensegment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtung der Linie</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Struktur = Kombination von 2 zusammenhängenden Liniensegmenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtung der beiden Linien</li> <li>• Vertexwinkel</li> </ul>

**Tabelle 2.6** Lokale und globale Merkmale mit einigen Attributen zur Extraktion einer Bildstruktur, hier einer Kombination von Liniensegmenten.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kleine Zahl von Merkmalen</li> <li>• reiche Zahl von Attributen</li> <li>• robuste Zuordnungsergebnisse durch Einbeziehung der Nachbarschaftsinformation sind zu erwarten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• extensive Suchalgorithmen</li> <li>• viel Vorwissen erforderlich</li> <li>• geringeres Genauigkeitspotential bei hoher Abstraktion, bzw. aufwendige Fehlerfortpflanzung</li> </ul>

**Tabelle 2.7** Herausragende Vor- und Nachteile der globalen Bildmerkmale vom Typ „Struktur“ bei der Extraktion und für die merkmalsgestützte Zuordnung.

### 2.2.3 Attribute von Bildausschnitten und Bildmerkmalen für die Zuordnung

Für die Bildzuordnung ist entscheidend, daß die durch die oben beschriebenen Bildfenster oder abstrakte Bildmerkmale repräsentierten Bildinhalte von zwei oder mehreren Bildern einander zugeordnet werden. Sie müssen in Beziehung zueinander stehen, d.h. die Abbildungen derselben Objekte sein. Übersetzt auf die Zuordnung bedeutet dies, nach Bildfenstern/Bildmerkmalen in den Bildern zu suchen, die einander ähnlich sind, wobei die Gegebenheiten der Abbildungen (unterschiedliche Aufnahmeposition, Beleuchtung etc.) zu berücksichtigen sind. Die Ähnlichkeit wird nach dem Maß der Übereinstimmung der Attribute (Eigenschaften) der Bildausschnitte/Bildmerkmale bestimmt. Besonders gesucht sind invariante Attribute, also z.B. solche Attribute, die invariant gegenüber geometrischen Deformationen sind.

Es kann zwischen geometrischen/radiometrischen Attributen, die direkt mit dem Bild zusammenhängen, und Attributen unterschieden werden, die Relationen beschreiben.

#### (a) Geometrische und radiometrische Attribute der Bildfenster/Bildmerkmale

Ein elementares **geometrisches Attribut** eines Bildfensters/Bildmerkmals ist die Position. Die Position eines Bildfensters ist z.B. durch die Koordinaten seines linken oberen Eckpixels im Originalbild definiert. Für die Beschreibung der Position eines Bildmerkmals sind die Pixelkoordinaten selbst oder ein berechneter gewichteter Schwerpunkt gebräuchlich. Probleme in der Definition der Position treten bei komplexeren Bildmerkmalen auf, z.B. bei der Festlegung der Position eines Liniensegments, eines Polygons oder einer Region. Eine Vielzahl von Beschreibungen sind möglich. Eine Linie kann z.B. durch die Endpunkte oder den Mittelpunkt repräsentiert sein, eine Region durch den Schwerpunkt oder aber durch Polygonknotenpunkte der Grenzlinie.

Weitere typische geometrische Attribute sind Orientierung, Länge, Neigung, Krümmung, Durchmesser, Fläche, Symmetrieachse und andere Formparameter von Bildmerkmalen (z.B. Straub, 1987).

**Radiometrische Attribute** sind z.B. die Stärke oder Größe des Grauwertgradienten, das Vorzeichen des Nulldurchgangs der zweiten Ableitung der Grauwertfunktion oder die Form des Nulldurchgangs, aber auch Grauwerteigenschaften auf beiden Seiten einer Kante, wie z.B. statistische Momente. Diese Attribute finden vor allem Verwendung bei der rasterorientierten Zuordnung und bei lokalen Merkmalen der merkmalsgestützten Zuordnung.

Weitere Attribute radiometrischer Natur sind Homogenität oder auch Texturgradienten. Sie sind vor allem von Bedeutung für die merkmalsgestützte Zuordnung von Regionen.

#### (b) **Relationale Attribute der Bildmerkmale**

Gegenüber den geometrischen und radiometrischen Attributen sind relationale Attribute von Bildmerkmalen nicht direkt aus dem Bild abgeleitet, sondern sie repräsentieren topologische Beziehungen zwischen extrahierten Bildmerkmalen oder Merkmalsgruppen, wie z.B. die Zahl der Kanten in einem Schnittpunkt von Linien. Typische Relationen geometrischer Art sind „parallel“, „orthogonal“, „links“, „rechts“, „über“, „unter“, „enthält“, „schneidet“, etc. Diese relationalen Attribute sind von herausragender Bedeutung für die Zuordnung von globalen Merkmalen und Strukturen.

#### 2.2.4 **Wahl von Bildausschnitten oder Bildmerkmalen für die Zuordnung**

Nachdem die zur Zuordnung gebräuchlichsten Bildobjekte (Bildausschnitte und Bildmerkmale) mit ihren Eigenschaften (Attributen) vorgestellt worden sind, sollen nun im Zusammenhang die Gesichtspunkte aufgeführt werden, die für die Entscheidung zwischen Bildfenstern und Bildmerkmalen, also zwischen rasterorientierter oder merkmalsgestützter Zuordnung in Betracht zu ziehen sind. Das Für und Wider hängt mit der Aufgabenstellung und mit äußeren Bedingungen, wie Speicherplatz oder Rechenzeiten zusammen, wie bereits aus den tabellenartigen Zusammenstellungen der herausragenden Vor- und Nachteile ersichtlich wurde.

Unterschiedliche Repräsentationen des gleichen lokalen oder globalen Bildinhaltes bedeuten unterschiedlichen Extraktionsaufwand und haben unterschiedliche Auswirkungen auf die spätere Zuordnung und deren Qualität.

In der Tabelle 2.8 sind die Vor- und Nachteile der Wahl von Bildfenstern zur rasterorientierten Zuordnung gegenüber der Wahl von Bildmerkmalen für die merkmalsgestützte Zuordnung bezüglich einiger herausragender Gesichtspunkte aufgeführt. Unter Beachtung aufgaben- und hardwarespezifischer Randbedingungen werden anschließend für die DHM Erfassung der Einsatz von Bildfenstern gegenüber Bildmerkmalen diskutiert.

Bei der merkmalsgestützten Zuordnung wird durch die Verwendung einzelner Bildmerkmale gegenüber Bildfenstern bei der rasterorientierten Zuordnung die **Datenmenge** reduziert. Die Größe des Suchraums für eine Zuordnung und damit der Suchaufwand bei der Merkmalszuordnung kann ausgedehnt sein, wird aber durch komplexere Bildmerkmale verringert. Dies steht in direktem Gegensatz zu dem größeren Aufwand für die Extraktion der Bildmerkmale selbst. Da sich bei einer Geländeoberfläche neben Bildfenstern auch komplexe Merkmale extrahieren lassen, kann deshalb bei vielen Zuordnungen der Aufwand für die Extraktion von Bildmerkmalen und für deren Zuordnung geringer sein als der Aufwand für eine rasterorientierte Zuordnung extrahierter Bildfenster. Dies bleibt jedoch im einzelnen jeweils festzustellen.

Die Art und **Genauigkeit** der verwendeten Information legt die theoretisch zu erwartende Art und Genauigkeit der Zuordnung fest. Durch höhere Abstraktion der Bildobjekte, bzw. durch höhere Generalisierung, nimmt die Genauigkeit ab und entsteht ein höherer Aufwand für die Genauigkeitsberechnung durch Fehlerfortpflanzung. In diesem Fall sind grundsätzlich die Genauigkeitsanforderungen, die an das DHM gestellt sind, entscheidend. Nur ein Zuordnungsverfahren, sei es nun rasterorientiert oder merkmalsgestützt, das die gestellten Genauigkeitsanforderungen potentiell erfüllen kann, sollte verwendet werden.

Die Verwendung **hierarchischer Strukturen** der Bildobjekte für die Zuordnung, z.B. die Erstellung einer Auflösungspyramide, verlangt einen enormen Aufwand bei der Extraktion von komplexeren Bildmerkmalen. Dagegen läßt sich eine hierarchische Struktur von Bildfenstern viel einfacher erstellen, wobei allerdings ein relativ hoher Speicherbedarf anfällt. Die Balance zwischen Rechenzeit und Speicheraufwand für eine hierarchische Struktur der

Gesichtspunkte zur Wahl von Bildobjekten für die Zuordnung	Bildfenster für die rasterorientierte Zuordnung		Bildmerkmale für die merkmalsgestützte Zuordnung
Datenreduktion	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Genauigkeitspotential	<i>hoch</i>	<<-----	<i>gering</i>
Eignung für Hierarchie	<i>hoch</i>	<<-----	<i>gering</i>
Wahrscheinlichkeit für fehlende Zuordnungen	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Wahrscheinlichkeit für Fehlzuordnungen	<i>hoch</i>	<<-----	<i>gering</i>
Verschiedenheit	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Seltenheit	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Auswahldichte	<i>hoch</i>	<<-----	<i>gering</i>
Invarianz	<i>hoch</i>	<<-----	<i>gering</i>
Zeitaufwand für Extraktion	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Interpretierbarkeit	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>
Erforderliche Vorkenntnisse	<i>gering</i>	----->>	<i>hoch</i>

**Tabelle 2.8** Qualitative Gesichtspunkte der Wahl von Bildobjekten zur rasterorientierten und zur merkmalsgestützten Zuordnung.

Bildobjekte ist für die DHM Erfassung der Geländeoberfläche von geringer Bedeutung, so lange nicht 3D-Störungen oder Bruchlinien bearbeitet werden. Dann werden allerdings Hierarchien komplexerer Merkmale sehr interessant, da sich entsprechende hierarchische Strukturen von Bildfenstern nicht ohne weitgehende Vereinfachungen und Restriktionen aufbauen lassen.

Für die **Zuverlässigkeit der Zuordnung** ist von entscheidender Bedeutung, wie groß die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlzuordnung ist, und wie groß die Wahrscheinlichkeit für eine fehlende Zuordnung ist. Je höher die Abstraktion der Bildmerkmale ist, desto größer ist die Gefahr, Zuordnungen zu verlieren, wogegen die rasterorientierte Zuordnung hier Vorteile hat. Umgekehrt ist bei der rasterorientierten Zuordnung durch die geringe Abstraktion der Bildobjekte die Zahl möglicher Fehlzuordnungen groß, wogegen diesbezüglich die merkmalsgestützte Zuordnung im Vorteil ist. Da bei der DHM Erfassung die gesamte Oberfläche des Geländes beschrieben werden soll, ist es aus Vollständigkeitsgründen vorteilhafter zu versuchen, Fehlzuordnungen zu vermeiden bzw. sie zu erkennen und zu eliminieren, als Lücken in der Oberflächenbeschreibung wegen fehlender Zuordnungen zu akzeptieren, womit die rasterorientierte Zuordnung hier zu bevorzugen wäre.

Korrekte Zuordnungen sind schwierig zu identifizieren wenn lokal viele gleichartige Informationen vorliegen, z.B. bei sich wiederholenden Mustern. Ein selektiertes Merkmal sollte sich also von allen anderen Merkmalen in einer gewissen Nachbarschaft unterscheiden. Die Elemente sollten darüberhinaus global möglichst **einzigartig** oder **selten** sein. Seltene Merkmale erleichtern insbesondere die grobe Zuordnung. Da sich die Merkmale einer Geländeoberfläche lokal häufig nur gering unterscheiden, z.B. innerhalb einer Wiese, oder disparate Bildregionen sehr ähnlich sein können, wären hinsichtlich Verschiedenheit und Seltenheit die komplexeren Merkmale der merkmalsgestützten Zuordnung für eine DHM Erfassung vorzuziehen. Dies scheint jedenfalls für eine Grobzuordnung von Bildmerkmalen zu gelten.

Wählt man die Bildobjekte so, daß eine Zuordnung räumlich **dichte Ergebnisse** liefert, so vereinfacht sich eine nachfolgende Interpolation zur Oberflächenbeschreibung. Bei der rasterorientierten Zuordnung liegt der Vorteil in dem üblichen dichten Zuordnungsergebnis. Bei der merkmalsgestützten Zuordnung erhält man gestreut verteilte Ergebnisse, wenn man gute Merkmale auswählt. Somit ist nach einer merkmalsgestützten Zuordnung ein im Vergleich wesentlich aufwendigeres Interpolationsverfahren erforderlich, falls dichte Ergebnisse gewünscht werden. Bei der DHM Erfassung sind Bildfenster problematisch, wenn ein Objekt mit geometrischen Bruchlinien abgebildet ist. Kantenartige Merkmale

haben in diesem Zusammenhang einen Vorteil, aber sie liefern keine Information zwischen den Bruchlinien. Dies führt zur Überlegung, beide Arten von Merkmalen zu kombinieren, um eine sinnvolle Objektrekonstruktion zu ermöglichen.

Der **Grad der Unabhängigkeit** von geometrischen oder auch radiometrischen Deformationen hat direkten Einfluß auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zuordnung. Dieser Gesichtspunkt ist wichtig hinsichtlich einer DHM Erfassung, bei der diese Deformationen auftreten.

Der **Zeitaufwand für die Extraktion** steigt mit höherer Komplexität der Bildobjekte. Beschränkt man sich auf die ursprüngliche Grauwertinformation (Bildfenster), so ist der Zeitaufwand zur Extraktion minimal verglichen mit der Extraktion von Merkmalen oder Strukturen wie Liniensegmenten oder Regionen mit ihren topologischen Beziehungen. Bei der DHM Erfassung ist dieser Gesichtspunkt von Bedeutung, da der Aufwand für die Extraktion und für die Zuordnung der Bildobjekte ausgewogen sein sollen.

Ein Bildobjekt sollte für weitergehende Auswertungen **interpretierbar** sein. Bei einem einzelnen Kantenelement oder einem kleinen Bildfenster gibt es wenig zu interpretieren. Hingegen ist eine größere homogene Region oder z.B. eine T-Verbindung zweier Linien leichter zu interpretieren und mit einem Objekt in Verbindung zu bringen. Die Interpretierbarkeit spielt für die reine Parallaxenmessung bei der DHM Erfassung eine untergeordnete Rolle, ist aber von großer Bedeutung für die Eliminierung von 3D-Störungen oder die Erkennung und Lokalisierung von Bruchkanten.

Die Extraktion komplexer Bildmerkmale verlangt meist mehr detaillierte **Vorkenntnisse** über Grenzwerte, Schwellwerte oder andere Parameter, die die Verfahrensabläufe zur Merkmalsauswahl steuern, als eine Extraktion von Bildfenstern. Dieser Punkt ist sehr wichtig in Bezug auf eine Automatisierung der DHM Erfassung. Vorkenntnisse über die Art, Größe, Eigenschaften der zu erwartenden Bildmerkmale sind in geeignete Steuerparameter zur Extraktion der Merkmale umzusetzen. Dieser Vorgang ist sehr vom Bildmaterial abhängig und bis heute nicht ausreichend automatisiert, was zumindest für eine Parallaxenmessung unerwünscht ist, für Interpretationsaufgaben (3D-Störungen, Bruchlinien) jedoch akzeptabel erscheint.

Als Maß für die Zuordnung muß ein **Ähnlichkeitsmaß** zwischen Bildfenstern bzw. Bildmerkmalen abgeleitet werden können. Bei geringer Abstraktion läßt sich dieses Maß noch einfach definieren, z.B. zwei Punkte sind ähnlich, wenn eine geeignete Umgebung um diese Punkte ähnlich ist. Je höher die Abstraktion, desto komplizierter wird es, das Ähnlichkeitsmaß zu beschreiben. Man denke dabei z.B. an die Probleme bei der Definition der Ähnlichkeit zweier Liniensegmente. Ein Ähnlichkeitsmaß für Attributvektoren zur Zuordnung von sehr abstrakten Merkmalen ist noch schwieriger zu definieren.

### **Fazit**

Auf der Basis der Bildobjekte allein ist keine eindeutige Aussage zugunsten der rasterorientierten oder der merkmalsgestützten Zuordnung für die DHM Erfassung zu treffen. Die Anforderungen sind zu unterschiedlich, um sie mit einem Zuordnungsverfahren in allen Teilen gleich gut erfüllen zu können.

Die gegenläufigen Forderungen nach Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Flexibilität und Schnelligkeit führen deshalb zur Überlegung, Zuordnungsverfahren unterschiedlicher Art zu kombinieren, wobei rasterorientierte Zuordnungsverfahren durch die Anwendung von Bildfenstern eher Stärken hinsichtlich Genauigkeit und Flexibilität zeigen, und merkmalsgestützte Zuordnungsverfahren durch die Verwendung von Bildmerkmalen eher hinsichtlich Zuverlässigkeit und Schnelligkeit überzeugen können.

Wenn die Bildobjekte zur Zuordnung in den beiden Bildern eines Stereopaars extrahiert sind, ist grundsätzlich eine Zuordnung zwischen diesen Objekten möglich. Damit ist aber noch nicht notwendigerweise eine Beziehung zu dem abgebildeten Objekt oder dessen Oberfläche hergestellt. Der Suchraum für die richtigen Zuordnungen ist deshalb sehr groß und die Wahrscheinlichkeit von Vieldeutigkeiten ist erheblich.

In diesem Dilemma kann nur das Einbringen von Vorwissen entscheidend weiterhelfen, und zwar Vorwissen über das, was gemessen werden soll, und über die Vorgeschichte und die Eigenschaften der Bilder. Um eine Zuordnung mit dem Objekt in Verbindung zu bringen, wird das Vorwissen über das Objekt und über die Aufnahme in ein Objektmodell (2.3) umgesetzt. Dazu gehört auch, wie wir gesehen haben, daß bereits bei der Extraktion der Bildobjekte implizit oder explizit Annahmen über das Objekt gemacht werden.

## 2.3 Annahmen über die Objekte der Zuordnung und die Bildentstehung

Sind in den einzelnen Bildern Bildobjekte ausgewählt, die sich potentiell zur Zuordnung eignen, müssen im nächsten Schritt die Zuordnungen zwischen den Bildobjekten zweier oder mehrerer Bilder gefunden werden. Wie im vorigen Kapitel dargestellt, ist die Zuordnung extrahierter Bildobjekte (Bildfenster/Bildmerkmale) allein zur eindeutigen Bildzuordnung schwach und unzuverlässig. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten und zur Herstellung von Beziehung zwischen den Bildobjekten und dem dreidimensionalen Objekt bzw. seiner Oberfläche wird **Vorwissen** über die Bildentstehung und über das Objekt eingebracht. Um eine eindeutige und richtige Zuordnung zu erhalten, sollte man also zumindest ungefähr wissen, um welche Art von Objekt es sich handelt, das erfaßt werden soll, und welche Relationen zwischen den Messungen im Bildraum und dem Objekt bestehen. Allgemein wird in der Photogrammetrie von den Abbildungsgesetzen der perspektiven Abbildung eines Lambert'schen Strahlers ausgegangen. Daraus abgeleitete spezielle Detail-Modellierungen für die Bildentstehung und für das Objekt werden dann in den Zuordnungsalgorithmus (2.4) eingebracht, um die Suche nach den richtigen Zuordnungen zu vereinfachen und gleichzeitig Vieldeutigkeiten auszuschalten. Wie diese Detail-Modellierungen aussehen und wie sie in ein Bildzuordnungsverfahren eingebracht werden, kann sehr unterschiedlich sein. Im folgenden sollen einige typische Aufnahme- und Objektmodelle (hier Oberflächenmodelle) und die wichtigsten daraus abgeleiteten Annahmen und Bedingungen aufgeführt werden, die in den betrachteten Bildzuordnungsverfahren eine Rolle spielen und speziell für die Bestimmung der Geländeoberfläche von Bedeutung sind.

Zwei Stereobilder sind in der Regel in ihrem Bildinhalt nicht gleich. Sie unterscheiden sich geometrisch und photometrisch, weil es sich um 2 verschiedene perspektive Abbildungen eines 3D-Objektes handelt. Die zum Teil erheblichen Disparitäten in Stereobildern beruhen hauptsächlich auf unterschiedlicher Kameraorientierung und -position, sowie unterschiedliche Beleuchtungs- und Blickrichtungen. Die Ursachen liegen somit in der Bildentstehung, genauer gesagt in der unterschiedlichen Aufnahmeposition und den Unterschieden im physikalischen Prozeß von der Aufnahme bis zum digitalen Bild. Die Aufgabe ist es, richtige Zuordnungen in den Bildern zu finden, die identischen Objekten entsprechen.

Für die Beschreibung der Relation zwischen Bild- und Objektraum wird meist von einer perspektiven Abbildung ausgegangen, die durch die geometrischen Parameter einer Zentralprojektion modelliert wird. Sind die Abbildungsparameter zweier Bilder bekannt, so kann von der Epipolarbedingung (2.3.1) Gebrauch gemacht werden, die es ermöglicht die Suche nach den richtigen, eindeutigen Zuordnungen zwischen zwei Bildern auf eine Dimension einzuschränken. Die damit verbundene erhebliche Reduzierung im Zuordnungsaufwand ist von großer Bedeutung für die DHM Erfassung, bei der sehr viele Zuordnungen zu bestimmen sind.

Vorwissen in Form von Annahmen und Bedingungen über das reale Objekt werden in ein Objektmodell umgesetzt. Im weiteren wird hierbei nur ein Modell der Objektoberfläche betrachtet. Dieses kann je nach Fragestellung sehr allgemein oder sehr speziell sein. Je mehr Vorwissen vorhanden ist, desto spezifischer kann ein Modell sein.

Hinsichtlich des Reflexionsverhaltens des Objekts werden Annahmen über Opazität und Transparenz der Oberfläche getroffen (2.3.2). Für die Geländeoberflächenerfassung wird nahezu ausschließlich von einer opaken Oberfläche ausgegangen.

Für die hier folgenden Betrachtungen hinsichtlich den Modellen zur Objektgeometrie gehen wir von dem Normalfall der Stereoaufnahme aus. Kleine Bildneigungen und Basiskomponenten verändern die Abbildungen nur wenig und brauchen somit hier nicht näher betrachtet zu werden. Schon im Normalfall der Stereoaufnahme treten an den zugeordneten Bildobjekten (Bildfenstern/Bildmerkmalen) in den beiden Bildern die wichtigsten Unterschiede auf, die sich als Maßstab, Translation, Rotation und Verzerrung manifestieren und die in erster Linie auf die unterschiedliche Aufnahmeposition zurückgehen.

Ein Modell über die Objektoberflächengeometrie ist in jedem Fall notwendig zur Zuordnung. Häufig ist dieses Modell nur implizit gegeben im Sinne von Voraussetzungen oder Annahmen (z.B. Objekte als Ebene). Lokal können noch einfache Modelle genügen (2.3.3), für eine globale Oberfläche werden komplexere Modelle erforderlich (2.3.4).

Ein einfaches Modell der Geländeoberfläche zur Zuordnung geht, wenn man also den Normalfall der Stereoaufnahme (#1) annimmt, von einem körperhaften (#2) Objekt mit einer lokal ebenen Oberfläche (#3) im Raum aus, die dem Sensor zugewandt (#4) und undurchsichtig (#5) ist. Diese fünf Annahmen drücken aus, wie die Aufnahme entstanden ist und wie die Geländeoberfläche aussehen kann. Diese spezifischen Objektbedingungen mögen zwar einschränkend wirken, erfassen aber sehr viele Fälle (vor allem beim DHM), weil Voraussetzungen der Fläche im Normalfall nicht sensibel sind, und nur näherungsweise gültig sein müssen. Aber in allgemeineren Fällen ist eine komplexere Modellierung erforderlich.

Sind spezielle Modellvorstellungen oder implizite Modellannahmen über die Geometrie und das Reflexionsverhalten der Oberfläche getroffen, so liefert die Annahme der Zentralprojektion für die Aufnahme zwei weitere Bedingungen, nämlich bezüglich der Eindeutigkeit der Zuordnung (2.3.5) und der topologischen Nachbarschaft (2.3.6). Da wir es bei der Zuordnung von Geländeaufnahmen mit vielen ähnlichen Bildobjekten (Bildfenstern/Bildmerkmalen) zu tun haben, sind diese beiden Bedingungen sehr wichtig, um aus der Fülle möglicher Zuordnungen die eindeutigen zu finden.

Da bei dem Suchprozeß der Zuordnung nach den Abbildungen des gleichen Objekts gesucht wird, ist Ähnlichkeit ein zentraler Begriff (2.3.7). Hiermit ist die radiometrische Ähnlichkeit homologer Bildinhalte gemeint. Über die Ähnlichkeit wird Zuordnung erst möglich. Für den Suchprozeß ist eine Näherungswertbestimmung (2.6.2) erforderlich, der somit ebenfalls eine wichtige Rolle zukommt.

### 2.3.1 Epipolarbedingung

Kenntnisse über den physikalischen Abbildungsvorgang Objekt->Bild werden benützt, um die Zuordnung von Bildfenstern/Bildmerkmalen zu vereinfachen. Üblicherweise ist die Abbildung eine Zentralprojektion, die mathematisch modelliert wird. Für die Höhenmessung im Bild werden die Eigenschaften der Kernlinien- oder Epipolargeometrie ausgenutzt. Sind die Parameter der relativen Orientierung zweier Bilder bekannt, so kann mit ihrer Hilfe jedes Bild in ein sogenanntes normalisiertes Normalbild oder Epipolarbild transformiert werden (Kreiling, 1976). Bei zwei homologen Normalbildern (siehe Abbildung 2.2) entspricht einer Bildzeile (gerade Linie) im linken Bild ( $l'$ ) eine Bildzeile im rechten Bild ( $l''$ ), d.h. die  $y$ -Parallaxen verschwinden. Damit brauchen für die Höhenbestimmung nur die Koordinaten eines Punktes (bzw. Bildfensters/Bildmerkmals) im linken Bild ( $x',y'$ ) und die  $x$ -Parallaxe ( $p_x$ ) zum korrespondierenden Punkt (bzw. Bildfenster/Bildmerkmal) im rechten Bild gemessen zu werden. Mit Hilfe der Epipolargeometrie wird also die Suche nach dem zugeordneten Punkt (bzw. Bildfenster/Bildmerkmal) auf eine Dimension (in  $x$ -Richtung) beschränkt. Zu beachten ist, daß bei Mehrfachbildern die Epipolarbedingung immer nur paarweise gilt und daß die Epipolarlinien bei nicht-perspektiven Abbildungen nicht notwendigerweise gerade Linien sein müssen, sondern auch gekrümmt sein können, wie es z.B. bei SPOT-Bildern der Fall ist.

Um die Suche nach der Zuordnung weniger anfällig gegenüber Fehlzuordnungen zu gestalten, wird oftmals in mehreren benachbarten Bildzeilen gleichzeitig nach der Zuordnung gesucht (Claus, 1983). Eine zweidimensionale Zuordnung im Normalbild erlaubt es,  $y$ -Parallaxen miteinzubeziehen, was für die Höhenmessung selbst unwesentlich ist, aber z.B. für Interpretationsaufgaben wichtig wird, wo auch die  $y$ -Koordinate des korrespondierenden Punktes gefragt ist, die aufgrund möglicher Restparallaxen in  $y$ -Richtung nicht exakt auf der korrespondierenden Bildzeile liegt.

### 2.3.2 Opazität und Transparenz der Oberfläche

Hinsichtlich des Reflexionsverhaltens der Oberfläche kann eine wesentliche Vereinfachung des Objektmodelles erreicht werden, indem die Oberfläche eines Objekts als entweder opak oder transparent angenommen wird. Im Luftbildfall treten in der überwiegenden Zahl opake Flächen auf (Abb. 2.3a). Transparente Oberflächen hingegen existieren z.B. in Flachwassergebieten. In bebauten Gebieten treten sie bei Glasdächern, wie z.B. Gewächshäusern oder dem Münchener Olympia Dach (Abb. 2.3b) auf. Je nach Sonnenstand sind diese Flächen aber zum größeren Teil eher spiegelnd, oder mindestens nur halb-transparent. Derartige Oberflächen sind von den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen, auch eine Modellierung rein transparenter Oberflächen ist hier nicht vorgesehen. Für die hier untersuchten Zuordnungsverfahren wird also Opazität der Oberfläche implizit angenommen.

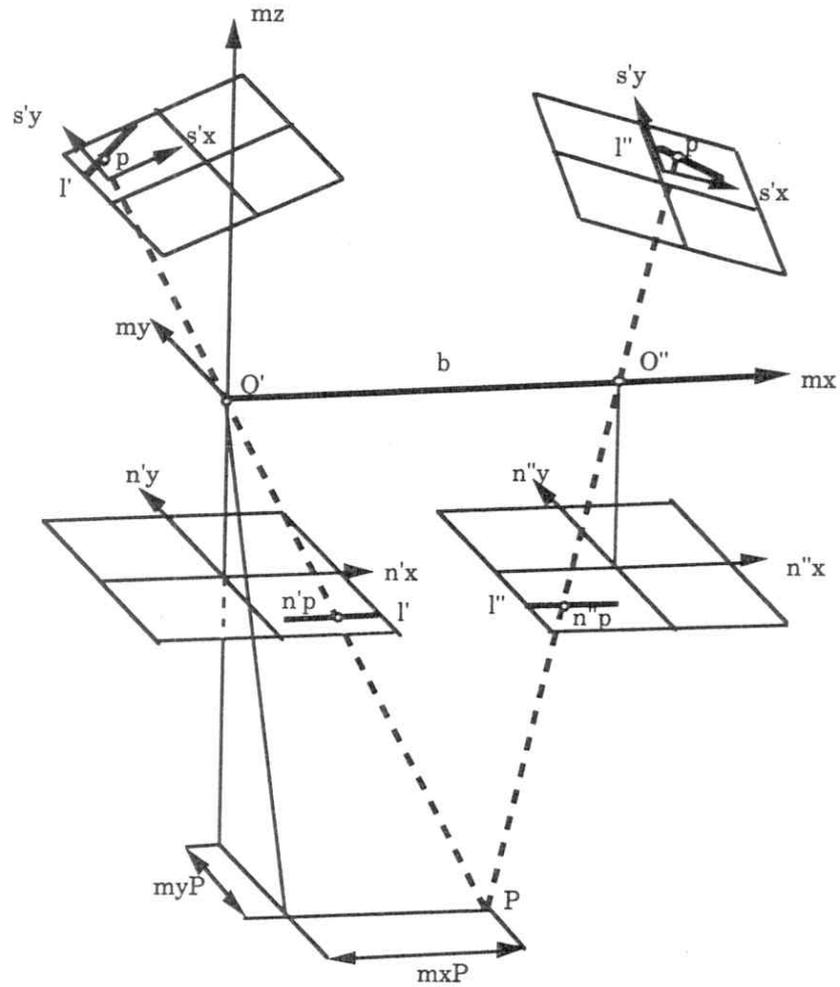
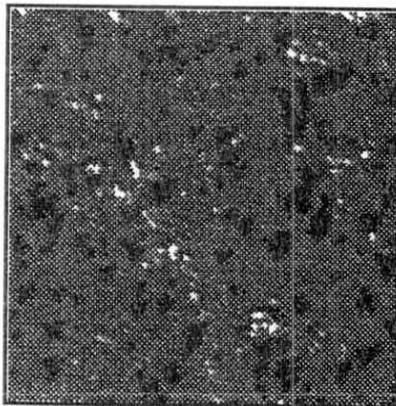


Abbildung 2.2 Epipolargeometrie für das normalisierte Stereobildpaar.

- $O', O''$  Projektionszentrum linkes/rechtes Bild
- $b$  Basis
- $s', s''$  Sensorkoordinatensystem  $(x, y)$  linkes/rechtes Bild
- $n', n''$  Normalbildkoordinatensystem  $(x, y)$  linkes/rechtes Bild
- $m$  Modellkoordinatensystem  $(x, y, z)$
- $l', l''$  Korrespondierende Linien linkes/rechtes Bild
- $p, P$  Punkt im Bildraum/Modellraum



a)



b)

Abbildung 2.3 Beispiel für Opazität und Transparenz von Oberflächen.

(a) Nicht durchsichtige, opake Oberfläche, (b) Durchsichtige/spiegelnde Oberfläche

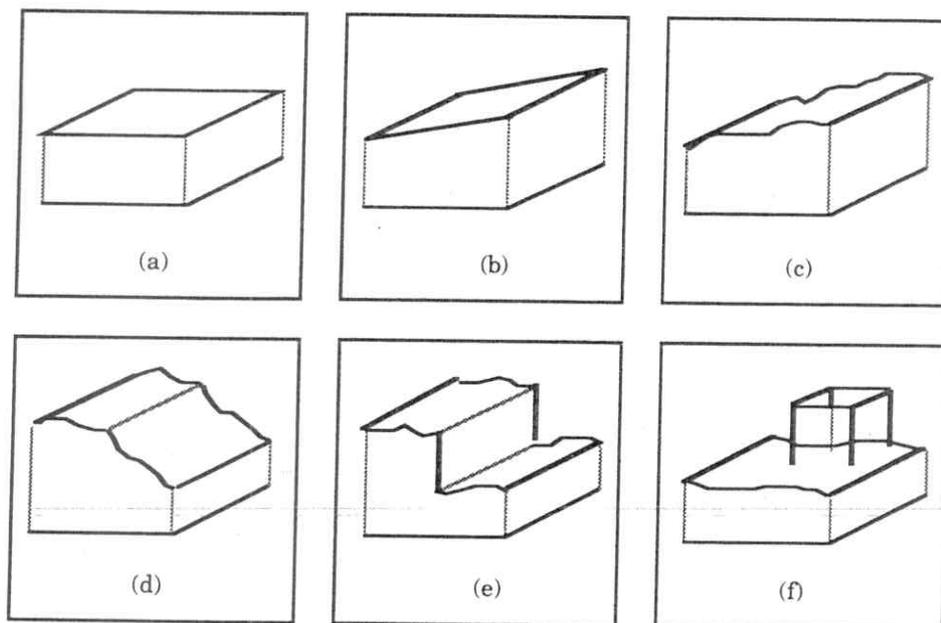
### 2.3.3 Modelle für die lokale Oberflächengeometrie bei der Zuordnung

Vorwissen über die Objektoberflächengeometrie läßt sich mit unterschiedlicher Approximation in ein Modell umsetzen. Die Wahl zwischen einfachen oder komplexen Flächenmodellen hängt vom Objekt und der Ausschnittgröße ab, d.h. bezogen auf das Bild auch vom Maßstab. Lokale Oberflächengeometrie bezieht sich auf einen einzelnen Ausschnitt der Oberfläche. Betrachtet man einen genügend kleinen Ausschnitt einer Oberfläche aus großer Distanz, läßt sich dieses Teilstück der Oberfläche durch eine horizontale oder geneigte Ebene annähern. Man hat also ein einfaches, mathematisch leicht zu beschreibendes Oberflächenmodell. Betrachtet man dieselbe Oberfläche aus kürzerer Distanz, so kann man u.U. feststellen, daß eine Oberflächenbeschreibung durch eine Ebene viel zu grob und die Abweichungen unakzeptabel groß sind. Eine Beschreibung durch eine glatte Flächenfunktion könnte angemessener sein. Geht man noch näher, so sind vielleicht Diskontinuitäten zu erkennen, die keiner glatten Oberfläche mehr entsprechen. Ein allgemeines Problem liegt darin, daß die abgebildete Fläche nicht notwendigerweise die gesuchte Fläche ist, dies ist z.B. bei der DHM Erfassung der Fall.

Die in den Abbildungen 2.4 (a)-(f) angegebenen Approximationen für eine Objektoberfläche klassifizieren die wichtigsten Fälle systematisch. Ausgegangen wird dabei von körperhaften Objekten, die geometrisch stabil sind.

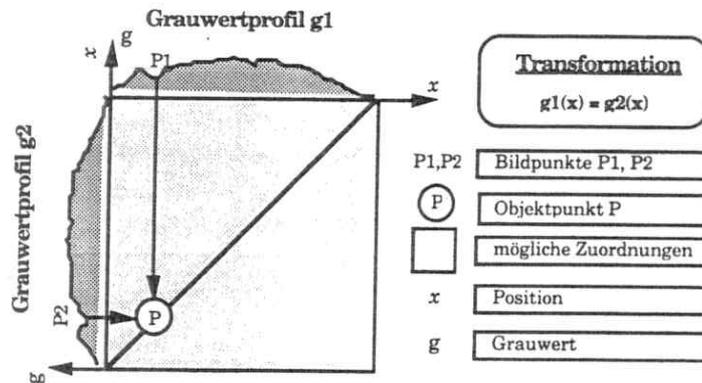
Für den Fall der Erfassung der Geländeoberfläche sind für eine lokale Oberflächenmodellierung die Typen (a), (b), (c) und (d) üblich. Für eine globale Oberflächenmodellierung (2.3.4) finden die Typen (a), (b), (c), (d) und (e) Verwendung. Typ (e) stellt noch eine kontinuierliche Fläche dar, ist allerdings an der Sprungstelle nicht eindeutig. Typ (f) spielt eine untergeordnete Rolle und ist für Spezialfälle, wie eine Brücke über ein Tal oder bei Transparenz von Bedeutung. Selbstverständlich könnte auch für Typ (f) ein Modellansatz in eine Zuordnung eingebaut werden, ist aber bisher kaum gemacht worden.

Um resultierende Unterschiede in den Bildern allein hinsichtlich der Objektgeometrie, unbeeinflußt von unterschiedlichen Aufnahmeorientierungen, beurteilen zu können, wird bei den folgenden Betrachtungen für das Modell der Aufnahme vom Normalfall der Stereoaufnahme mit zwei perspektiven Senkrechtaufnahmen ausgegangen. Die



**Abbildung 2.4** Lokale und globale Modelle für Objektoberflächen für die Zuordnung (nach Li, M. 1989).  
(a) horizontale Ebene (lokal,global), (b) geneigte Ebene (lokal,global), (c) glatte Oberfläche (lokal,global), (d) glatte Oberfläche mit Diskontinuitäten in der Neigung der Oberfläche (lokal, global), (e) glatte Oberfläche mit Diskontinuitäten in der Position (global), (f) Mehrfache Oberflächen (nicht einwertige)

gebräuchlichsten Typen der Oberflächenmodellierung sollen anhand der Zuordnung zweier eindimensionaler Grauwertprofile aus einem Stereobildpaar erläutert werden. Damit soll gezeigt werden, welche Typen von Beziehungen zwischen den beiden Grauwertprofilen auftreten. In Abbildung 2.5 ist eine Prinzipskizze für die Zuordnung gegeben. Zwei identische Grauwertprofile beider Bilder (Grauwertprofil  $g_1$ , Grauwertprofil  $g_2$ ) werden, wie gezeigt, orthogonal zueinander aufgetragen. Sie definieren das markierte Quadrat, das den Raum aller möglichen Zuordnungen angibt. Für den Fall identischer Grauwertprofile, die nicht gegeneinander verschoben sind, liegen die richtigen Zuordnungen (z.B. Punkt P) auf der markierten Diagonalen. Die Transformation von einem Punkt  $P_1$  des Grauwertprofils  $g_1$  zu einem Punkt  $P_2$  des Grauwertprofils  $g_2$  ist also die identische Abbildung, d.h.  $P_1$  und  $P_2$  haben die gleichen Bildkoordinaten.



**Abbildung 2.5** Prinzipskizze für die eindimensionale Zuordnung zweier Grauwertprofile. Zugeordnete Punkte liegen auf einer Diagonalen in dem Quadrat, das alle möglichen Zuordnungen umfaßt.

### Oberflächenmodell vom Typ „Horizontale Ebene“

Bei der DHM Messung im Stereobildpaar stammen die beiden einander entsprechenden Grauwertprofile aus unterschiedlichen Bildkoordinatensystemen  $x_1$  und  $x_2$ . Werden diese formal gleichgesetzt, so bedeutet z.B. eine Verschiebung eine Transformation des Grauwertprofils um den Verschiebungsbetrag  $b$ . Durch die resultierende Verschiebung des einen Grauwertprofils um den Betrag ( $b$ ), also  $g_1(x) = g_2(x+b)$ , kommen die korrekten Zuordnungen ( $P$ ) nun auf eine Gerade zu liegen, die parallel zur Diagonalen des Quadrats der möglichen Zuordnungen liegt (Abbildung 2.6a). Für den angenommenen Normalfall der Stereoaufnahme liegen alle richtig zugeordneten Punkte damit auf einer horizontalen Geraden im Gelände, was übertragen auf den zweidimensionalen Fall einer horizontalen Ebene entsprechen würde.

Dieses Modell wird in vielen Zuordnungsalgorithmen verwendet. Die Kreuzkorrelation (Kreiling, 1976) benutzt dieses Modell implizit.

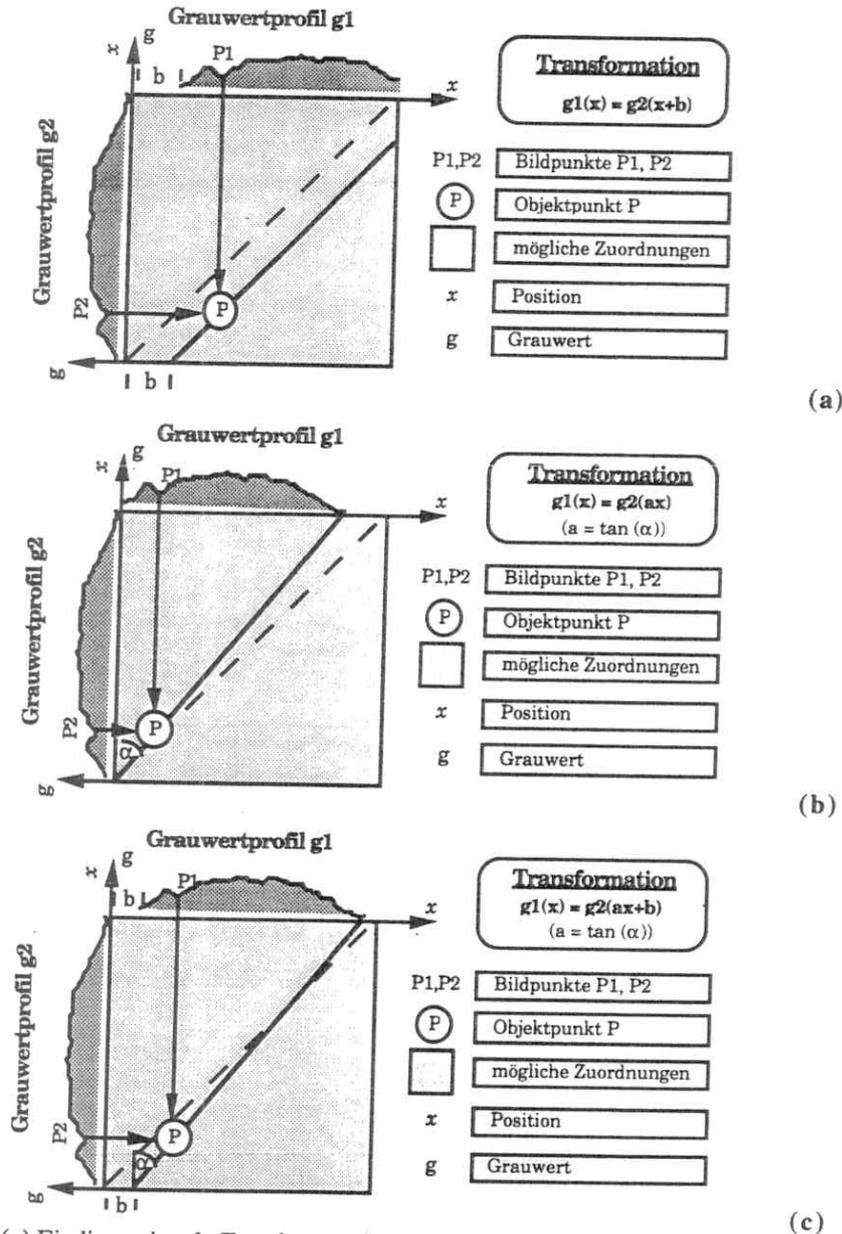
### Oberflächenmodell vom Typ „Geneigte Ebene“

Eine etwas allgemeinere Annahme zumindest für die lokale Oberfläche ist die einer geneigten Ebene. In der Prinzipdarstellung der eindimensionalen Zuordnung bedeutet dies, daß zugeordnete Punkte auf eine Gerade zu liegen kommen, die eine andere Steigung als die Diagonale im Quadrat der möglichen Zuordnungen aufweist (Abbildung 2.6b). Hier ist nun zu sehen, daß ein Grauwertprofil gegenüber dem anderen maßstäblich verzerrt ist, also  $g_1(x) = g_2(ax)$ . Mit dem allgemeinen Fall einer Translation ( $b$ ) ergibt sich nun die Transformation zu  $g_1(x) = g_2(ax+b)$ , wie in Abbildung 2.6c zu sehen. Für die zweidimensionale (lokale!) Bild- zu Bild Zuordnung wird dieser eindimensionale Transformationsansatz entsprechend in eine 4-Parameter Helmerttransformation oder eine 6-Parameter Affintransformation umgesetzt.

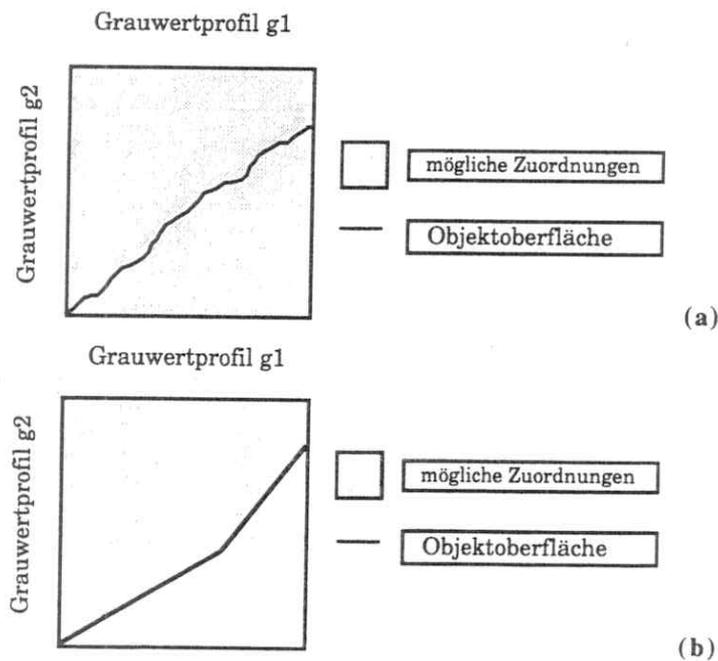
Dieses Modell ist sehr verbreitet in der Zuordnung, z.B. in der Kleinste Quadrate Methode (Ackermann, 1984; Grün, 1985) oder dem Verfahren nach (Norvelle, 1981). Das Modell gilt auch für den Nicht-Normalfall, da lokal die gleichen Effekte auftreten.

### Oberflächenmodell vom Typ „Glatte Oberfläche“

Die weitere Verallgemeinerung der vorab besprochenen Oberflächenmodelle läßt sich mit Funktionen höherer Ordnung darstellen, womit in der Prinzipdarstellung der eindimensionalen Zuordnung die Gerade, auf der zugeordnete Punkte liegen, in ein Polygon übergeht. Es wird dazu angenommen, daß sich Teilbereiche der Oberfläche im eindimensionalen Fall durch Geraden anpassen lassen. Auch allgemeine eindimensionale Kurven, die kontinuierlich sind, können herangezogen werden (Abbildung 2.7a). Zu beachten ist, daß für die Beschreibung einer lokalen Oberfläche dieser Aufwand oftmals nicht gerechtfertigt ist, für die Beschreibung globaler Oberflächen dagegen wichtig ist.



**Abbildung 2.6** (a) Eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Horizontale Ebene“ und der Translation  $g_1(x) = g_2(x+b)$  zwischen den Grauwertprofilen, (b) eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Geneigte Ebene“ und der Transformation  $g_1(x) = g_2(ax)$ , (c) eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Verschobene und geneigte Ebene“ und der Transformation  $g_1(x) = g_2(ax+b)$  zwischen den Grauwertprofilen.



**Abbildung 2.7** (a) Eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Glatte Oberfläche“ und (b) eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Glatte Oberfläche mit Diskontinuitäten in der Neigung“.

### Oberflächenmodell vom Typ „Glatte Oberfläche mit Diskontinuitäten in der Neigung“

Bei Oberflächen treten oftmals Diskontinuitäten in der Oberflächenneigung auf, was bedeutet, daß an der Stelle der Diskontinuität eine Sprungstelle der Richtung des Normalenvektors zur Oberfläche existiert. In der Prinzipdarstellung der eindimensionalen Zuordnung (Abbildung 2.7b), hat also die Kurve, auf der die Zuordnungen der beiden Grauwertprofile liegen, einen deutlichen Knickpunkt. Dieses Oberflächenmodell ist sehr wichtig hinsichtlich der DHM Erfassung, falls die Bruchliniendetektion und Lokalisierung automatisiert werden soll. Dieses Oberflächenmodell wird allerdings bis jetzt sehr selten benutzt. Li (Li, M., 1989) verwendet ein stark eingeschränktes Bruchlinienmodell (nur eine Bruchlinie im Bildfenster) zur Kleinsten Quadrate Zuordnung nach Rosenholm (Rosenholm, 1986), wobei die Bruchlinie auf einer geometrischen Kante beruht und nicht auf einer Grauwertkante.

### 2.3.4 Modelle für die globale Oberflächengeometrie bei der Zuordnung

Für eine geometrische Beschreibung der globalen Oberfläche ist eine Erweiterung der vorab besprochenen Modelle für lokale Oberflächengeometrie auf eine größere Umgebung nicht in jedem Fall befriedigend. Treten dabei zu starke Abweichungen auf, werden immer speziellere, aufwendigere Funktionen für diese Modelle erforderlich, um eine hinreichend genaue Beschreibung der Oberfläche zu liefern.

Als Alternative bietet es sich an, Bedingungen an die Verknüpfung von lokalen Teilgebieten der Oberfläche zu stellen, die ihrerseits durch lokale Modelle beschrieben werden. Modelle zur globalen Oberflächengeometrie leiten aus diesen Bedingungen im Objektraum Bedingungen für die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen lokalen Bildobjekten ab. Es ist also (a) festzustellen, welche Bedingungen zwischen benachbarten lokalen Oberflächen angenommen werden und wie diese sich in den Beziehungen zwischen benachbarten Bildobjekten ausdrücken und (b), wie diese globalen Bedingungen in Bildzuordnungsverfahren eingesetzt werden.

#### (a) Bedingungen zwischen benachbarten lokalen Oberflächen/Bildobjekten

Die Bedingung der **Kontinuität der Oberfläche** erlaubt nur kontinuierliche Ableitungen der Teilfläche und somit keine Diskontinuitäten in der Neigung der Oberfläche und keine Lücken.

Die **Glattheitsbedingung** (engl. „smoothness“) wird aus der Annahme formuliert (Marr, 1979), daß für benachbarte genügend kleine Teilgebiete die Oberfläche physikalischer Objekte sich geometrisch nur wenig und nicht abrupt ändert. Anschaulich ist gemeint, daß keine Sprünge auftreten, daß keine starken lokalen Amplituden existieren und daß keine starken Krümmungen bzw. Neigungsänderungen auftreten. Mit dieser Bedingung können also benachbarte, lokale Oberflächenmodelle recht einfach miteinander verknüpft werden, wobei durchaus Diskontinuitäten in der Neigung der Oberfläche (Bruchkanten) erlaubt sein können.

Aus Modellen für das menschliche Sehen werden **Grenzwerte für den Parallaxengradienten** abgeleitet, d.h. wie stark sich die Parallaxe von einem Punkt zu einem benachbarten Punkt ändern darf. Üblicherweise wird dabei der Gradient von der Parallaxe eines Pixels zur Parallaxe des benachbarten Pixels betrachtet. Pollard (Pollard, 1985) verwendet einen Grenzwert von 1, womit, wie er zeigt, automatisch ebenso die Eindeutigkeitsbedingung der Zuordnung (2.3.5) erfüllt ist.

Für die merkmalsgestützte Zuordnung ist die Annahme der **figuralen Kontinuität** von großer Bedeutung. Sie besagt, daß falls die Oberfläche in der Nachbarschaft eines Punktes kontinuierlich ist, auch eventuell vorhandene Kanten oder davon abgeleitete Strukturen kontinuierlich sind. Mit dieser Annahme können kantenähnliche Strukturen auf der Basis ihrer Kontinuität und der Ähnlichkeit ihrer Geometrie zugeordnet werden (Mayhew, 1981; Grimson, 1985). Mit der Annahme figuraler Kontinuität ist die Annahme der Konsistenz zwischen Zeilen bei der Zuordnung benachbarter Zeilen in einem Epipolarbild verbunden (Claus, 1983; Ohta, 1985).

Aus der Kenntnis der Aufnahmeparameter und dem Vorwissen über die Oberfläche kann man auf eine **maximal mögliche Parallaxe** schließen. Mit der Angabe maximaler Parallaxen kann die Menge möglicher Zuordnungen erheblich eingeschränkt werden.

#### (b) Umsetzung von Nachbarschaftsbedingungen in die Zuordnung

Bei einigen Zuordnungsverfahren wird die globale Oberfläche explizit durch ein regelmäßiges Gitter von Punkten repräsentiert, die entweder im Objektraum (z.B. Wrobel, 1987a,b; Ebner, 1987) oder im Parallaxenraum (Rosenholm, 1986; Li, M., 1989) gegeben sind. Bedingungen wie Kontinuität oder Glattheit der Oberfläche lassen sich z.B. mit Hilfe Finiter Elemente Methoden in das Modell einbringen. Zwischen den Gitterpunkten können ebene Oberflächen angenommen, an anderen Stellen Positions- und Orientierungsdiskontinuitäten eingebracht werden. Damit lassen sich alle Oberflächenmodelltypen a-e (Abbildung 2.4) darstellen.

Bei anderen Zuordnungsverfahren werden diese Bedingungen direkt zur globalen Zuordnung (2.4.3) eingesetzt, wie z.B. (Pollard, 1985; Ayache, 1987; Olsen, 1986; Barnard, 1986, 1987a). Auch hiermit sind alle Oberflächenmodelltypen a-e (Abbildung 2.4) zu realisieren.

### 2.3.5 Eindeutigkeit der Zuordnung

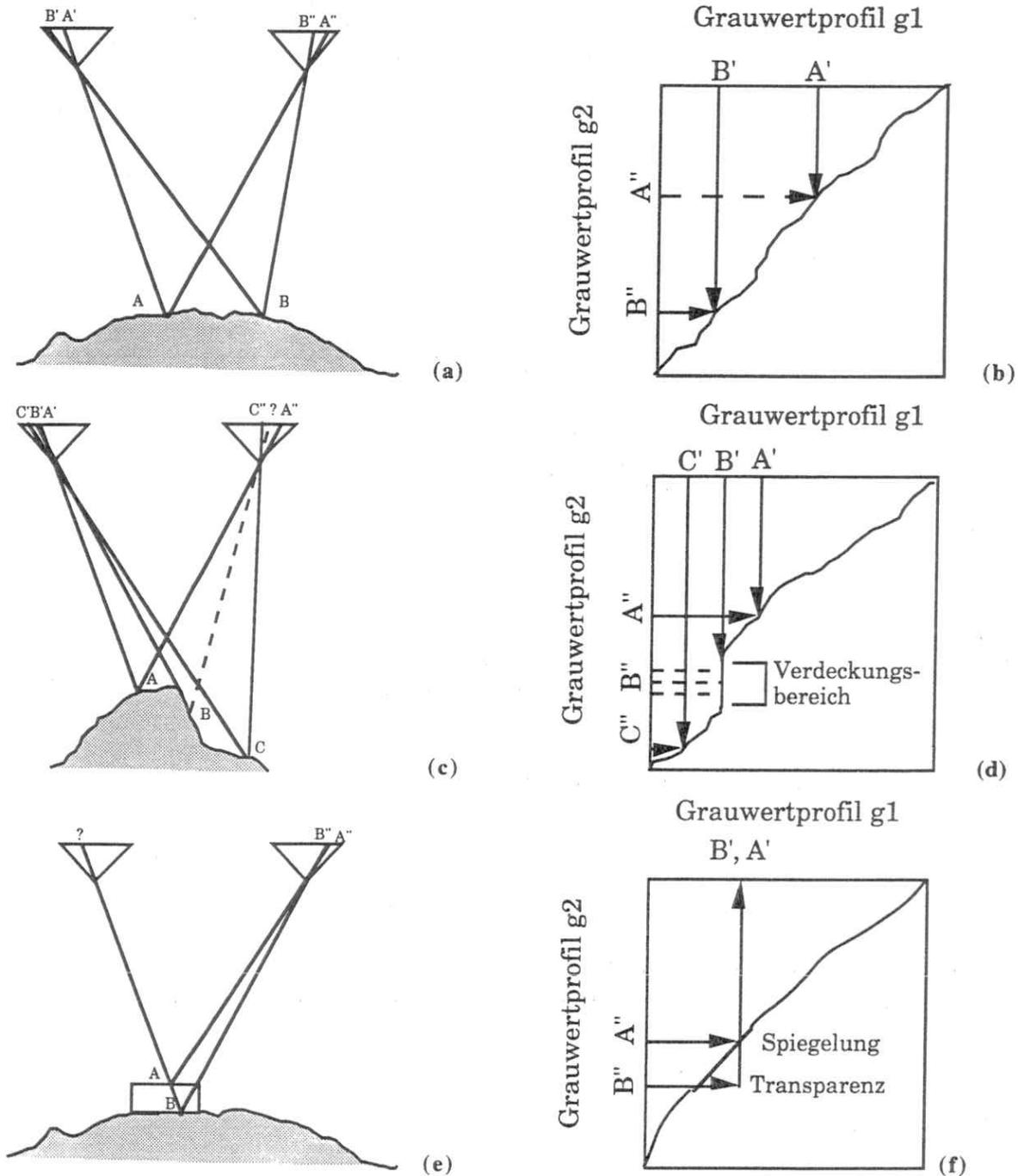
Bei kontinuierlicher (2.3.4) und opaker Objektoberfläche (2.3.2) gibt es zu jedem Punkt (bzw. Bildfenster/Bildmerkmal) im linken Bild höchstens einen zugeordneten Punkt im rechten Bild (Abbildung 2.8a), d.h. die Zuordnung ist eindeutig.

Auch in der Prinzipdarstellung der Zuordnung zweier Grauwertprofile wird deutlich, daß zu jedem Punkt im linken Bild genau ein zugeordneter Punkt im rechten Bild existiert (Abbildung 2.8b).

Sind Teile der Oberfläche in einem der Bilder verdeckt, so kann bei Opazität der Oberfläche die Eindeutigkeitsbedingung verletzt sein (Abbildung 2.8c). Objektpunkte sind entweder nur im linken oder nur im rechten Bild abgebildet. Teile des rechten Grauwertprofils  $g_2$  (Abbildung 2.8d) sind im linken Grauwertprofil  $g_1$  nicht enthalten, d.h. einem Punkt im linken Grauwertprofil  $g_1$  können viele Punkte im rechten Bild  $g_2$  entsprechen.

In ähnlicher Weise gilt dies auch bei transparenten Oberflächen (Abbildungen 2.8e, f).

Die Eindeutigkeit wird von allen Zuordnungsverfahren als Bedingung angenommen, sofern nicht Abweichungen davon modelliert werden.



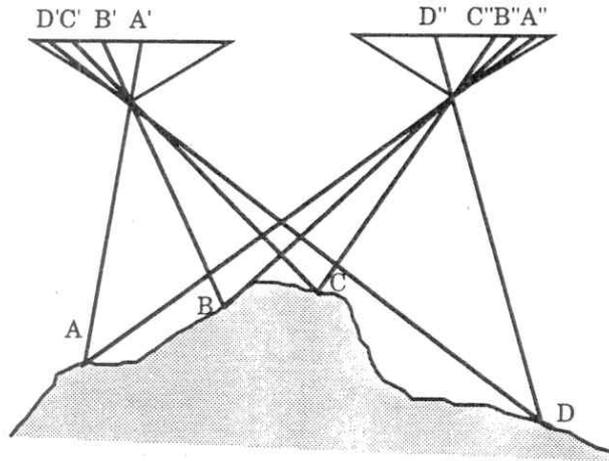
**Abbildung 2.8** Fälle bei denen Eindeutigkeit der Zuordnung gegeben oder verletzt ist, links im Schnitt, rechts in der beschriebenen Prinzipdarstellung der eindimensionalen Zuordnung zweier Grauwertprofile.  
 (a), (b) Die Zuordnung ist eindeutig.  
 (c), (d) Die Eindeutigkeit ist verletzt. Teilbereiche sind verdeckt in einem Bild.  
 (e), (f) Die Eindeutigkeit ist verletzt. Es liegt z.T. Spiegelung oder Transparenz der Oberfläche vor.

### 2.3.6 Topologische Nachbarschaft bei der Zuordnung

Die Nachbarschaftsbeziehung zwischen zwei Objekten im Objektraum, übertragen auf den Bildraum, ist eine der stärksten und gebräuchlichsten Annahmen zur Stabilisierung von Zuordnungen.

Sind zwei Objekte im Objektraum benachbart, so wird angenommen, daß diese Objekte auch im Bildraum benachbart sind, daß also im Bild die gleichen topologischen Beziehung wie im Objektraum bestehen.

Am Beispiel der eindimensionalen Zuordnung von Punkten (Abbildung 2.9) läßt sich dieser Zusammenhang auch folgendermaßen formulieren: bei der Annahme einer kontinuierlichen, opaken Oberfläche erfolgt keine Umkehr der Reihenfolge von benachbarten Punktmerkmalen in einer Kernlinie. Diese Bedingung steckt implizit in fast allen Zuordnungsverfahren, also nicht nur solchen für die DHM Erfassung, wird aber auch explizit angewandt (Baker, 1981; Ohta, 1985).



**Abbildung 2.9** Topologische Nachbarschaftsbeziehungen im Bild- und Objektraum.  
(eindimensionale Darstellung, gleiche Reihenfolge von benachbarten Punktmerkmalen)

### 2.3.7 Radiometrische Ähnlichkeit von homologen Bildbereichen

Es wird generell angenommen, daß die Intensitätsprofile um homologe Punkte zweier Bilder ähnlich, aber nicht gleich sind. Die radiometrischen Unterschiede zweier homologer digitalisierter Luftbildausschnitte haben verschiedene Ursachen. Die Strahlung, die vom Objekt ausgeht, ist vor allem von der räumlichen Blickrichtung und der Richtung zur Lichtquelle (Sonne), sofern nicht diffus, abhängig. Daneben spielen atmosphärische Bedingungen sowie die Kameracharakteristik eine gewisse Rolle. Einflüsse zweiter Ordnung auf die Photometrie können z.B. von der Filmentwicklung und der Digitalisierung herrühren. Die radiometrische Ähnlichkeit ist die zentrale Annahme zur Bestimmung der geometrischen Zuordnung, unabhängig ob Bildfenster oder Bildmerkmale zugeordnet werden.

## 2.4 Zuordnungsalgorithmen

Das Ziel der Bildzuordnung ist die Identifizierung der Abbildungen desselben Objekts in zwei oder mehreren Bildern. Die Zuordnung ist in Einklang mit dem Modell der Objektoberfläche und dem Modell der Abbildung zu bringen, um schließlich Objektkoordinaten abzuleiten.

Da die Bilder nicht identisch sind, wird daher ein Maß für Zuordnung erforderlich, also ein Maß, das die Güte der Zuordnung zwischen zwei Abbildungen definiert. Da für die Zuordnung Bildfenster oder Bildmerkmale ausgewählt werden, stehen dafür mehrere Kriterien zur Auswahl. Es werden solche Kriterien gewählt, die in der Lage sind, Ähnlichkeit zu beschreiben, so z.B. ein Korrelationskoeffizient zweier Bildausschnitte.

Ist ein solches Kriterium gewählt und für Kombinationen von Bildfenstern/Bildmerkmalen der beiden Bilder berechnet, so bleibt festzustellen, wo diese am ähnlichsten sind und ob sie tatsächlich dasselbe Objekt beschreiben. Diese Konsistenzfindung umfaßt also einerseits die Suche nach dem Maximum des Kriteriums zur Zuordnung und andererseits die Überprüfung der Übereinstimmung der Zuordnung mit den Modellen der Objektoberfläche und der Abbildung. Hierbei ist nun ein Konflikt zu lösen. Wie ist eine Zuordnung mit 80%-iger Ähnlichkeit zwischen zwei Bildobjekten (Bildfenster/Bildmerkmale) und einer 50%-igen Übereinstimmung der Zuordnung mit der Glattheitsbedingung des Oberflächenmodells gegenüber einer Zuordnung mit 50%-iger Ähnlichkeit zwischen den Bildobjekten und einer

90%-igen Übereinstimmung mit der Glattheitsbedingung zu gewichten. Es ist also zu entscheiden, was eine gute, richtige Zuordnung ist.

Ein Zuordnungsalgorithmus muß gewählt werden, der für optimale oder zumindest befriedigende Konsistenz sorgt. Dabei wird zwischen der Suche nach der lokalen Konsistenz (2.4.2) und der globalen Konsistenz (2.4.3) unterschieden. Lokale Konsistenzfindung ist auf die Suche nach dem lokalen Maximum des Ähnlichkeitsmaßes ausgerichtet, während globale Konsistenzfindung die Übereinstimmung mit den Modellen zur Aufnahme und dem Objekt zum Ziel hat. Verschiedene Hilfsmittel wie die Epipolarbedingung (2.3.1), die Eindeutigkeitsbedingung (2.3.5), die Bedingung der topologischen Nachbarschaft (2.3.6), oder hierarchische Methoden zur Näherungswertbestimmung (2.6.2) werden zur Einschränkung des Suchraums für die Konsistenzfindung, zur Ausschaltung von Vieldeutigkeiten von Zuordnungen und zur Vergrößerung des Konvergenzbereichs (2.4.4) des Zuordnungsverfahrens herangezogen.

Je nach Modell des Objekts und der Aufnahme werden Objektkoordinaten oder Parallaxen bzw. Transformationsparameter zwischen den Bildern geschätzt. Diese Ergebnisse gehen zusammen mit internen Qualitätsmaßen der Bildzuordnung (2.4.5) in die anschließende Oberflächenbeschreibung ein (2.5).

#### 2.4.1 Gütemaß für die Zuordnung

Als Maß für Zuordnung muß ein Kriterium herangezogen werden, das sich aus den Bildobjekten der beiden Bilder berechnen läßt. Da zugeordnete Abbildungen gesucht sind, die das gleiche Objekt darstellen, ist es naheliegend ein Kriterium zu verwenden, das eine Ähnlichkeit zwischen den Abbildungen beschreibt. Ein Kriterium hat also entweder die Form eines Ähnlichkeitsmaßes oder die eines Distanzmaßes. Ein Distanzmaß ( $d$ ) sollte die Bedingung  $d_{jk} < d_{ij} + d_{kj}$  erfüllen. Ähnlichkeitsmaß ( $s$ ) und Distanzmaß ( $d$ ) sind oftmals durch die Funktion  $s=1/d$  oder  $s=1-d$  verbunden, womit also eine große Distanz einer geringen Ähnlichkeit entspricht.

Aus den Attributen der Bildfenster/Bildmerkmale für die Zuordnungen werden die Kriterien für Zuordnung abgeleitet. Für die Anwendung zur Zuordnung werden Anforderungen an diese Kriterien gestellt, die bei Nichterfüllung in fehlerhaften Zuordnungen resultieren können. Geometrische und radiometrische Invarianz eines Ähnlichkeits- oder Distanzmaßes sind dabei die wichtigsten Anforderungen.

Wird als Kriterium für die richtige Zuordnung zweier Bildausschnitte der Korrelationskoeffizient zwischen diesen Bildausschnitten herangezogen, so ist zu beachten, daß dieser nicht invariant gegen geometrische Verformungen, jedoch invariant gegen lineare radiometrische Differenzen ist. Dies bedeutet, daß eine rasterorientierte Zuordnung, die auf dem Korrelationskoeffizienten als Maß für Zuordnung beruht, fehlerhafte Resultate liefert, wenn die Bildausschnitte gegeneinander rotiert sind oder radiometrische Differenzen höherer Ordnung aufweisen.

Die Anforderungen bezüglich der geometrischen und radiometrischen Invarianz des Ähnlichkeitsmaßes stehen natürlich in engem Zusammenhang mit den Modellen der Objektoberfläche und der Aufnahme, die bei der anschließenden Maximierung des Ähnlichkeitsmaßes, also der lokalen Konsistenzfindung, herangezogen werden. Eine weitere wünschenswerte Eigenschaft, die ein Kriterium zur Zuordnung erfüllen sollte, ist die Einbeziehung der Seltenheit der Bildobjekte (Bildfenster/Bildmerkmale), womit die Suche nach den richtigen Zuordnungen, also die Konsistenzfindung, wesentlich erleichtert werden kann.

Sicherlich ist nicht jedes Kriterium in der Lage, alle die genannten Anforderungen oder Wünsche zu erfüllen, so daß einige Zuordnungsverfahren eine Kombination von Kriterien für die Konsistenzfindung benutzen, wie nachfolgend beschrieben wird.

##### (a) Drei gebräuchliche Typen von Kriterien als Maß für Zuordnung

Bei der rasterorientierten Zuordnung kann als einfachstes Maß für Zuordnung die **radiometrische Ähnlichkeit** (2.3.7) von Bildausschnitten herangezogen werden. Sie allein ist allerdings nur bedingt ein gutes Maß für Ähnlichkeit. Diskontinuitäten in der Position ergeben große Grauwertunterschiede. Reflexionen und Rauschen stören die radiometrische Ähnlichkeit. Bei den rasterorientierten Zuordnungsverfahren werden darüber hinaus auch **statistische Werte** als Maß für Zuordnung benutzt. Diese statistischen Werte berechnen sich zwischen den Bildfenstern aus den Grauwertfunktionen oder deren Ableitungen. Beispiele für solche Maße sind:

- Kovarianz
- Korrelationskoeffizient
- Summe der quadratischen Differenzen
- Summe der absoluten Differenzen etc.

Probleme bei dieser Art von Kriterium ergeben sich durch Verdeckungen in den Bildfenstern und durch die große Anzahl gleichartiger Maße in der Nachbarschaft.

Werden Bildmerkmale zur Zuordnung benutzt (Linien, Regionen etc.), so treten die **Attribute der Bildmerkmale** (Linienlänge oder -richtung, Regionengröße oder -form, etc.) als Kriterien in Erscheinung. Zum Teil können auch hier Probleme bei Verdeckungen durch falsche Zuordnungen auftreten. Zufällige Zuordnungen sind möglich, und in Bezug auf Robustheit ist ein einzelnes Kriterium nicht ausreichend.

#### **(b) Zur Kombination von Kriterien als Maß für Zuordnung**

Als Maß für Zuordnung wird in der Regel nur eines der genannten Kriterien zur Konsistenzfindung herangezogen, weitere werden meist nur zu internen Kontrollzwecken eingesetzt. Damit besteht eine große Abhängigkeit der Konsistenzfindung zur Zuordnung von der Güte eines einzelnen Kriteriums, das wie gezeigt nicht alle Anforderungen gleich gut erfüllen kann.

Aus diesem Grund wird versucht, eine Kombination von Kriterien als Maß für Zuordnung zu verwenden. Beispiele hierfür sind in (Lin, 1986) oder (Straub, 1987) zu finden. Probleme bei der Kombination sind die Wahl und die Gewichtung der Kriterien. Eine hohe Aussagekraft ist allein gewährleistet, wenn unabhängige Kriterien kombiniert werden. Kass (Kass, 1986) kombiniert statistische Maße mit Attributen von kantenartigen Merkmalen, wobei ein einzelnes Kriterium nicht allzu viel Information zu liefern braucht. Die Einstimmigkeit vieler unabhängiger Kriterien liefert jedoch starke Hinweise zur Korrespondenz. Viele Kriterien erhöhen dabei die Robustheit, während die Unabhängigkeit die Gewichtung erleichtert.

### **2.4.2 Lokale Konsistenzfindung bei der Zuordnung**

Für alle möglichen Kombinationen von Bildfenstern bzw. Bildmerkmalen wird ein Maß für Zuordnung berechnet, entweder aus einem einzelnen Kriterium oder einer Kombination von Kriterien. Die erste Aufgabe der Konsistenzfindung ist es, eine Maximierung des Maßes für Zuordnung in einem lokalen Bereich zu finden, also die Position zweier Bildfenster/Bildmerkmale zueinander, bei der die Ähnlichkeit ein Maximum erreicht. Zur Suche nach dem maximalen Maß für Zuordnung werden entweder Suchalgorithmen oder iterative Techniken angewandt, wovon einige nachstehend beschrieben werden. Ist lokale Konsistenz erreicht, also lokal die Ähnlichkeit maximiert, wird auf den globalen Bereich übergegangen (2.4.3), um eine Übereinstimmung mit den gefunden Maxima der benachbarten Bildfenster/Bildmerkmale und den Objekt- und Aufnahmemodellen zu erzielen.

#### **(a) Suchalgorithmen zur lokalen Konsistenzfindung bei der Zuordnung**

Bei den Kreuzkorrelationsverfahren wird versucht, den Kreuzkorrelationskoeffizienten als Maß für Zuordnung zu maximieren. Auch verwandte Maße, wie ein genormter Koeffizient, finden Anwendung. Beispiele sind in (Claus, 1983, Norvelle, 1981, Hannah, 1988) zu finden. Kass (Kass, 1986), Lin (Lin, 1986) und Straub (Straub, 1987) maximieren die Ähnlichkeit zwischen Kombinationen von Ähnlichkeitsmaßen. Grimson (Grimson, 1985) maximiert die Ähnlichkeit zwischen Attributen von Kantenmerkmalen.

#### **(b) Iterative Verfahren zur lokalen Konsistenzfindung bei der Zuordnung**

Bei den Methoden der Kleinste Quadrate Zuordnung wird versucht, die Summe der quadratischen Differenzen zwischen den Grauwerten der Bildfenster zu minimieren. Geometrische und radiometrische Parameter werden geschätzt, wobei lokal von einem vereinfachten Oberflächenmodell ausgegangen wird. Die verschiedenen Methoden reichen von der Bild zu Bild Zuordnung (Ackermann, 1984; Anderson, 1987), bis zur Einbeziehung des Objektraums und der Mehrbildinformation (Grün, 1985; Rosenholm, 1986; Wrobel, 1987a,b; Ebner, 1987; Helava, 1987, 1988a; Rauhala, 1988; Zheng, 1991).

### 2.4.3 Globale Konsistenzfindung bei der Zuordnung

Ist lokal eine Übereinstimmung zwischen zwei Bildfenstern oder zwei Bildmerkmalen festgestellt, so kann dennoch eine fehlerhafte Zuordnung vorliegen, da die beiden durchaus nicht Abbildungen des gleichen Objektes zu sein brauchen. Dies kommt sicherlich bei der DHM Erfassung vor, da z.B. eine Abbildung eines Teils eines Feldes durchaus der Abbildung eines ganz anderen Teils des Feldes im zweiten Bild sehr ähnlich sein kann. Das heißt, die Fokussierung bei der lokalen Konsistenzfindung auf einen kleinen Bildbereich muß durch eine Konsistenzfindung über eine größere Nachbarschaft ersetzt werden. Zu dieser globalen Konsistenzfindung werden nun verschiedene Bedingungen und Annahmen aus dem Objektmodell und dem Modell der Aufnahme herangezogen. Ein Optimum zwischen der Güte der Ähnlichkeit und der Anpassung an die Objekt- und Aufnahmemodelle wird bei der globalen Konsistenzfindung meist durch iterative Verfahren erreicht. Die wesentlichen Gruppen von Verfahren werden kurz aufgeführt.

#### (a) Kleinste Quadrate Ausgleichung zur globalen Konsistenzfindung bei der Zuordnung

Das Verfahren der Kleinsten Quadrate Ausgleichung nach Grün (Grün, 1985) verbindet das Bild mit dem Objekt durch Einbeziehung der Kollinearitätsbedingungen aus dem Aufnahmemodell. Zuordnung und Schätzung der Objektkoordinaten sind somit integriert. Mit Hilfe von Mehrfachbildern und Kontrollinformationen lassen sich sogar die Orientierungsparameter der Bilder mitbestimmen.

Das Kleinste Quadrate Verfahren nach Rosenholm (Rosenholm, 1986) modelliert die globale Oberflächengeometrie im Objektraum. Hierbei gehen Glattheitsbedingungen für die globale Oberfläche in die Ausgleichung ein.

Die kleinsten Quadrate Verfahren nach Wrobel (Wrobel, 1987a,b), Ebner (Ebner, 1987), Helava (Helava, 1987, 1988a), Rauhala (Rauhala, 1988) und Zheng (Zheng, 1991) verbinden zwei oder mehrere Bilder mit einem Objektmodell. Die Parameter dieses Modells definieren eine geometrische und radiometrische Oberfläche und werden in der Ausgleichung simultan unter Einbeziehung von Glattheitsbedingungen bestimmt. Auch hier kann eine Berechnung von Orientierungsparametern integriert werden wie auch zusätzliche Modelle für den Sensor oder die Beleuchtung. Das heißt, daß in diesem Fall eine enorm große Zahl von Bedingungen und Annahmen aus dem Modell des Objekts und der Aufnahme berücksichtigt werden können.

#### (b) Robuste Ausgleichung zur globalen Konsistenzfindung bei der Zuordnung

Robuste Ausgleichungsverfahren zur globalen Konsistenzfindung werden dort eingesetzt, wo eine große Zahl von fehlerhaften Zuordnungskandidaten auftritt (z.B. Paderes, 1984; Förstner, 1986). Eine große Zahl von Kandidaten für homologe Bildmerkmalspaare wird an ein vorgegebenes Modell der Oberflächengeometrie angepaßt. Es kann dabei eine sehr hohe Zahl von Mehrfachzuordnungen und Fehlzuordnungen vorliegen. In einem iterativen Verfahren wird versucht, diese zu eliminieren. Der Erfolg hängt dabei vor allem von der Wahl einer geeigneten Funktion ab, mit der Fehlzuordnungen als Ausreißer klassifiziert werden.

#### (c) Diskrete Relaxation

**Statistische Methoden** zur diskreten Relaxation gehen von extrahierten Bildmerkmalen aus. In einer Initialisierungsphase werden Kandidaten für die Zuordnung ausgewählt und nach einem datenabhängigen Kriterium gewichtet. Unter Berücksichtigung der Nachbarschaftsinformation werden diese Gewichte iterativ solange variiert, bis eine optimale globale Balance erreicht ist. Statistische Relaxationsmethoden werden z.B. angewandt zur Zuordnung von Regionen (Price, 1987), für den PMF (Pollard Mayhew Frisby) Algorithmus (Pollard, 1985) oder auch für die merkmalsgestützte Zuordnung nach Barnard (Barnard, 1980) oder Ayache (Ayache, 1987), wie auch für das Simulated Annealing (Barnard, 1986, 1987a).

Eine weitere gebräuchliche Relaxationsmethode ist die **Methode der Dynamischen Programmierung**. Hierbei wird für den Fall der eindimensionalen Zuordnung der optimale Pfad zwischen Kandidaten für zugeordnete Bildmerkmale zweier eindimensionaler Grauwertprofile gesucht. Die extrahierten Merkmale werden der Reihenfolge nach sortiert. Jeder Pfad, der alle Bildmerkmale umfaßt, hat eine Kostenfunktion, die auf Grund von Ähnlichkeitsmaßen und globalen Bedingungen (z.B. Modell der Oberflächengeometrie) festgelegt ist. Der optimale Pfad ist der mit den geringsten Kosten. Üblicherweise wird der Viterbi Algorithmus für die Suche nach dem optimalen Pfad eingesetzt (Baker, 1981; Ohta, 1985).

oder Kölbl, 1987, 1988, 1989). Eine Anwendung des Viterbi Algorithmus auf zwei Dimensionen erfordert einen wesentlich höheren Rechen- und Speicherplatzbedarf.

#### 2.4.4 Konvergenzbereich bei iterativen Zuordnungsalgorithmen

Für iterative Zuordnungsalgorithmen gibt der Konvergenzbereich an, wie gut die Näherungswerte für einen Algorithmus sein sollten, damit Konvergenz des Verfahrens erreicht werden kann. Der Konvergenzbereich kann zwischen ein und zwei Bildelementen bei der Kleinsten Quadrate Zuordnung oder zwischen 10 und 50 Bildelementen bei einer Zuordnung von Regionen mit diskreter Relaxation liegen. Er läßt sich durch den Einsatz hierarchischer Näherungswertverfahren (2.6.2) vergrößern. Die Konvergenzgeschwindigkeit kann dadurch erhöht werden, daß zuerst eine grobe Schätzung einer kleineren Zahl von Parametern durchgeführt wird, mit anschließender Schätzung aller Parameter.

#### 2.4.5 Interne Qualitätsmaße für Bildzuordnung

Aus der Güte der Konsistenz und der Zahl der groben Abweichungen lassen sich Maße zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zuordnung ableiten, aus denen sogar Hinweise auf die externe Genauigkeit möglich sind. Bei der DHM Erfassung sind diese Qualitätsmaße ein wichtiger Gesichtspunkt, da für weitere Auswertungen die Genauigkeiten der Eingangsdaten in ein DHM bekannt sein müssen. Die digitale Bildzuordnung bietet die Möglichkeit, sogar punktweise Genauigkeitsangaben herzuleiten.

Die Art und Güte des **Genauigkeitsmaßes** ist wesentlich abhängig von der Wahl der Bildobjekte zur Zuordnung und der Art der Konsistenzfindung. Bei Verfahren, die ein Ähnlichkeitsmaß maximieren, wird häufig der resultierende Wert angegeben, wie z.B. der Korrelationskoeffizient, der, sofern die Abweichungen vom Modell der Oberfläche nicht zu groß sind, für gute Zuordnungen zwischen 0.7 und 1.0 liegt. Die Kleinsten Quadrate Methoden haben den Vorteil, daß bei der Ausgleichung auch eine Schätzung der Genauigkeit der Parameter erfolgt, und damit direkt die Genauigkeit einer Parallaxe in Form einer Standardabweichung angegeben werden kann.

Neben der Genauigkeit ist vor allem die **Zuverlässigkeit** wichtig, d.h. wie sicher Ausreißer in den Messungen erkannt werden können. Angaben über die Zuverlässigkeit lassen sich entweder durch Nachbarschaftsinformation allein oder durch Einbeziehung von Mehrbildinformation in die Zuordnung erhalten.

### 2.5 Objektbeschreibung

Das Ergebnis des Zuordnungsalgorithmus (2.4) sind Objektkoordinaten, Parallaxen oder Transformationsparameter zwischen den Bildern oder Bildobjekten. Zusammen mit Qualitätsmaßen der Zuordnung wird aus diesen die geometrische Beschreibung des Objektes, bzw. der Objektoberfläche in Form von Punkten, Bruchlinien oder Flächenparametern abgeleitet. Dabei werden entweder direkt die Ergebnisse der Zuordnung benützt oder es erfolgt ein anschließender Interpolationsschritt zwischen zugeordneten Punkten.

#### 2.5.1 Resultate der Zuordnung

Ausgehend von der Vorstellung von körperhaften, geometrisch stabilen Objekten, leiten die Zuordnungsverfahren die Oberfläche durch Punkte ab, die zu jedem  $x,y$ -Wertepaar einen  $z$ -Wert besitzen, verbunden mit eventuellen Qualitätsmaßen. Dies steht in Analogie zur menschlichen Messung, wobei Punkte durch stereoskopische Zuordnung und Bestimmung der Strahlenschnitte gemessen werden. In Ergänzung zu der punktuellen Beschreibung ist in Abhängigkeit von der Auswahl der Bildmerkmale zur Zuordnung (2.2) eine Beschreibung einer Objektoberfläche in Form von Liniensegmenten (Ayache, 1987), Regionen (Price, 1987), etc. verbreitet. Diskontinuitäten der Oberfläche werden, sofern sie erkannt sind, als Bruchkanten dargestellt (Li,M.,1989; Olsen, 1986).

Neben Positionsinformation bietet die digitale Zuordnung weitere Parameter an, die durch das menschliche Stereosehen nicht direkt zu erhalten sind. Neigungsparameter der Oberflächen können im Prozeß direkt bestimmt werden und nicht

nur durch nachträgliche Verknüpfung von Punktmessungen. Quantitative Informationen über die Homogenität oder Textur einer Oberfläche stehen der qualitativen (subjektiven) Beschreibung des Bearbeiters gegenüber. Information dieser Art können für eine detaillierte Oberflächenbeschreibung im Rahmen eines digitalen Oberflächenmodells oder für weitergehende Verfahren der Bildanalyse genutzt werden.

### **2.5.2 Ableitung einer gewünschten Objektbeschreibung**

Je nach Aufgabenstellung wird eine bestimmte Art der Beschreibung des Objekts als Ziel vorgegeben. So z.B. die Eckpunkte eines quaderförmigen Werkstücks, eines Hauses, oder eine punktförmige Oberflächenbeschreibung des Geländes. Für ein DHM kann z.B. eine dichte, gitterartige Struktur der Punktverteilung auf der Geländeoberfläche erwünscht sein.

Einige Zuordnungsverfahren übernehmen diese Vorgaben in die Kontrollstrategie (2.6) und wählen danach die Bildobjekte zur Zuordnung (2.2) oder die explizite Oberflächenmodellierung für lokale und globale Konsistenzbestimmung (2.4) und damit die Verteilung der zugeordneten Bildfenster bzw. Bildmerkmale aus.

Einige Zuordnungsverfahren liefern als Ergebnis der Konsistenzfindung zur Zuordnung direkt ein sehr dichtes Punkt- bzw. Parallaxenfeld, so z.B. Simulated Annealing (Barnard, 1986, 1987a) oder Kleinste Quadrate Verfahren mit pixelweiser Zuordnung. Andere Zuordnungsverfahren geben die Punktdichte im Objektraum explizit vor, so z.B. die Kleinste Quadrate Zuordnung nach Rosenholm (Rosenholm, 1986) oder die Kleinste Quadrate Verfahren im Objektraum (z.B. Wrobel, 1987a,b; Ebner, 1987; etc.) und sind in der Lage, auch strukturschwache Gebiete durch ein gleichmäßiges Punktgitter zu repräsentieren.

Ist das Zuordnungsverfahren selbst nicht in der Lage, die gewünschte Punktverteilung zu liefern, so kann dies durch Nachbearbeitung, d.h. durch Interpolation erreicht werden. Dies gilt insbesondere für die merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren, die auf der Basis von Merkmalen vom Typ „Kantenelement“ oder Typ „Linie“ (2.2.2) arbeiten, die keine Information in homogenen Gebieten liefern, sondern nur entlang der Grenzlinien zwischen homogenen Gebieten. Dadurch sind hohe Anforderungen an das Objektmodell zu stellen, um eine ausreichend genaue Interpolation zu ermöglichen. Die Interpolation kann unterstützt werden, wenn diese Verfahren mit rasterorientierter Zuordnung oder merkmalsgestützter Zuordnung von Regionen verknüpft werden. Verdecken sich Teile des Objektes wie im Falle der Äste eines Baumes, so reicht eine einfache Oberflächenbeschreibung allein nicht aus. In diesem Fall muß das Objektmodell auf mehrfache Oberflächen erweitert werden.

Im Hinblick auf Eignung zur DHM Erfassung sind Zuordnungsverfahren besonders interessant, die eine vorgegebene starre Gitterstruktur an die Gegebenheiten der Geländeoberfläche anpassen können, dabei sei in erster Linie an eine Punktverdichtung gedacht. Es sind solche Zuordnungsverfahren, die Bildobjekte zur Zuordnung in Abhängigkeit von der Form und Bewegtheit der Oberfläche auswählen. Bei größeren Krümmungen der Oberfläche werden wesentlich mehr Zuordnungen zur genauen Repräsentation der Oberfläche erforderlich. Vielfach werden zur Zuordnung Punktmerkmale verwendet, die von Interestoperatoren in einem oder beiden Bildern ausgewählt werden. Dieses Vorgehen weist starke Ähnlichkeit mit der Methode des „Progressive Sampling“ in der klassischen DHM Messung auf.

## **2.6 Kontrollstrategie für die Steuerung der Zuordnung**

Die Anpassungsfähigkeit eines Zuordnungsverfahrens an neue Bilddaten, Objekttypen und Aufgabenstellungen wird wesentlich davon beeinflusst, wie geänderte Gegebenheiten an die Zuordnung weitervermittelt und dort entsprechend umgesetzt werden. Dies ist Aufgabe einer sogenannten Kontrollstrategie. Da man bei der DHM Erfassung mit ständig wechselnden Bildinhalten, Bildmaßstäben, unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit für unterschiedliche Anwendungen zu rechnen hat, ist dieses Klassifizierungskriterium zur Bildzuordnung von ganz erheblicher Bedeutung zur Überprüfung eines Zuordnungsverfahrens hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit.

Für eine praktische Anwendung ist die Zuordnung ein Werkzeug, das in einen größeren Rahmen eingebunden ist, in dem üblicherweise an höchster, bestimmender Stelle der Bearbeiter steht. Der Bearbeiter gibt die Aufgabenstellung vor, sowie

üblicherweise eine Strategie zur Erfüllung dieser Aufgabe und Kriterien zur abschließenden Beurteilung der Zuordnung. Im Falle einer automatisierten DHM Erfassung kann die Aufgabe also eine Bestimmung der Geländeoberfläche unter Anwendung eines Zuordnungsverfahrens und einer speziellen Meßstrategie, z.B. der Messung an vorgegebenen Gitterpunkten im Gelände, sowie eine geforderte Genauigkeit der Objektpunkte sein. Wie diese Aufgabenstellung nun in Vorgaben, Steuerparameter usw. an das Zuordnungsverfahren umgesetzt wird, ist Aufgabe einer Kontrollstrategie. Diese verknüpft die Wahl der Bildobjekte zur Zuordnung (2.2), den Zuordnungsalgorithmus (2.4), sowie den gewünschten Typ der Objektbeschreibung (2.5) untereinander und mit der Aufgabenstellung.

Die Auswahl von Bildfenstergrößen, von Merkmalstyp, Schwellwerten zur Güte von Merkmalen usw. gehen dem eigentlichen Zuordnungsalgorithmus voraus. Die Parameter zu deren Steuerung müssen vorgegeben werden, oder es muß beschrieben sein, wie solche Parameter aus dem Datenmaterial selbst abgeleitet werden können.

Viele Zuordnungsalgorithmen brauchen gute Näherungswerte für die Zuordnung. Im einfachsten Fall mag es reichen, wenn der Überlappungsgrad zweier Stereobilder näherungsweise bekannt ist. Solche Informationen kommen normalerweise vom Bearbeiter. Einige Zuordnungsverfahren benötigen darüberhinaus jedoch Näherungswerte für die x-Parallaxe zwischen homologen Punkten im Bereich von einigen Pixeln. Da diese Näherungswerte von Punkt zu Punkt im Bild verschieden sind, ist es nicht sinnvoll, diese durch den Bearbeiter einzugeben. Dies soll vielmehr durch entsprechende Verarbeitungsstufen bei der Zuordnung erreicht werden, so z.B. durch eine einleitende, wenig präzise Grobzuordnung, auf die dann eine präzise Feinzuordnung aufgesetzt wird. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, um Näherungswerte für die Zuordnung zu beschaffen, wovon einige im folgenden aufgeführt sind.

Der Zuordnungsalgorithmus liefert als Ergebnis einer rasterorientierten oder merkmalsgestützten Zuordnung zugeordnete Punkte, zugeordnete Linien oder andere Strukturen (2.4, 2.5). Diese Ergebnisse liegen mit einer bestimmten Genauigkeit vor und grobe Fehler sind dabei nicht auszuschließen, da alle internen Selbstdiagnosekriterien eines Zuordnungsverfahrens u.U. nicht genügend Hinweise zu ihrer Erkennung und Beurteilung geben können. Dies bedeutet, daß externe Maßnahmen erforderlich sind, die das Resultat beurteilen und eventuelle Verbesserungsmaßnahmen in Gang setzen. Üblicherweise trifft der Bearbeiter solche Entscheidungen, indem er vorab Verhaltensweisen für Problemfälle vorgibt, oder indem er vom Programm auf Problemstellen hingewiesen wird und selbst von Fall zu Fall unterschiedliche Korrekturen vornimmt.

Die wesentlichen Aufgaben der Kontrollstrategie sind somit die Bereitstellung von Steuerparametern für den Zuordnungsalgorithmus, die Steuerung der Näherungswertbestimmung und die Steuerung von Aktionen und Reaktionen der Selbstdiagnose. Zur Erfüllung dieser Aufgaben sind Entscheidungen über den Zeitpunkt und das interaktive Eingreifen des Bearbeiters zu treffen, Algorithmen müssen ausgewählt und Steuerparameter und Schwellwerte bereitgestellt werden.

### **2.6.1 Bereitstellung von Steuerparametern für die Zuordnung**

Die Aufgabenstellung und das Datenmaterial beeinflussen die Wahl von Fenstergrößen, von geeigneten Bildobjekten zur Zuordnung, von Segmentationstoleranzen und von Art und Weise der Näherungswertbestimmung etc. Die Werte dieser Steuerparameter für die Zuordnung werden mangels geeigneter Modelle vielfach nach empirischen Erfahrungen und nicht auf Grund theoretischer Überlegungen festgelegt.

Bei der Zuordnung selbst ist bei einigen Verfahren (z.B. Kleinste Quadrate Zuordnung) eine Beeinflussung während der Konsistenzfindung möglich. So werden Parameter auf Signifikanz analysiert und von der weiteren Schätzung ausgenommen, wenn sie nicht signifikant sind, was eine wesentliche Einsparung in der Rechenzeit bedeutet. Die Modellanpassung bei der lokalen Konsistenz wird erleichtert durch eine variable Fenstergröße. Kleinere Fenstergrößen reduzieren die Modellabweichungen bei der Zuordnung. Eine Anpassung der Punktdichte an die Oberflächenrauigkeit bedeutet eine Abweichung vom starren, gleichmäßigen Hierachieschema und erlaubt somit eine detailliertere, genauere Objektbeschreibung.

### **2.6.2 Methoden der Näherungswertbestimmung für den Zuordnungsalgorithmus**

Aus Vorwissen, wie Orientierungsdaten, Bildüberlappung, Maßstab etc., das vom Bearbeiter eingegeben wird, werden grobe Näherungswerte für die Zuordnung der Bilder oder die Transformationsparameter zur Ableitung der Normalbilder berechnet. Einige Zuordnungsverfahren sind in der Lage, die Parameter der relativen Orientierung zweier Stereobilder selbst zu bestimmen (Hannah, 1988), andere benötigen die Mithilfe des Operateurs.

Für die automatische Näherungswertbestimmung während der Zuordnung werden Hierarchien der verschiedensten Art verwandt, so etwa eine Hierarchie in der Bildauflösung (z.B. Bildpyramiden), eine Merkmalshierarchie oder eine Hierarchie in der Punktdichte. Alle diese Methoden können untereinander verbunden oder vermischt auftreten. Sie können auch mit einer Interaktion durch den Menschen (vor allem Eingabe von Startwerten) oder mit den verschiedensten Prädiktionsverfahren verknüpft sein. Die Zuordnung erfolgt also in verschiedenen Stufen, meist von grober nach feiner Auflösung, wodurch der Suchraum nach möglichen Zuordnungen reduziert wird und Lösungen für das Vieldeutigkeitsproblem, z.B. bei sich wiederholenden periodischen Strukturen ermöglicht werden.

Als Resultat der Näherungswertbestimmung werden geometrische, radiometrische oder sonstige Informationen an eine nachfolgende Feinzuordnung weitergegeben. Geometrische Daten sind z.B. Näherungskoordinaten, Näherungswerte für Transformationsparameter oder Neigungsparameter. Radiometrische Informationen sind z.B. Näherungswerte für Helligkeits- und Kontrastunterschiede. Sonstige Informationen können z.B. die in der letzten Grobzuordnung erfolgreich angewandten Fenstergrößen, Schwellwerte oder Prädiktionsschritte beinhalten.

#### **Näherungswerte für die Zuordnung durch den Bearbeiter**

Der Bearbeiter als die oberste Entscheidungsinstanz der Kontrollstrategie gibt in vielen Fällen ein oder mehrere Startpunkte für die Zuordnung interaktiv vor. Diese Einschränkung hinsichtlich einer Automation kann in vielen Fällen hingenommen werden, sofern sich der Einsatz auf eine Zuordnung zu Beginn eines ganzen Meßprozesses beschränkt, d.h. daß daraus für alle weiteren Zuordnungen die Näherungswerte automatisch bestimmt werden.

Mit einer Orientierung der Stereobilder durch den Bearbeiter wird explizit vorgegeben, daß es sich um homologe Bildpaare handelt, die einen gewissen Überlappungsbereich haben, womit bereits maximale Parallaxen festgelegt sind. Durch die Wahl epipolarer Bilder für die Zuordnung gibt der Bearbeiter eine weitere wesentliche Einschränkung des Suchraums für die Zuordnungen vor.

#### **Näherungswerte für die Zuordnung aus einer Hierarchie in der Auflösung**

Näherungswerte für den Zuordnungsalgorithmus können auch aus einer Hierarchie in der Auflösung gewonnen werden. Ausgegangen wird von einem Satz von Bildern, die aus dem Originalbild durch Filterung mit unterschiedlichen Filtergrößen abgeleitet werden. In grober Auflösung verschwinden somit Details, und markante Strukturen sind leichter zu detektieren, aber weniger genau zu lokalisieren. Dies geschieht dann in feiner Auflösung. Eine hierarchische Zuordnung erfolgt üblicherweise von grober nach feiner Auflösung verbunden mit der Möglichkeit, zu Kontrollzwecken die Reihenfolge umzukehren.

Die verschiedenen Stufen der Auflösungshierarchie haben entweder Originalgröße oder werden in Pyramidenform repräsentiert, wobei mit gröberer Auflösung die Bildgröße abnimmt und Feinstrukturen verschwinden. Zu beachten ist, daß bei ungeeigneter Filterwahl virtuelle Strukturen erzeugt werden, die im Bild nicht vorkommen, sondern allein durch das Filter bedingt sind. Der Übergang zur nächsten Stufe der Hierarchie wird nach einfachen Modellen realisiert, die sich im wesentlichen auf die Modelle zur Aufnahme und Objektobjektfläche (2.3) stützen.

Moravec (Moravec, 1977) verwendet Auflösungshierarchie, um diskrete, punktartige Merkmale zuzuordnen. Grimson (Grimson, 1985) ordnet Kantenelemente zwischen Hierarchien von bandpassgefilterten Bildern zu. Witkin (Witkin, 1987) minimalisiert eine Energiefunktion durch den kontinuierlichen Maßstabsraum (engl. „scale space“). Lindeberg (Lindeberg, 1991) sucht nach signifikanten Regionen im Maßstabsraum, um eine grobe Zuordnung zu ermöglichen.

### **Näherungswerte für die Zuordnung aus einer Hierarchie von Bildmerkmalen oder Bildfenstern**

Eine hierarchische Zuordnung ist auch bei der merkmalsgestützten Zuordnung möglich. Hierarchie bedeutet dabei eine Sortierung nach der Art und Größe von Bildmerkmalen. Die Stufen der Hierarchie sind Merkmale unterschiedlicher Komplexität, gleichartige Merkmale unterschiedlicher Abstraktion oder Auflösung oder Kombinationen von Merkmalen. Der Übergang von einer Hierarchiestufe zur nächsten bedarf komplexer Modellvorstellungen, die vielfach empirisch festgelegt werden.

Werden unterschiedliche Typen von Bildobjekten zur Zuordnung verwendet, bedeutet dies eine Kombination von Zuordnungsalgorithmen (rasterorientiert/merkmalsgestützt), wobei komplexere Merkmale üblicherweise zur Grobzuordnung dienen. Ein Beispiel für eine Kombination verschiedenartiger Merkmale ist die Grobzuordnung von Regionen, gefolgt von einer Zuordnung von Liniensegmenten und anschließender rasterorientierter Feinzuordnung von kleinen Bildfenstern. Merkmale, die direkt voneinander abgeleitet sind, wie z.B. Polygone aus Kantenelementen, können in gleicher Weise zugeordnet sein. Ausgehend vom globalen, komplexen Merkmal vom Typ „Polygon aus geraden Liniensegmenten“ wird eine grobe Zuordnung vorgenommen, die über die Zuordnung von Liniensegmenten und die Zuordnung von Kantenelementen bis in den Subpixelbereich verfeinert wird.

Auch unterschiedliche Schwellwerte in der Merkmalsextraktion erzeugen unterschiedliche räumliche Auflösung. Eine Kontur kann durch einen Polygonzug aus vielen Segmenten approximiert sein. Durch eine entsprechende Wahl der Toleranzparameter läßt sich der Abstraktionsgrad so erhöhen, daß ein Polygonzug aus wenigen Segmenten die Kontur nur noch grob annähert. Auch hier kann dann eine Zuordnung des groben Polygonzugs die erforderlichen Näherungswerte für eine Feinzuordnung liefern.

Die Größe des betrachteten Fensters bei rasterorientierter Zuordnung gehört ebenfalls in diese Kategorie. Durch größere Fenster können größere, auch strukturschwache Gebiete überbrückt werden, allerdings verbunden mit eventuellen größeren Abweichungen vom lokalen Oberflächenmodell. Die resultierenden größeren Transformationsparameter können als Näherungswerte für die Feinzuordnung mit kleineren Fenstern dienen, die eine bessere Anpassung an die lokale Geometrie erlauben.

### **Näherungswerte für die Zuordnung aus einer Hierarchie der Punktdichte (Multigrid Methoden)**

Auch Hierarchien in der Punktdichte sind geeignet für eine hierarchische Zuordnung. Solche „Multigrid Methoden“ bedeuten eine hierarchische Struktur in den betrachteten Punkten. Wie bei der Hierarchie in der Auflösung werden einfache Modelle für den Übergang von einer Hierarchiestufe zur nächsten eingesetzt.

Ausgehend von „guten“ Ausgangsbildobjekten (Bildfenster/Bildmerkmale) wird eine erste Zuordnung vorgenommen (engl. „best first“). An diesen Punkten (Ankerpunkte) werden dann weitere Zuordnungen aufgehängt. Der Nachteil dieser Methode ist, daß sich gute Punkte oft auf wenige Stellen konzentrieren und somit die globale, flächendeckende Zuordnung nicht wesentlich unterstützt wird. Um eine homogenere Verteilung zu erreichen, wird die Punktverteilung nach einem vorgegebenen Schema weiter verdichtet. Die Ankerpunkte sitzen auf den Knotenpunkten eines Gitters, das regelmäßig verdichtet wird (Li, M., 1989), oder es werden gute Punkte in regelmäßig verdichteten Teilbildern ausgewählt (Hannah, 1988). Die letztere Methode hat den Vorteil, daß nur dort gemessen wird, wo auch Information vorhanden ist. Bei einer dritten Methode werden viele Punkte zugeordnet und anschließend lokal die besten ausgesucht (Hahn, 1988).

### **Prädiktion von benachbarten Zuordnungen auf einer Auflösungsebene**

Ausgehend von Nachbarschaftsinformation werden die Näherungswerte für die nächste Zuordnung festgelegt. Das Modell für die Prädiktion ist eng mit dem Oberflächenmodell verbunden. Als Ausgangspunkt können Startpunkte dienen, die vom Bearbeiter vorgegeben sind, oder bereits zugeordnete Punkte. Im letzteren Fall wird häufig ein gitterartiges Schema verwendet, um in zwei Richtungen Prädiktionswerte zu liefern (Norvelle, 1981). Variable Schrittweiten hingegen erlauben eine bessere Anpassung an eine stark variierende Oberflächengeometrie.

### 2.6.3 Selbstdiagnose der Zuordnung

Eine Liste von Punkten mit ihren Koordinaten als Ergebnis einer Zuordnung ist für sich allein wenig aussagend. Gefragt sind zusätzliche Informationen über die Güte dieser Angaben, Aussagen über mögliche Ursachen von Fehlzuordnungen und Initiativen für Korrekturen. In einer Selbstdiagnose der Zuordnung sollen diese Informationen bereitgestellt werden. Dies bedeutet, daß diese Informationen vom Zuordnungsverfahren selbst unter Ausschluß des Bearbeiters bereitgestellt werden. Selbstdiagnose ist nicht auf den Abschluß der Zuordnung beschränkt, sondern schon während der Zuordnung möglich.

#### Beurteilung der internen Qualität der Zuordnung

Zur Beurteilung der internen Qualität der Zuordnung dienen Maße zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Diese sind entweder qualitativ oder quantitativ gegeben und resultieren direkt aus dem Zuordnungsalgorithmus, in Form von internen Qualitätsmaßen (2.4.5) oder aus einer Nachbetrachtung unter Einbeziehung von Nachbarschaftsinformation.

Die Voraussetzung für aussagekräftige quantitative Angaben ist eine theoretische Fundierung der Qualitätsmaße. In einigen Zuordnungsverfahren werden Genauigkeitsmaße in der Parameterbestimmung geschätzt. Beispiele hierfür sind der Korrelationskoeffizient bei der Kreuzkorrelation oder die Kovarianzmatrix bei der Kleinsten Quadrate Zuordnung (2.4.5). Bei Störungen durch grobe Fehler oder durch Nicht-Griffigkeit des Modells ist der  $\sigma_0$  Wert der Kleinsten Quadrate Zuordnung ein zuverlässiger Indikator. Bei der Zuordnung von komplexeren Bildmerkmalen (z.B. vom Typ „Gerades Liniensegment“) ist für eine Genauigkeitsbeurteilung der Zuordnung die Fehlerfortpflanzung von der Auswahl der Bildobjekte bis zu den berechneten Parametern (z.B. Parallaxe) erforderlich, was in vielen Fällen nicht berücksichtigt wird. Besonders bei diesen Zuordnungsverfahren wird deutlich, welche Bedeutung die Interpretierbarkeit der Qualitätsmaße hat. Die Kantenstärke ist als Gütekriterium für die Auswahl von Kantenelementen geeignet, aber nicht als Genauigkeitsmaß für eine Parallaxe. Zuverlässigkeitsangaben lassen sich aus der Zahl von Ausreißern ermitteln unter Berücksichtigung von Nachbarschaftsinformation und gestützt durch Modellannahmen und Bedingungen. Ein Beispiel hierfür ist die Kontrolle von restlichen  $y$ -Parallaxen bei der Zuordnung von Epipolarbildern (Straub, 1987).

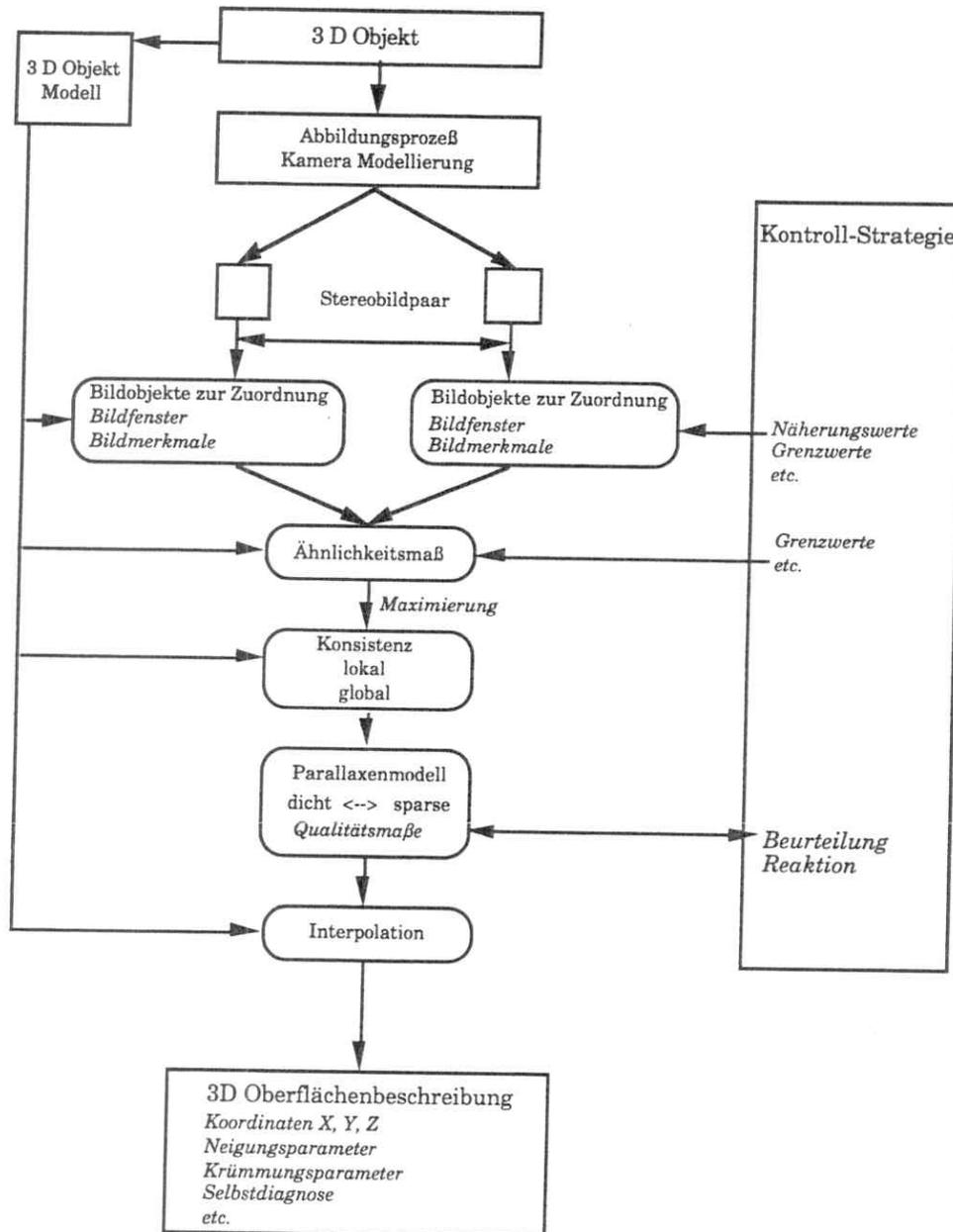
Qualitative Aussagen sind durch Schwellwertbildung aus quantitativen Angaben zu erhalten. Beispiele sind „genaue/ungenau Zuordnung“ oder „wenige/viele Punkte“. Sie sind eher mit subjektiven Aussagen des Bearbeiters in Beziehung zu setzen, also objektiv gesehen nicht so aussagekräftig, aber für Vergleiche durchaus geeignet.

#### Reaktion auf fehlerhafte oder schlechte Zuordnung

Ist das Zuordnungsverfahren in der Lage, die Qualitätsmaße selbst zu beurteilen und zu interpretieren, d.h. Fehler oder Mängel zu erkennen, so können nachfolgende Reaktionen eingeleitet werden, die das Ergebnis verbessern. Eine Wiederholung der Zuordnung unter Einsatz geänderter Schwellwerte oder Näherungswerte ist eine Möglichkeit. Der Ausschluß von Punkten aus der endgültigen Punktliste nach vorgegebenen Toleranzen aus der Aufgabenstellung eine andere. Beispiele für eine Selbstdiagnose und Reaktionen während des Zuordnungsprozesses sind in (Hannah, 1988) zu finden. Meistens wird trotzdem auf die Interaktion des Bearbeiters zurückgegriffen, der zur abschließenden Nachmessung von Punkten oder der Edition der Ergebnisliste aufgerufen wird.

Zusammenfassend läßt sich nun ein Überblick über den Einsatz der Kontrollstrategie zur Steuerung der Zuordnung darstellen (siehe Abbildung 2.10). Wenn hierarchische Methoden benutzt werden, erfolgen Iterationsschritte, die in dieser Abbildung nicht enthalten sind. Damit wird der Ring von den Bildobjekten über die Art und Weise der Zuordnung sowie deren Steuerung bis hin zum Ergebnis der Oberflächenbeschreibung geschlossen. Es sind Anleitungen gegeben, nach denen ein Bildzuordnungsverfahren in Grundbestandteile seziiert und untersucht werden kann. Dieses Rüstzeug wird im nachfolgenden empirischen Test verwendet, um Verfahren zu klassifizieren und zu vergleichen.

Rückblickend bleibt festzustellen, daß eine große Vielfalt von Verfahren und Kriterien zur Zuordnung existieren, daß auch vielfältige Möglichkeiten zur Kombination von Bildzuordnungsverfahren gegeben sind, die eine hohe Anpassungsfähigkeit an Aufgaben und Objekte erlauben. Andererseits stehen bei gewissen Anwendungen bestimmte Verfahren der Zuordnung im Vordergrund. Bezüglich der DHM Erfassung sind das vor allem Kleinste Quadrate Methoden und die Zuordnung von Punktmerkmalen, die in den beiden folgenden Abschnitten näher dargestellt werden.



**Abbildung 2.10** Kontrollstrategie zur Steuerung einzelner Grundbestandteile eines Bildzuordnungsverfahrens zur Ableitung einer 3D-Oberflächenbeschreibung aus Stereoaufnahmen eines Objekts.

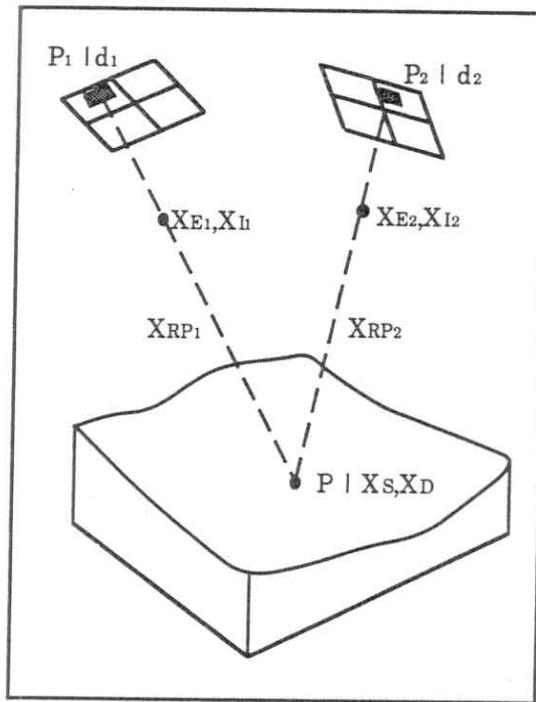
## 2.7 Kleinste Quadrate Zuordnung (LSM)

Unter den Methoden der rasterorientierten Bildzuordnung hat die Kleinste Quadrate Zuordnung besondere Bedeutung erlangt. Das Verfahren wurde durch Entwicklungen am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart bekannt (Ackermann, 1983), hatte aber Vorläufer. Diese spezielle Entwicklung wird im folgenden als LSM (Least Squares Matching) Methode bezeichnet. Dieses Verfahren ist neben dem in Kapitel 2.8 vorgestellten Verfahren (FBM) zur merkmalsgestützten Zuordnung von besonderer Bedeutung für das Pilotsystem zur DHM Generierung in Kapitel 5, da aus diesen beiden Verfahren die automatischen Meßmodule gebildet sind.

Im folgenden wird das Prinzip der LSM Methode, ausgehend von der anschaulichen Darstellung im eindimensionalen Fall, für die zweidimensionale Zuordnung entwickelt. Dann werden die in den vorausgehenden Abschnitten diskutierten Eigenschaften von Bildzuordnungsverfahren exemplarisch für dieses Verfahren dargestellt. Abschließend wird der Bezug zu anderen Zuordnungsverfahren, die ebenfalls auf der Kleinsten Quadrate Methode beruhen, hergestellt.

### 2.7.1 Ausgangssituation

Die Methoden der Kleinsten Quadrate Zuordnung basieren auf Bildfenstern, also auf rasterorientierter Information. Die Grundlage ist das Bildsignal selbst, beziehungsweise eine vorverarbeitete, gefilterte Version. Der Bezug zwischen dem Bildpaar und der Objektoberfläche wird sehr allgemein wie folgt modelliert (siehe Abbildung 2.11). Beobachtet werden die Dichtewerte ( $d_i$ ) in den Bildpaaren. Als zu bestimmende Unbekannte können die Parameter der geometrischen Oberfläche ( $x_S$ ), der Reflexion der Oberfläche ( $x_D$ ), der radiometrische Projektion ( $x_{RP}$ ) und der inneren ( $x_I$ ) und äußeren Orientierung ( $x_E$ ) auftreten.



**Abbildung 2.11** Bezug zwischen den Beobachtungen an Punkten in den Bildern ( $P_i$ ) und der Objektoberfläche ( $P$ ) bei der Kleinsten Quadrate Zuordnung.

Beobachtungen: Dichten (Grauwerte)  $d$

Unbekannte: Parameter der geometrischen Oberfläche  $x_S$ , der Reflexion der Oberfläche  $x_D$ , der Radiometr. Projektion  $x_{RP}$ , der Äußeren Orientierung  $x_E$ , und der Inneren Orient.  $x_I$

Die mathematische Formulierung geht von dem allgemeinen Ansatz aus

$$l + v = f(x) \quad (2-1)$$

mit Beobachtungen  $l$ , Verbesserungen  $v$  und den Unbekannten  $x$ .

Man erhält für die Grauwerte  $d$  als Beobachtungen somit den Ansatz

$$d + v = f(x_S, x_D, x_{RP}, x_E, x_I) \quad (2-2)$$

bzw. für die in den beiden Bildern gemessenen Grauwerte

$$d_1 + v_1 = f(x_S, x_D, x_{RP1}, x_{E1}, x_{I1}) \quad (2-3)$$

$$d_2 + v_2 = f(x_S, x_D, x_{RP2}, x_{E2}, x_{I2}) \quad (2-4)$$

mit  $f$  als einem allgemeinen Funktionssymbol.

Durch Substitution von

$$x_D = f(x_S, x_{RP2}, x_{E2}, x_{I2}, d_2 + v_2) \tag{2-5}$$

eliminiert man  $x_D$  und erhält schließlich

$$d_1 + v_1 = f(x_S, x_{RP1}, x_{E1}, x_{I1}, x_{RP2}, x_{E2}, x_{I2}, d_2 + v_2) \tag{2-6}$$

Die Bestimmung der unbekannt Parameter aus den gegebenen Beobachtungen wird durch eine Ausgleichung nach der Kleinsten Quadrate Methode ausgeführt. Das Ziel ist die Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen

$$\sum v v \rightarrow \min \tag{2-7}$$

### 2.7.2 Die LSM Methode im Detail

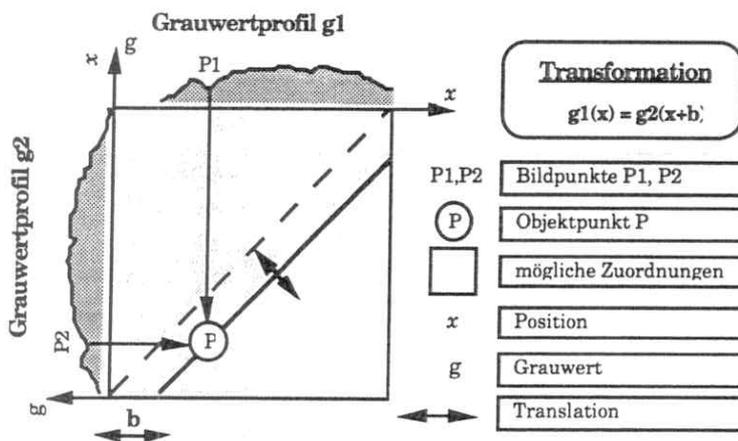
Bei der speziellen LSM Methode wird obiger Ansatz sehr vereinfacht. Alleiniges Ziel ist die Bestimmung von Parallaxen. Unbekannt ist jeweils die Parallaxe zwischen zwei homologen Punkten, mit der sich unter Verwendung der Orientierungsparameter der Oberflächenpunkt berechnen läßt.

Da sich ein einzelnes Bildelement einem anderen Bildelement ohne weitere Unterstützung nicht eindeutig zuordnen läßt, wird für die Zuordnung ein geeigneter Bildausschnitt verwendet, der eine größere Gruppe von Bildelementen umfaßt. Dieses Bildfenster repräsentiert nun nicht mehr einen einzelnen Punkt, sondern einen Teil der Oberfläche.

Dieser Teil der Oberfläche muß für die Zuordnung modelliert werden. Um Modellfehler klein zu halten wird nur mit kleinen Ausschnitten gearbeitet. Das einfachste Oberflächenmodell für eine sehr kleine Teilfläche stellt eine lokale horizontale Ebene im Objektraum dar. Es ist möglich, dies ohne Einbeziehung des Oberflächenpunktes allein durch eine Beziehung zwischen den Bildausschnitten zu beschreiben.

Geht man zur Veranschaulichung der Beziehungen vom Normalfall der Stereoaufnahme aus, so wird nur eine Verschiebung der beiden kleinen Teilbilder gegeneinander erlaubt, d.h. jedes homologe Punktepaar in zugeordneten kleinen Bildfenstern hat die gleiche Parallaxe, somit haben alle Objektpunkte die gleiche Höhe und beschreiben eine lokale horizontale Ebene im Objektraum.

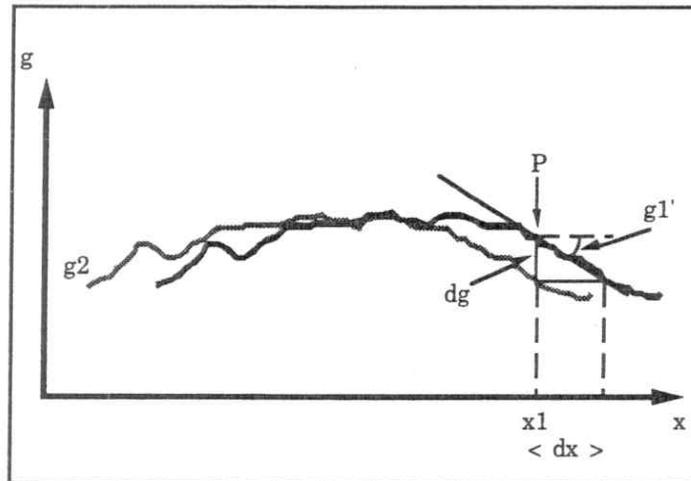
Dieses Prinzip soll nun zuerst am eindimensionalen Fall veranschaulicht werden. Gegeben sind zwei kleine Ausschnitte von Grauwert- bzw. Dichteprofilen (Abbildung 2.12), deren geometrische Beziehung zueinander durch eine Translation modelliert wird. Dies bedeutet, daß sich Objektpunkte nur in einer horizontalen Ebene befinden können, veranschaulicht durch die Gerade parallel zur Diagonalen in der Abbildung 2.12.



**Abbildung 2.12** Eindimensionale Zuordnung mit dem Oberflächenmodell „Horizontale Ebene“ und der Translation  $g_1(x) = g_2(x+b)$  zwischen den Grauwertprofilen.

Stellt man die beiden Grauwertprofile in einem einheitlichen Koordinatensystem wie in Abbildung 2.13 dar, so ist diese Translation für den Betrachter direkt zu erkennen. Das Grundprinzip der LSM Methode beruht nun darauf, aus der Grauwertdifferenz und dem Grauwertgradienten an jedem Punkt des Profils die unbekannte Verschiebung zwischen den Profilen zu schätzen. Durch die hohe Zahl von Punkten ist die Redundanz sehr hoch.

Wie in Abbildung 2.13 zu sehen ist kann aus  $\Delta g = g_1 - g_2$  und dem Gradienten  $g_1'$  der Grauwertfunktion an der Stelle  $g_1(x_1)$  die Translation  $dx$  zwischen  $g_1$  und  $g_2$  geschätzt werden.



**Abbildung 2.13** Das Grundprinzip der Kleinsten Quadrate Zuordnung zur Schätzung der unbekanntem Verschiebungsparameter aus den Grauwertdifferenzen und den Gradienten, hier am Beispiel einer Translation zwischen zwei Grauwertprofilen.

- $g_1, g_2$  Grauwertfunktionen
- $dg$  Grauwertdifferenz an Punkt P
- $g_1'$  Gradient der Grauwertfunktion  $g_1$  an diesem Punkt
- $d_x$  Unbekannte Translation (x-Parallaxe)

Nach dieser Prinzipdarstellung sollen nun am zweidimensionalen Fall die wesentlichen Schritte rekapituliert werden. Ausgegangen wird anstelle von Grauwertprofilen von zweidimensionalen Grauwertfunktionen. Die diskretisierten unbekanntem Grauwertfunktionen  $g_i$  liegen für jedes Bildelement der Muster-(1) und der Suchmatrix (2) vor. Die Diskretisierung ist einerseits das Ergebnis einer Quantisierung des Dichtewertes, üblicherweise im 8 Bit Format, und andererseits eine räumliche Diskretisierung durch die Sensorelemente, die nun als Bildelemente  $(x^i, y^i)$  auftreten

$$g_1 = g_1(x^1, y^1) \tag{2-8}$$

$$g_2 = g_2(x^2, y^2) \tag{2-9}$$

Bei der Diskretisierung erfolgt eine Verrauschung dieser Dichtefunktionen. Das Rauschen wird als weißes Rauschen angenommen

$$n_1 = n_1(x^1, y^1) \tag{2-10}$$

$$n_2 = n_2(x^2, y^2) \tag{2-11}$$

Die beobachteten Grauwerte  $G$  für Muster- und Suchmatrix setzen sich dann wie folgt zusammen

$$G_1 = g_1 + n_1 \tag{2-12}$$

$$G_2 = g_2 + n_2 \tag{2-13}$$

Das Modell für die geometrische Transformation zwischen den beiden (lokalen!) Bildausschnitten wird nun so angesetzt, daß (2) als affine Transformation von (1) dargestellt wird

$$x^2 = T_x(x^1, y^1, a_i) = a_1 + a_2x^1 + a_3y^1 \quad (2-14)$$

$$y^2 = T_y(x^1, y^1, b_i) = b_1 + b_2x^1 + b_3y^1 \quad (2-15)$$

d.h. mit 6 unbekanntem Parametern einer Affintransformation. Dies ermöglicht nicht nur die Beschreibung einer lokalen horizontalen Ebene, sondern auch einer lokalen geneigten Ebene im Objektraum.

Für eine Korrektur der radiometrischen Unterschiede wird ein linearer Ansatz mit zwei Unbekannten gewählt, der den Helligkeitsunterschied und den Kontrast modelliert:

$$T_R = T_R(r_j, g^2) \text{ mit } g^2 = r_1 + r_2g^1 \quad (2-16)$$

Unter der Annahme der radiometrischen Ähnlichkeit der beiden Bildausschnitte wird die Relation zwischen den beiden Bildern wie folgt angenommen:

$$G_1(x^1, y^1) = g_1(x^1, y^1) + n_1(x^1, y^1) = T_R(r_j, G^2) \quad (2-17)$$

durch Substitution mit

$$v(x^1, y^1) = n_1(x^1, y^1) - T_R(r_j, n_2(T_x, T_y)) \quad (2-18)$$

erhält man folgende Fehlergleichung:

$$g_1(x^1, y^1) + v(x^1, y^1) = T_R(r_j, g_2(T_x, T_y)) \quad (2-19)$$

durch Linearisierung erhält man schließlich die linearisierten Fehlergleichungen:

$$\Delta g + v = \sum_j \frac{\partial T_R}{\partial r_j} dr_j + \sum_i d_x \frac{\partial T_x}{\partial a_i} da_i + \sum_i d_y \frac{\partial T_y}{\partial b_i} db_i \quad (2-20)$$

mit den Grauwertdifferenzen  $\Delta g = G_2 - G_1 = g_1 - T_R^0$ , und den Gradienten  $g_x = \frac{\partial T_R}{\partial T_x}$  und  $g_y = \frac{\partial T_R}{\partial T_y}$ . Dabei sind  $dr_j$ ,  $da_i$  und  $db_i$  die Korrekturen für die Näherungswerte. Insgesamt liegen  $n$  Beobachtungsgleichungen ( $\Delta g$ ) vor, d.h. für jedes Bildelement der Mustermatrix. In einer iterativen Kleinsten Quadrate Ausgleichung werden die Unbekannten aus dem Normalgleichungssystem abgeleitet. Die Näherungswerte für die Verschiebung müssen dabei im Bereich von 1-2 Pixel liegen, um Konvergenz des Verfahrens zu ermöglichen. Mit Hilfe der geschätzten Varianz  $\sigma_0^2 = \sum vv / (n-8)$  mit der Redundanz  $(n-8)$ , d.h.  $n$  Beobachtungen und 8 Unbekannte, und der Inversen der Normalgleichungsmatrix erhält man interne Maße für die Genauigkeit der geschätzten Parameter. Zusätzlich kann der Korrelationskoeffizient zwischen den zugeordneten Bildausschnitten berechnet werden. Förstner hat die Abhängigkeiten der Genauigkeit einer Parallaxe für den eindimensionalen Fall hergeleitet (Förstner, 1982) unter der Annahme, daß die Gradienten in  $x$  und  $y$  Richtung gleich genau und unkorreliert sind, und erhält

$$\sigma_x = \frac{1}{n} \frac{1-\rho}{\rho} \frac{\sigma_g^2}{\sigma_{g_x}^2} \quad (2-21)$$

mit der Anzahl der Bildelemente  $n$ , dem Korrelationskoeffizienten  $\rho$  und den Varianzen der Grauwerte  $\sigma_g^2$  und der Gradienten  $\sigma_{g_x}^2$ . Durch Vergrößerung der Pixelzahl kann die Genauigkeit allerdings nicht beliebig gesteigert werden, da bei zu großer Pixelzahl das Modell einer Affintransformation zwischen den Bildern nicht mehr ausreichend genau ist.

Die Größe der Mustermatrix wird in Kapitel 5 zu 16x16 Bildelementen gewählt, die Größe der Suchmatrix liegt darüber und hängt im übrigen von den zu erwartenden Translations- und Rotationsparametern ab. Aus den Parametern der geometrischen Transformation lassen sich für einen ausgewählten Punkt im Bildausschnitt, unter Kenntnis der Orientierung, durch Vorwärtseinschnitt die Koordinaten des Objektpunktes berechnen.

Für weitere Details, wie Untersuchungen zur Größe von Such- und Mustermatrizen, Konvergenzradien und Geschwindigkeit etc. sei auf die Literatur verwiesen.

### 2.7.3 Vereinfachung im Epipolarfall

In der DHM Erfassung erfolgt die Messung in den Epipolarlinien. Es wird angenommen, daß keine y-Parallaxen mehr vorliegen oder vernachlässigbar sind und die geometrische Beziehung zwischen den beiden Bildausschnitten nun wie folgt aussieht (vgl. hierzu 2-14/15):

$$x^2 = T_x(x^1, y^1, a_i) = a_1 + a_2x^1 + a_3y^1 \quad (2-22)$$

$$y^2 = T_y(y^1) = y^1 \quad (2-23)$$

d.h. auch hier wird von einer geeigneten Ebene im Objektraum ausgegangen. Die Zahl der geometrischen Parameter hat sich nun auf drei reduziert, was zu einer enormen Beschleunigung der Zuordnung beiträgt.

### 2.7.4 Charakterisierung der LSM Methode im Überblick

Die Charakterisierung der LSM Methode erfolgt hier in Steckbriefform (siehe Tabelle 2.9) und richtet sich nach den in den Kapiteln 2.1 bis 2.6 besprochenen Grundbestandteilen, Annahmen und Bedingungen bei Zuordnungsverfahren.

Eigenschaft	LSM (Ackermann)
Opazität der Oberfläche	Voraussetzung
Epipolarbedingung	Vorteilhaft, aber nicht Voraussetzung
Oberflächengeometrie - lokal	Geneigte Ebene im Objektraum, modelliert durch Affintransformation zwischen den Bildausschnitten
Oberflächengeometrie - global	Wird nicht betrachtet, da nur lokaler Ansatz (kleine Bildausschnitte)
Eindeutigkeit der Zuordnung	Voraussetzung
Topologische Nachbarschaft	Voraussetzung
Photometrische Ähnlichkeit	Radiometrische Modellierung von Helligkeitsunterschieden und dem Kontrast
Ähnlichkeitsmaß	Quadratsumme der Grauwertdifferenzen
Lokale Konsistenzfindung	Minimierung des Ähnlichkeitsmaßes durch Kleinste Quadrate Ausgleichung
Globale Konsistenzfindung	Wird nicht hergestellt, da nur lokal gearbeitet wird
Konvergenzbereich	≈ 2 Pixel
Qualitätsmaße	Automatische Berechnung der Varianz der Parallaxen und des Korrelationskoeffizienten
Objektbeschreibung	Parallaxe an einem ausgewählten Punkt. Zur Berechnung von Objektkoordinaten müssen die Orientierungsparameter bekannt sein
Dichte der Resultate der Zuordnung	Sparse (durch rekursive Programmierung ist auch eine pixelweise Parallaxenberechnung operationell)
Bereitstellung von Steuerparametern	Fenstergrößen, Pixelgrößen, Schwellwerte
Näherungswertbestimmung	Erforderlich
Selbstdiagnose	Automatischer Test der Qualitätsmaße gegenüber empirischen Schwellwerten

Tabelle 2.9 Steckbrief für die LSM Methode nach Ackermann.

### 2.7.5 Andere Bildzuordnungsverfahren nach der Kleinsten Quadrate Methode

Um das LSM Verfahren einzuordnen wird es mit einigen der gängigsten Verfahren der Kleinsten Quadrate Zuordnung (Wrobel, 1988) verglichen (siehe Tabelle 2.10).

Hier sind im folgenden nur die grundlegenden Veröffentlichungen aufgeführt. Derzeit beschäftigen sich sehr viel mehr als die genannten Autoren mit diesen Methoden, die sich aber mehr oder weniger alle auf die folgenden vier Grundprinzipien zurückführen lassen.

Das Verfahren nach Ackermann (Ackermann, 1983) setzt wie oben beschrieben in der Grundversion zwei kleine Bildausschnitte voraus und nimmt als Modell für die geometrische Beziehung für diese Ausschnitte eine Affintransformation an, was im Objektraum eine geneigten Ebene zuläßt. Das Verfahren arbeitet also lokal im Bildraum. Multibildlösungen sind hiermit ebenfalls möglich, wurden aber nicht ausgearbeitet.

Das Verfahren „Multi Point Matching“ nach Rosenholm (Rosenholm, 1986) arbeitet weiterhin im Bildraum, nun aber nicht mehr lokal, sondern global. Die Parallaxenfläche wird durch Lineare Finite Elemente modelliert, womit die Oberfläche sehr allgemein dargestellt werden kann. Üblicherweise wird auch hier mit der Epipolargeometrie gearbeitet, so daß nur die x-Parallaxen von Bedeutung sind.

Das Verfahren des „Geometrically Constrained Multiphoto Matching“ nach Grün (1985) bezieht den Objektraum mit ein. Als zusätzliche Zwangsbedingungen werden die Kollinearitätsbedingungen und auch die Epipolarbedingung eingesetzt. Mit Hilfe mehrere Bilder lassen sich somit sowohl die Objektkoordinaten eines Punktes als auch die Parameter der Orientierung in einem Guß bestimmen.

Verfahren nach	Ackermann	Rosenholm	Grün	Wrobel, Helava, Ebner, Rauhala, Zheng
Zuordnung	im Bildraum	im Bildraum	im Objektraum	im Objektraum
Oberfläche	lokal (gen. Ebene)	global (Parallaxen)	global	global
Übliche Anzahl Bilder	2	2	>2	>2
Übliche Anzahl Punkte	1	viele	1	viele
Schätzung der Orientierung	nein	nein	ja	ja

**Tabelle 2.10** Die vier grundlegenden Zuordnungsverfahren nach der Methode der Kleinsten Quadrate.

Das Verfahren der Kleinsten Quadrate Zuordnung im Objektraum, das von mehreren Autoren (Wrobel, 1987a,b; Helava, 1987, 1988a; Ebner, 1987; Rauhala, 1988; Zheng, 1991) vorgestellt wurde, ist das allgemeinste aller dieser Verfahren und modelliert die in 2.7.1 dargestellte Ausgangssituation am weitestgehenden. Als besonderes Merkmal erlaubt es nicht nur die Modellierung der Objektoberfläche, sondern auch die Modellierung des Reflexionsverhaltens der Oberfläche, sowie der radiometrischen Veränderungen im Strahlengang. Parameter der inneren und äußeren Orientierung können mitgeschätzt werden. Es hat sich allerdings gezeigt, daß bei üblichen Anwendungen der Parametersatz stark eingeschränkt werden muß, um akzeptable Rechenzeiten zu erhalten.

Bisher wurde nicht gezeigt, daß die letztgenannten drei Methoden für die Messung einer Parallaxe genauer sind als die Methode nach Ackermann. Insgesamt muß festgestellt werden, daß alle genannten Verfahren iterativ arbeiten und zur Linearisierung Näherungswerte benötigen, die im Bereich von 1 bis 2 Bildelementen liegen. Dies bedeutet, daß Methoden der Näherungswertbestimmung, wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, erforderlich werden. Aber auch das im folgenden Abschnitt 2.8 vorgestellte Verfahren zur merkmalsgestützten Zuordnung kann diese Aufgabe erfüllen.

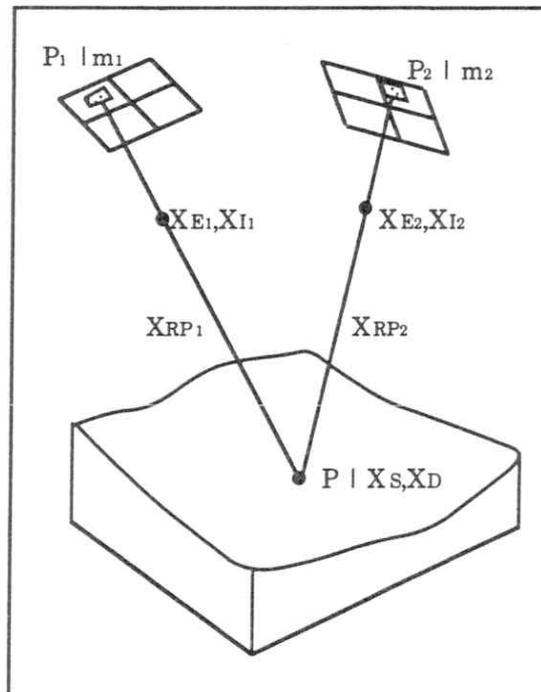
## 2.8 Merkmalsgestützte Zuordnung (FBM)

Die zweite wichtige Verfahrensklasse von Zuordnungen ist die Methode der merkmalsgestützten Zuordnung. Auch aus dieser Klasse ist ein Verfahren am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelt worden (in Paderes, 1984; Förstner, 1986), das im folgenden als FBM (Feature Based Matching) Methode bezeichnet wird und sich auf die Zuordnung von Punktmerkmalen bezieht.

Das Prinzip der FBM Methode wird hier wiederum von der anschaulichen Darstellung im eindimensionalen Fall ausgehend für die zweidimensionale Zuordnung entwickelt. Dann werden die in den vorausgehenden Abschnitten diskutierten Eigenschaften von Bildzuordnungsverfahren exemplarisch für dieses Verfahren dargestellt. Abschließend wird der Bezug zu zwei anderen merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren hergestellt, um die FBM Methode einordnen zu können.

### 2.8.1 Ausgangssituation

Die Ausgangssituation (Abbildung 2.14) ähnelt sehr stark der der LSM Methode. Gegeben sind ebenfalls zwei Bilder (1,2). Als Beobachtungen sollen nun aber Bildmerkmale in den Bildern anstelle von Bildausschnitten für die Zuordnung verwendet werden.



**Abbildung 2.14** Bezug zwischen den Beobachtungen an Punkten in den Bildern ( $P_i$ ) und der Objektoberfläche ( $P$ ) bei der merkmalsgestützten Zuordnung.

Beobachtungen: Merkmale  $m$  (z.B. interessierende Punkte)

Unbekannte: Parameter der geometrischen Oberfläche  $x_S$ , der Reflexion der Oberfläche  $x_D$ , der Radiometr. Projektion  $x_{RP}$ , der Äußerer Orientierung  $x_E$ , und der Inneren Orient.  $x_I$

Aus der Diskussion in früheren Abschnitten dieses Kapitels 2 ist klar, daß durch die Auswahl von Merkmalen oder Strukturen die Reduktion der Datenmenge im Vergleich zu Rasterdaten enorm ist und gleichzeitig die Interpretierbarkeit wesentlich erhöht wird. Die gewählte Lösung bei der FBM Methode basiert auf lokalisierbaren Punktmerkmalen in beiden Bildern ( $P_1, P_2$ ), die durch ihre Koordinaten ( $z_1, z_2$ ) und gewisse Merkmale ( $m_1, m_2$ ) repräsentiert werden.

Diese Merkmale werden üblicherweise aus einer kleinen Umgebung um einen Punkt berechnet (z.B. aus einem Fenster von 5x5 Bildelementen). Für homologe Punktmerkmale wird folgende Beziehung angesetzt:

$$z_2 = T(z_1; a_i) \quad (2-24)$$

mit der Abbildungsfunktion (T) und ihren unbekanntem Parametern ( $a_i$ ).

Auch hier wird die Oberfläche des Objekts nicht explizit miteinbezogen. Das Ziel ist allein die Schätzung der Abbildungsfunktion zwischen den Bildern und die Bestimmung von Parallaxen homologer Punktmerkmale.

### 2.8.2 Die FBM Methode im Detail

Die FBM Methode ist also wie auch schon die LSM Methode eine Zuordnung von Bild zu Bild. Waren es dort für den eindimensionalen Fall zwei diskretisierte Grauwertprofile, so werden nun ausgewählte Punktmerkmale im linken und rechten Profil zugeordnet. Abbildung 2.15a zeigt zwei Grauwertprofile mit den nach bestimmten Kriterien ausgewählten Punkten.

Das in Abbildung 2.15b dargestellte Ergebnis einer Zuordnung wird in drei Schritten erzielt, die nun am Beispiel der zweidimensionalen Zuordnung erläutert werden.

#### Schritt 1: Selektion von interessierenden Punkten (Interestoperator) bei der FBM Methode

Der erste Schritt der FBM Zuordnung umfaßt die Auswahl geeigneter Punktmerkmale mit einem Interestoperator in jedem Bild. Ein Kriterium für die Eignung von Punktmerkmalen einer Grauwertfläche ist bei dem verwendeten Förstner-Interestoperator die erwartete Genauigkeit der Zuordnung dieses Punktmerkmals. Diese läßt sich aus der Information eines Bildes berechnen, d.h. sie wird getrennt für jedes Bild ausgeführt.

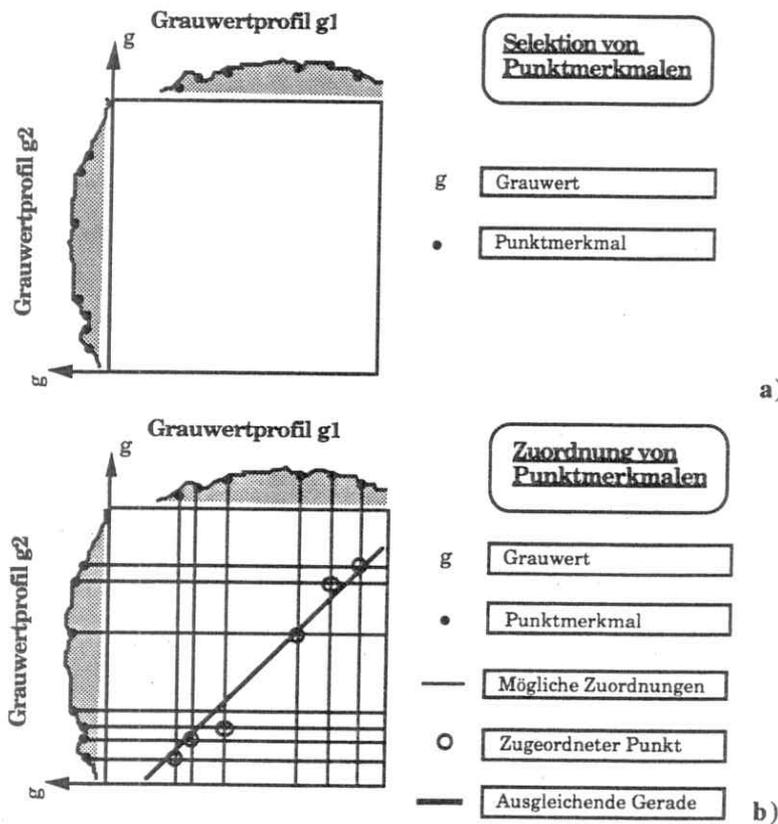
Grundlage ist die Normalgleichungsmatrix N (2-25), deren Koeffizienten aus den Gradienten in x- ( $g_x$ ) und y-Richtung ( $g_y$ ) über alle Bildelemente im Fenster des Interestoperators berechnet werden. Dieses wird über alle Bildelemente verschoben. Zur Berechnung der optimalen Fenstermitten werden aus den Eigenwerten der Inversen der Normalgleichungsmatrix ( $Q = N^{-1}$ ) das Maß q (2-26) für jedes Bildelement berechnet.

$$N = \begin{bmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y \\ \sum g_y g_x & \sum g_y^2 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

$$q = 1 - \frac{[\lambda_1 - \lambda_2]}{[\lambda_1 + \lambda_2]} = \frac{4 \det(N)}{\text{tr}^2(N)} \quad (2-26)$$

Die Eigenwerte  $\lambda_1, \lambda_2$  beschreiben die Achsen einer Fehlerellipse, deren Rundheit durch q ausgedrückt wird. Zur Berechnung der Rundheit wird die Determinante (det) und die Spur (tr) der Normalgleichungsmatrix (N) verwendet. Das heißt eine runde Fehlerellipse ( $q=1$ ) deutet darauf hin, daß dieser Punkt sich von allen Richtungen aus gleich gut bestimmen läßt. Ist die Fehlerellipse langgestreckt, und somit  $q=0$ , so liegt der Punkt auf einer Kante und ist nur quer zur Kante gut bestimmbar. Die Suche geht also nach runden Fehlerellipsen, d.h. nach Punkten mit einem Rundheitsmaß q nahe 1.0. Als zweites Kriterium werden Punkte mit kleinen Fehlerellipsen gesucht. Dazu wird das Maß w berechnet.

$$w = \frac{\text{tr}(N)}{\det(N)} \quad (2-27)$$



**Abbildung 2.15** Prinzipdarstellung der eindimensionalen Zuordnung von Punktmerkmalen aus zwei Grauwertprofilen mit dem Oberflächenmodell „Horizontale Ebene“.

a) Ausgewählte Punktmerkmale in den Grauwertprofilen  $g_1$  und  $g_2$

b) Mögliche Zuordnungen, zwischen den ausgewählten Punktmerkmalen, letztlich zugeordnete Punkte, sowie die ausgleichende Gerade (aus der Annahme horizontale Ebene) zur Schätzung der Translation zwischen den Grauwertprofilen.

Dieses Gewicht  $w$  ist groß wenn ein Punkt eine kleine Fehlerellipse besitzt. In der Punktmenge mit runden Fehlerellipsen werden nun alle diejenigen eliminiert die ein kleines Gewicht haben. Hierzu wird der Medianwert für das Maß  $w$  aller Punkte berechnet und mit einem Faktor versehen. Dieser Grenzwert wird zur Elimination unsignifikanter Punkte verwendet. Um genauere Punktmessungen als nur die Fenstermitten zu erhalten kann eine Subpixelschätzung hinzugeschaltet werden, die einen optimalen Punkt innerhalb eines Fensters des Interestoperators festlegt.

Um lokal den besten Punkt zu finden, wird abschließend eine Nichtmaxima-Unterdrückung durchgeführt. Als Ergebnis liegt dann eine Liste von interessierenden Punkten getrennt für jedes Bild vor. In Abbildung 2.15a sind sie für den eindimensionalen Fall als schwarze Punkte im jeweiligen Grauwertprofil markiert.

### Schritt 2: Auswahl der möglichen Zuordnungen bei der FBM Methode

Nach dem ersten Zuordnungsschritt liegen nun zwei Listen von geeigneten Punktmerkmalen in beiden Bildern mit ihren Attributen vor. In einem zweiten Schritt werden die möglichen Zuordnungen zwischen den extrahierten Punktmerkmalen beider Bilder auf Grund der Ähnlichkeit von Punktmerkmalen bzw. ihrer Attribute ausgewählt. Vorab werden bereits unmögliche Punktombinationen eliminiert, wobei z.B. die Vorkenntnisse über Maximalparallaxen eingesetzt werden können. Die verbleibenden möglichen Kombinationen zwischen Punktmerkmalen des linken und rechten Bildes werden nun einzeln untersucht. Jede Kombination erhält ein Gewicht, das sich aus verschiedenen Faktoren berechnet. Es geht dabei das lokale Ähnlichkeitsmaß zwischen den Fenstern um die möglichen homologen Punkte ein und es werden die im ersten Zuordnungsschritt errechneten Gewichte berücksichtigt. Ein Gewicht für die Kombination zweier Punktmerkmale wird allerdings nur berechnet, wenn das lokale Ähnlichkeitsmaß einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

Das Gewicht ( $w_{ij}$ ) berechnet sich aus den Bildausschnitten  $i$  und  $j$  nach (Paderes, 1984) zu

$$w_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{ij}}{1-\rho_{ij}} \frac{1}{\sigma_{g_i}} \frac{1}{\sigma_{g_j}} \frac{1}{\sqrt{\text{tr}(Q_i)\text{tr}(Q_j)}} \quad (2-28)$$

mit dem Korrelationskoeffizienten  $\rho_{ij}$ , der Standardabweichung  $\sigma_{g_i}$  und  $\sigma_{g_j}$  der Grauwerte sowie der Spur ( $\text{tr}$ ) der inversen Normalgleichungsmatrix ( $Q=N^{-1}$ ).

Für das Ähnlichkeitsmaß wurde der Korrelationskoeffizient berechnet, der allerdings nicht maßstabs- und rotationsinvariant ist. Werden nur kleine Fenster von z.B. 5x5 Bildelementen zur Berechnung verwendet, so werden Einflüsse von Maßstabs- und Rotationsunterschieden der beiden Fenster gering gehalten. Als Ergebnis dieser lokalen Konsistenzfindung liegt eine Liste möglicher Zuordnungen von Punktmerkmalen des linken und rechten Bildes mit jeweiliger Gewichtung vor.

### Schritt 3: Konsistenzprüfung bei der FBM Methode

Im dritten und letzten Schritt der FBM Methode werden die im zweiten Schritt auf der Basis lokaler Ähnlichkeit ermittelten möglichen Zuordnungen mit dem geometrischen Modell für die Objekt Oberfläche in Einklang gebracht. Da mit einer hohen Zahl von falschen vorläufigen Zuordnungen zu rechnen ist, werden diese als Ausreißer vom geometrischen Oberflächenmodell betrachtet und mit einer robusten Ausgleichung durch iterative Veränderung der Gewichte eliminiert.

Ist das geometrische Modell der Oberfläche eine horizontale Ebene, so ist im Epipolarfall in Abbildung 2.15b das Ergebnis der Konsistenzprüfung eine iterativ angepaßte ausgleichende Gerade (parallel zur Diagonalen in Abbildung 2.15b) für die definitiv akzeptierten Zuordnungen. Näheres zur Wahl der Robustifizierungsfunktionen ist (Paderes, 1984) zu entnehmen.

Als Ergebnis der globalen Konsistenzfindung liegt eine Liste paarweise korrespondierender Punkte vor und die Parameter der globalen Abbildungsfunktion von einem Bild zum anderen, die in der robusten Ausgleichung berechnet wurden (im vorgehenden Fall die Parameter der ausgleichenden Gerade). Üblicherweise werden für eine zweidimensionale globale Transformation zwischen den beiden Bildern sechs Parameter einer Affintransformation angesetzt. Diese Parameter können, neben den einzelnen zugeordneten Punkten, als Näherungswerte für eine eventuell anschließende Feinzuordnung nach der LSM Methode dienen. Werden Bildmerkmale eines großen Bildbereichs zugeordnet, so liefert diese einfache Abbildungsfunktion nicht mehr so genaue, aber zur Näherungswertbestimmung noch geeignete Werte.

### 2.8.3 Vereinfachung im Epipolarfall

Erfolgt die Zuordnung in den Epipolarlinien, so wird angenommen, daß keine y-Parallaxen mehr vorliegen, und die Suche nach interessierenden Punkten kann auf eine Dimension eingeschränkt werden. Dies bedeutet, daß markante Kanten in jeder Epipolarlinie gesucht werden. Auch hierzu kann eine Subpixelschätzung durchgeführt werden. Die Zahl möglicher Zuordnungen ist sehr stark eingeschränkt, da jeweils eine Epipolarzeile im linken Bild nur einer Epipolarzeile im rechten Bild zugeordnet ist. Damit werden nur homologe Kantenpaare in je zwei Epipolarzeilen gesucht. Die Festlegung möglicher Punktepaare erfolgt analog dem oben beschriebenen zweidimensionalen Fall. Die Parameter der Oberflächenmodellierung werden auf drei beschränkt, was sich entsprechend als Beschleunigung der robusten Ausgleichung auswirkt.

### 2.8.4 Charakterisierung der FBM Methode im Überblick

Die Charakterisierung der FBM Methode erfolgt auch hier in Steckbriefform (siehe Tabelle 2.11) und richtet sich nach den in den Kapiteln 2.2 bis 2.6 besprochenen Grundbestandteilen, Annahmen und Bedingungen der Zuordnungsverfahren.

Eigenschaft	FBM (Förstner)
Opazität der Oberfläche	Voraussetzung
Epipolarbedingung	Vorteilhaft, aber nicht Voraussetzung
Oberflächengeometrie - lokal	Geneigte Ebene im Objektraum
Oberflächengeometrie - global	Geneigte Ebene im Objektraum
Eindeutigkeit der Zuordnung	Voraussetzung
Topologische Nachbarschaft	Voraussetzung
Photometrische Ähnlichkeit	Wird angenommen bei der vorläufigen Zuordnung
Ähnlichkeitsmaß	Korrelationskoeffizient + Textur
Lokale Konsistenzfindung	Test des Ähnlichkeitsmaßes gegen Schwellwert (z.B. Median)
Globale Konsistenzfindung	Robuste Schätzung der Abbildungsfunktion (iterativ), dabei Eliminierung falscher vorläufiger Zuordnungen
Konvergenzbereich	≈ 1/4 Fenstergröße
Qualitätsmaße	Automatische Berechnung der Genauigkeit der Transformationsparameter und des Korrelationskoeffizienten der transformierten Bildausschnitte
Objektbeschreibung	Parallaxen zwischen allen korrespondierenden Punktepaaren und globale Transformationsparameter zwischen beiden Bildausschnitten. Zur Berechnung von Objektkoordinaten müssen die Orientierungsparameter bekannt sein
Dichte der Resultate der Zuordnung	Sparse
Bereitstellung von Steuerparametern	Fenstergröße, Pixelgröße, Schwellwerte
Näherungswertbestimmung	Kenntnis der Maximalparallaxe vorteilhaft
Selbstdiagnose	Automatischer Test der Qualitätsmaße gegenüber Schwellwerten und Zahl der eliminierten Ausreißer

**Tabelle 2.11** Steckbrief für die FBM Methode nach Förstner

### 2.8.5 Andere Verfahren der merkmalsgestützten Zuordnung

Wie bereits in den obigen Abschnitten erläutert, gibt es hier eine sehr große Zahl von Verfahren, die sich auf Punkt-, Linien- oder Flächeninformation stützen. Hier sollen nur zwei Verfahren erwähnt werden, die ebenfalls auf der Basis von Punktmerkmalen arbeiten. Diese Beschreibungen sind (Paderes, 1984) entnommen.

Die LNK (nach L.N. Kanal) Methode benützt Punkte, genauer eindimensionale Kanten, die in vier Klassen eingeteilt sind (Lambird, 1980; Stockmann, 1982). Eine weitere Version benützt ebenso Kantenpaare, die aber hier nicht betrachtet werden sollen. In einem zweiten Schritt werden alle möglichen Zuordnungen zwischen den Kanten beider Bilder aufgestellt. Dabei werden nur Kanten zugeordnet, die derselben Klasse angehören, also das Ähnlichkeitsmaß erfüllen. In einem dritten Schritt soll die geometrische Transformation zwischen den Bildern bestimmt werden, die mit einer Translation in x- und y-Richtung modelliert wird. Diese Transformationen werden den Spitzenwerten in den Parallaxenhistogrammen der vorläufigen Zuordnungen entnommen. Zusätzlich erhält man eine Klassifizierung in zugeordnete und nicht zugeordnete Punkte. Bei dieser Methode sind keine Iterationen und Näherungswerte erforderlich.

Von Nachteil ist aber, daß zur Schätzung höherwertiger Transformationsfunktionen auch höherwertige Merkmale eingesetzt werden müssen und zudem die Dimension der Histogramme erhöht wird. Allerdings reicht dieser einfache Ansatz oft zur groben Näherungswertbestimmung aus.

Eine weitere Methode ist der Barnard-Thompson Zuordnungsalgorithmus (Barnard, 1980). Hier werden in einem ersten Schritt markante Punkte mit dem Moravec Interestoperator ausgewählt. Das Ähnlichkeitsmaß für die vorläufige Zuordnung, als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, benützt die Koordinaten und die Grauwertdifferenzen. Ein Punktepaar gehört mit dieser Wahrscheinlichkeit zu der Liste der korrespondierenden Punkte, wenn die Parallaxe kleiner als ein Schwellwert ist. Im dritten Schritt wird diese Liste mit dem differentiellen Oberflächenmodell in Einklang gebracht. Das Modell geht von stückweise glatten Oberflächen aus. Die Eingangswahrscheinlichkeiten werden nach einem Relaxationsschema (Rosenfeld, 1976) unter Ausnützung der Nachbarschaftsinformation korrigiert. Das geometrische Modell, das diesem heuristischen Ansatz zugrunde liegt, ist sehr flexibel, allerdings ist der numerische Aufwand auch sehr hoch, der allein zur Näherungswertbestimmung u.U. nicht mehr akzeptabel sein kann.

Mit diesen beiden weiteren Beispielen für eine merkmalsgestützte Zuordnung wurde gezeigt, daß die grundlegenden Schritte der Auswahl von Punktmerkmalen, der vorläufigen Zuordnung auf Grund des Ähnlichkeitsmaßes und der globalen Konsistenzfindung zur Anpassung an die Modelle der Aufnahme und der Objekte bei den verschiedenen Verfahren stets vorhanden sind und außerdem sogar sehr ähnlich sind.

Damit ist auch gezeigt, daß sich Bildzuordnungsverfahren mit der vorgeschlagenen Klassifizierung relativ einfach analysieren und vergleichen lassen.

### 3 EXPERIMENTELLE VERGLEICHE

In Kapitel 2 wurde eine Übersicht über Bildzuordnungsverfahren gegeben. Es wurde deutlich, welche große Vielfalt von Verfahren existiert. Die Frage der Bewertung der Ansätze und ihrer Anwendbarkeit ist jedoch mit theoretischer Analyse allein schwierig zu beantworten. In Kapitel 2 wurden aus theoretischer Sicht zwar gewisse Klassifizierungen getroffen, aber auf Grund der Austauschbarkeit von Modulen ist letztlich keine klare Aussage zu treffen. Deshalb wurde ein empirischer Test zur Bildzuordnung durchgeführt, der gleichzeitig eine Übersicht über programmierte Verfahren geben sollte.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe III/4 der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) hatte der Vorsitzende dieser Arbeitsgruppe, Dr. W. Förstner, in Zusammenarbeit mit dem Verfasser, der als Sekretär dieser Arbeitsgruppe fungierte, einen empirischen Test initiiert und durchgeführt. Die Testdaten wurden 1986 an Interessenten in aller Welt verschickt, die Auswertung der zurückgesandten Beiträge wurde in den Jahren 1987/1988 vorgenommen und im wesentlichen vom Verfasser durchgeführt. Obwohl schon zurückliegend, sind die Ergebnisse noch stets informativ und als Basis für Evaluierung geeignet. Seit diesem Zeitpunkt wurde, nach Kenntnis des Verfassers, kein derart umfangreicher empirischer Test zur Bildzuordnung durchgeführt.

In dem Experiment wurden 12 digitale Stereobildpaare versandt. Die Teilnehmer hatten als Hauptaufgabe die Bestimmung von Parallaxen an vorgegebenen und frei wählbaren Punkten. Jeder Teilnehmer konnte zwischen den Bildern und den vorgegebenen Aufgaben wählen. Die Bilder waren bezüglich Inhalt und Bildmaßstab sehr verschieden. In der Regel waren es kontinuierliche Flächen bis hin zu Extremfällen, wie Bäumen und transparenten Flächen. Der Test zur Bildzuordnung sollte Auskunft geben über den operationellen Stand und prinzipielle Anwendungsbereiche der digitalen Bildzuordnung überhaupt. Dabei standen die in Tabelle 3.1 aufgelisteten vier Fragen über Anwendbarkeit, benötigte Vorkenntnisse, Qualität sowie Selbstdiagnose im Vordergrund. Diese Fragen sollten anhand von Vergleichen mit manuellen Messungen in den Originalbildern beantwortet werden.

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Reaktion auf Bilder unterschiedlicher geometrischer Komplexität</li><li>• Art und Umfang der benötigten Vorinformation</li><li>• Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Parallaxen im Vergleich zu manuellen Messungen bzw. Sollwerten</li><li>• Art und Umfang der Abschätzung der erreichten Qualität der Resultate</li></ul> |
|--|

**Tabelle 3.1** Die vier wichtigsten Ziele des Vergleichs der Bildzuordnungsverfahren im WG III/4 ISPRS Test zur Bildzuordnung.

Es wurde erwartet, eine Rangordnung der Zuordnungsverfahren, in Bezug auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Anwendbarkeit und Flexibilität zu erhalten und unter Umständen objektive Maßstäbe dafür abzuleiten, welche Verfahren wann und wie benutzt werden sollten. Von besonderem Interesse war die Frage, ob bestimmte Verfahren in der Lage sind, alle Bilder erfolgreich zu bearbeiten, ohne daß die Programme adaptiert werden müssen.

Eine erste Übersicht über die Resultate mit besonderem Hinblick auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit wurde während des ISPRS Kongresses in Kyoto, 1988, gegeben (Gülch, 1988, 1991a). In diesem Kapitel erfolgt eine komplette Zusammenstellung und Analyse aller Ergebnisse einschließlich der inzwischen vom Verfasser vertieften Untersuchungen.

Das Datenmaterial wurde an mehr als 60 Institutionen in aller Welt versandt. Die aktiven Teilnehmer kamen aus verschiedenen Disziplinen wie Computer Sehen, Elektronik, Physik, Robotik und Photogrammetrie. Insgesamt waren 50% der aktiven Teilnehmer Nicht-Photogrammeter. Von 15 Institutionen kamen Resultate zurück.

In Tabelle 3.2 sind die beteiligten Institutionen, geordnet nach Ländern, aufgelistet. Die Ergebnisse eines Teilnehmers konnten nicht ausgewertet werden.

Land	Institution
Deutschland	TH Darmstadt, Institut für Photogrammetrie
Deutschland	TU Berlin, Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie
Deutschland	Universität Bonn, Institut für Photogrammetrie
Deutschland	Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung
Deutschland	Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Deutschland	Universität Stuttgart, Institut für Physikalische Elektronik
Dänemark	University of Copenhagen, Institute of Datalogy
Frankreich	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
Großbritannien	UCL London, Dept. of Photogrammetry
Großbritannien	University of Sheffield, AI Vision Research Unit
Rumänien	Romanian Committee for Photogrammetry and Remote Sensing*
USA	Defense Mapping Agency, Aero Space Center
USA	SRI-International
USA	University of Southern California, Institute for Robotics and Intelligent Systems
Volksrepublik China	Wuhan Technical University of Surveying and Mapping

**Tabelle 3.2** ISPRS WG III/4 Test zur Bildzuordnung. Übersicht über beteiligte Länder und Institutionen (\* konnte nicht ausgewertet werden).

In Kapitel 3.1 wird das Datenmaterial und das Testdesign beschrieben. In Kapitel 3.2 werden die gewählten Bildzuordnungsverfahren vorgestellt. In Kapitel 3.3 erfolgt die Beschreibung der Auswertemethoden. In Kapitel 3.4 sind die Ergebnisse der Vergleiche zwischen Teilnehmer- und Sollwerten tabellarisch zusammengestellt. In den Kapiteln 3.5 bis 3.8 wird die eigentliche Analyse beschrieben, die sich mit den in Tabelle 3.1 angeführten Punkten Anwendbarkeit, benötigte Vorkenntnisse, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Selbstdiagnose befaßt. In Kapitel 3.9 erfolgt eine abschließende Wertung des Tests und der erzielten Ergebnisse.

### 3.1 Test Design

Der Test zur Bildzuordnung sollte erstens eine Übersicht über verschiedene Bildzuordnungsverfahren geben und zweitens deren Brauchbarkeit beurteilen. Zu diesem Zwecke wurde verschiedenartiges Bildmaterial zusammengestellt. Das Bildmaterial umfaßt insgesamt 12 Schwarz-Weiß Bildpaare. Die Qualität der Bilder ist nicht überall gleich, es wurde aber versucht, bei der Digitalisierung den Grauwertumfang von 256 Graustufen möglichst abzudecken. Das Bildmaterial wurde nach 2 verschiedenen Gesichtspunkten, Komplexität der Oberfläche und Bildmaßstab, ausgewählt. Den Teilnehmern wurde eine Aufgabenstellung gegeben, die neben 2 Hauptaufgaben zur Punktmessung noch mehrere bildpaarspezifische Sonderaufgaben umfaßte. Weiterhin wurde jedem Teilnehmer ein Fragenkatalog zu den verwendeten Bildzuordnungsverfahren und ein Fragenkatalog über die Bearbeitung der gewählten Bilder vorgelegt. Der Fragenkatalog zu den angewendeten Verfahren war recht umfangreich gewählt, um detaillierte Kenntnisse über die Verfahren zu erhalten. Die Fragen zur Bearbeitung der Testbilder sollten Aufschlüsse über praxisnahe Anwendung geben.

#### 3.1.1 Datenmaterial

Das Bildmaterial wurde so ausgewählt, daß es eine Vielzahl von Objekten abdeckt, so daß sehr verschiedene Zuordnungsverfahren in diesem Test angewandt werden konnten. Zwölf Bildpaare mit einer Größe von 240x240 Bildelementen wurden von Film mit Hilfe von CCD-Videokameras in Schwarz-Weiß digitalisiert. Die Pixelgröße ist ca.  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , der Grauwertumfang ist 8 Bit oder 256 Graustufen. Die terrestrischen Aufnahmen wurden mit Meßkamern und mit Amateurkameras durchgeführt. Zusammen mit den Luftaufnahmen decken sie Bildmaßstäbe von 1:20 bis ca. 1:30 000 ab.

Die zwölf Bildpaare wurden in Komplexitäts- und in Maßstabsklassen eingeteilt, wie in Tabelle 3.3 dargestellt ist. Die horizontale Einteilung in dieser Tabelle erfolgt nach drei verschiedenen geometrischen Komplexitätsklassen, die für das Testmaterial durch die Organisatoren definiert wurden. Der Schwierigkeitsgrad reicht von glatten Objektoberflächen über Oberflächen mit großen Tiefenunterschieden, Kanten und möglichen Verdeckungen bis zu Objekten, die in hohem Maße von Höhenunterschieden, Verdeckungen oder gar Mehrfachoberflächen geprägt sind. Die vertikale Ordnung wird durch vier verschiedene Bildmaßstabsklassen festgelegt.

Vier Bildpaare (1, 4, 7 und 10) sind Ausschnitte von Normal- oder Epipolarbildern, d.h. sie wurden vorab entzerrt und haben keine y-Parallaxen, so daß nur x-Parallaxen gemessen werden mußten. Für die anderen acht Bildpaare lagen die Transformationsparameter von den gegebenen Daten in Epipolarbilder vor, so daß auch diese Bildpaare von Verfahren behandelt werden konnten, die die Epipolargeometrie zur Voraussetzung haben.

Abbildung 3.1 zeigt die Halbtonbilder aller Bildpaare in der gleichen Anordnung wie in Tabelle 3.3, d.h. 3 Gruppen von Bildern, die sich nach Schwierigkeit der Oberfläche gliedern: I (Bildpaare 1-4) einfache Oberflächen, II (Bildpaare 5-8) stärker gegliedert und III (Bildpaare 9-12) teilweise ohne geschlossene Fläche (Bäume), mit Kanten und Doppelflächen (OlympiaII). Innerhalb jeder Gruppe werden vier Maßstabsbereiche (a-d) abgedeckt.

BILD	BILDNAME Kompl./Maßst./Entz.	BILD	BILDNAME Kompl./Maßst./Entz.	BILD	BILDNAME Kompl./Maßst./Entz.
1	CAR I Ia <i>epipolar</i>	5	BRIDGE IIa <i>original*</i>	9	CAR II IIIa <i>original</i>
2	QUARRY Ib <i>original</i>	6	TREE IIb <i>original *</i>	10	WALL IIIb <i>epipolar</i>
3	OLYMPIA I Ic <i>original</i>	7	ISLAND IIc <i>epipolar</i>	11	OLYMPIA II IIIc <i>original</i>
4	SOUTH AMERICA Id <i>epipolar</i>	8	SWITZERLAND IIId <i>original</i>	12	HOUSE IIId <i>original</i>

**Tabelle 3.3** Klassifizierung der 12 Bildpaare.

Nummer (1-12) und Name des Bildpaares  
 Komplexität: (I) gering (II) mittel (III) hoch  
 Maßstab: (a) ≈1:20 (b) ≈1:200 (c) ≈1:2 000 (d) ≈1:20 000  
 Entzerrung: *epipolar* Normalbild, keine y-Parallaxen  
*original* Original Sensorbild; die Parameter der Relativen Orientierung sind gegeben (\*= genähert)

### 3.1.2 Aufgabenstellung und Durchführung

Zu jedem Bildpaar wurden 2 Hauptaufgaben zur Messung gestellt, sowie gegebenenfalls einige Sonderaufgaben. Die Teilnehmer konnten eine oder mehrere davon auswählen.

Die 2 Hauptaufgaben befaßten sich mit der Punktmessung, gegliedert in Standardaufgabe A und Standardaufgabe B:

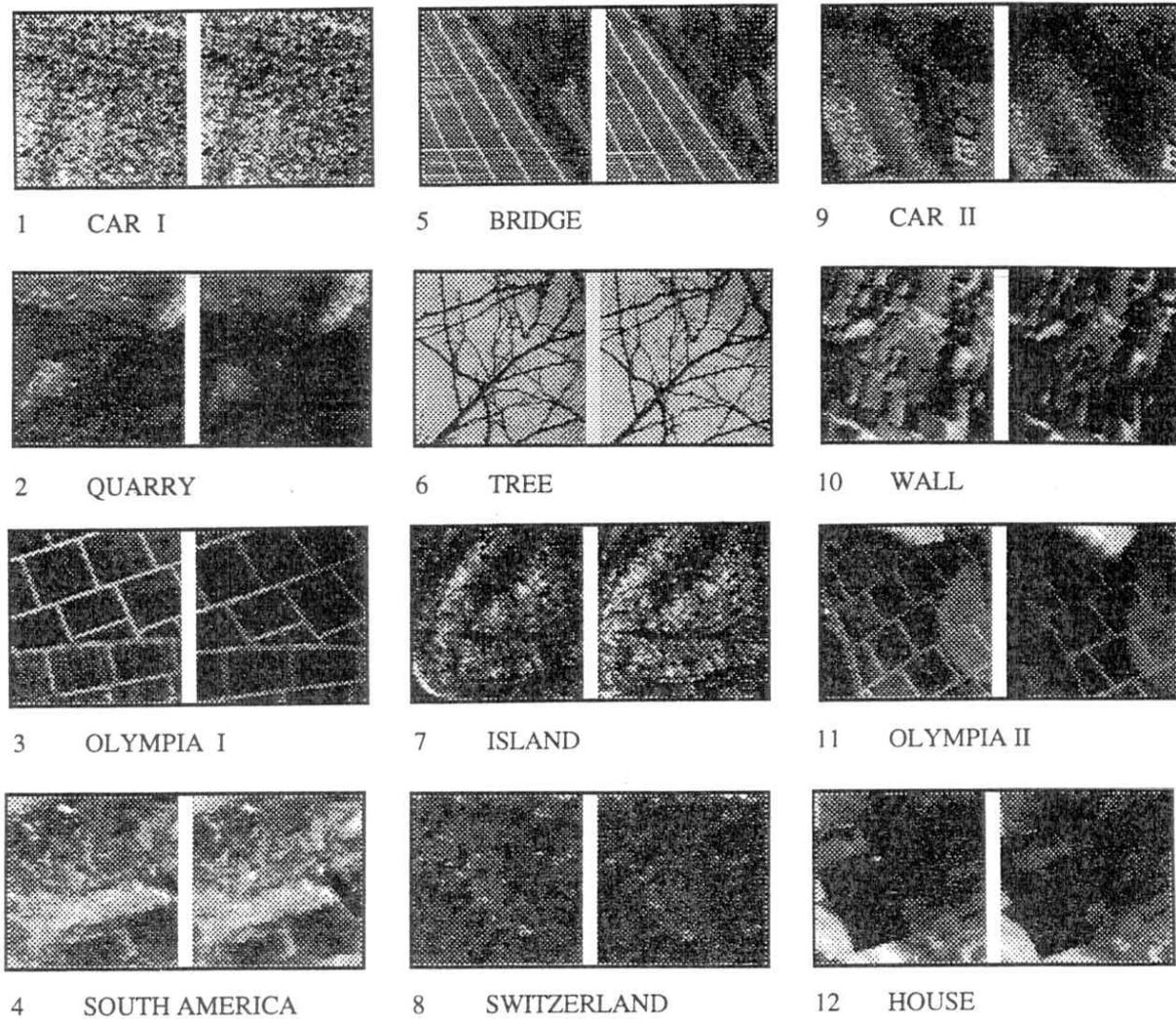
#### Standardaufgabe A:

„Bestimme die Parallaxen an definierten Gitterpunkten und gib die Art und Weise Ihrer Bestimmung an. Wenn möglich gib Qualitätsmaße für die Parallaxen an.“

#### Standardaufgabe B:

„Bestimme die Parallaxen an selektierten Punkten. Gib das Selektionsschema an und wenn möglich Qualitätsmaße für die Parallaxen.“

Zusätzlich gab es für verschiedene Bilder Sonderaufgaben, die in Anlehnung an mögliche Anwendungen ausgewählt wurden. Es waren dies z.B. Segmentierungsaufgaben, Bestimmung von Objektebenen, Berechnung von Flächeninhalten usw. Diese Aufgaben spielen hier keine Rolle und es soll deshalb auf (Gülch,1988) verwiesen werden.



**Abbildung 3.1** Bildpaare 1-12 des WG III/4 ISPRS Tests zur Bildzuordnung.  
(Bildgröße 240x240 Pixel, Pixelgröße  $\approx 20 \mu\text{m}$ , Grauwertumfang  $\approx 256$  Graustufen)

### 3.1.3 Fragenkataloge für Verfahren und Bearbeitung

Jeder Teilnehmer wurde über seine **Bildzuordnungsverfahren** befragt. Diese Informationen in Verbindung mit Literaturreferenzen sollten zur Charakterisierung und Klassifizierung der Verfahren dienen, wie sie im nachfolgenden Kapitel 3.2 durchgeführt werden. Der Fragenkatalog war nach den in Tabelle 3.4 aufgelisteten 7 Schwerpunkten bezüglich der Grundelemente (siehe Kapitel 2) gegliedert.

- Hauptanwendungsgebiet
- Art der Merkmalsfindung
- Ähnlichkeitsmaß
- Mathematisches Modell für die Objektoberfläche
- Zuordnungsalgorithmus
- Behandlung von Kanten, Verdeckungen und Mehrfachoberflächen
- Steuerparameter

**Tabelle 3.4** Schwerpunkte der Fragen im Fragenkatalog über die eingesetzten Verfahren bzw. die gewählten Ansätze.

Neben den allgemeinen Fragen zu den gewählten Zuordnungsverfahren, wurden die Teilnehmer zur konkreten **Bearbeitung der Testbilder** befragt. Die in Tabelle 3.5 aufgelisteten 6 Fragen über die Durchführung von Seiten der Teilnehmer waren dabei von besonderem Interesse.

Die Antworten dieser Fragen waren von Bedeutung zur Beurteilung der Anwendbarkeit und Flexibilität eines Zuordnungsverfahrens.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Initialisierung</li><li>• Anpassung der Zuordnung</li><li>• Analyse der Zuordnung, Qualitätskontrolle</li><li>• Interpolationsverfahren zur Bereitstellung der Testergebnisse</li><li>• Auswahl von Bildpaaren und Aufgaben</li><li>• Art der Interaktion</li></ul> |
|---|

**Tabelle 3.5** Schwerpunkte der Fragen im Fragenkatalog über die Bearbeitung der Testbilder.

## 3.2 Zuordnungsansätze - Verfahren und Strategien

Das Hauptthema des Tests war die Untersuchung von Verfahren. Da verschiedene Teilnehmer das gleiche Bildzuordnungsverfahren in unterschiedlicher Form auf verschiedene Bilder angewandt haben, oder aber verschiedene Zuordnungsverfahren kombiniert haben, wird im folgenden von **Ansätzen** und nicht von reinen Bildzuordnungsverfahren gesprochen werden. Vom Verfasser wurden insgesamt 20 Ansätze unterschieden (3.2.1). Diese Ansätze teilen sich in 2 Hauptklassen (nach Kapitel 2) in rasterorientierte Zuordnungsverfahren (3 Gruppen) und merkmalsgestützte Verfahren mit insgesamt 4 Gruppen ein. Die wichtigsten Verfahren aus den beiden Hauptklassen waren vertreten. Nur Zuordnungen von Kurven allgemeiner Art und von Strukturen (2.2.2) fehlten; hier handelte es sich ja auch um einen empirischen Test und nicht um eine theoretische Übersicht.

Als weitere Kriterien zur Klassifizierung der Ansätze wurden herangezogen: die Strategie (3 Gruppen), die Dichte der Zuordnungsergebnisses (2 Gruppen), die Modellbildung (2 Gruppen) und das verwendete Oberflächenmodell (6 Gruppen).

Mit Hilfe dieser Kriterien wurde jeder Ansatz für die Analyse zwei weiteren Gruppierungen, nach Genauigkeits- und Automationsgrad, zugeordnet (3.2.2). Diese vom Verfasser vorgenommene Einteilung in 3 Genauigkeitsklassen und in 3 Strategieklassen stützt sich auf Vorkenntnisse über das Verhalten eines Ansatzes. Es sollte untersucht werden, inwieweit solche Vermutungen durch die Testresultate bestätigt werden. Abschließend werden alle 20 Ansätze in Steckbriefform beschrieben (3.2.3). Die Kriterien zur Beschreibung sind in Anlehnung an die in Kapitel 2 beschriebenen Grundelemente eines Zuordnungsverfahrens gewählt. Hierzu wurden insbesondere die Antworten zu den Fragenkatalogen (3.1.3) herangezogen. Für detailliertere Informationen wird dabei jeweils auf die entsprechende Literaturstelle verwiesen.

### 3.2.1 Klassifizierung der Zuordnungsansätze

Wie schon in Kapitel 2 ersichtlich ist die Modularität der Zuordnungsverfahren groß und damit ist eine Vielzahl von Mischformen möglich. Einige der Teilnehmer verwendeten unterschiedliche Zuordnungsverfahren für unterschiedliche Bildpaare. Einige Verfahren wurden von mehreren Teilnehmern benützt. Oftmals wurden Verfahren kombiniert. Um hier eine Abgrenzung zu treffen, wurden die gewählten Verfahren vom Verfasser in insgesamt 20 verschiedene Ansätze eingeteilt, die im Extremfall einem einzelnen Zuordnungsverfahren entsprechen. Eine Klassifizierung der 20 Ansätze ist in Tabelle 3.6 gegeben und wird im folgenden erläutert.

Die Hauptkriterien zur Einteilung waren Art der Zuordnung und die Strategie. Die Bildzuordnungsverfahren wurden nach Kapitel 2 in Verfahren der rasterorientierten und der merkmalsgestützten **Zuordnung** eingeteilt. Die Einteilung nach

**Strategie** richtete sich nach dem Grad der Interaktion, der verwendeten Hierarchien oder Prädiktionmethoden. Weitere wichtige Gesichtspunkte für die spätere Analyse umfassen das verwendete lokale **Oberflächenmodell**, die **Dichte der Zuordnungsergebnisse** und die **Notwendigkeit der Modellbildung**.

Die Verfahren, die auf der Kreuzkorrelation, auf der Kleinsten Quadrate Zuordnung und dem Simulated Annealing basieren bilden die Gruppe der **rasterorientierten Zuordnungen** (2.2.1). Die Verfahren mit **Kreuzkorrelationen** lassen sich in zwei Untergruppen einteilen, die Ergebnisse im Pixelbereich bzw. im Subpixelbereich liefern. Die Subpixelschätzung erfolgt vermittelt Parabolischer Interpolation oder durch Kleinste Quadrate Anpassung einer geeigneten Funktion.

Ansatz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>ZUORDNUNG</b>																				
<b>Rasterorient.</b>																				
CC <i>pixel</i>				X				X				X				X				
<i>subpixel</i>	X	X	X		X		X		X	X	X									
KQZ <i>lokal</i>									X	X	X	X			X		X			
<i>global</i>													X	X						
Sim. Annealing															X					
<b>Merkmalsg.</b>																				
Punkte			I	I	X					I				X						X
Kanten <i>Linien</i>																	X			
Kanten <i>Zeroc.</i>															X		X	X	X	
Regionen						X														
<b>STRATEGIE</b>																				
<b>Interaktion</b>	X	X					X	X			X	X		X		X				
<b>Hierarchie</b>																				
Keine	X	X				X	X	X									X	X		
Gl. Verf.			X	X					X	X					X				X	X
Ver. Verf.					X						M	M	X	M		M				
<b>Prädiktion</b>		X						X	X	X		X	X			X				
<b>DICHTE DER ERGEBNISSE</b>																				
<b>Pixel</b>														X	X			X	X	
<b>Sparse</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X			X
<b>RELATIVE ORIENTIERUNG</b>																				
<b>Notwendig</b>	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Zur Kontrolle</b>		X		X	X		X				X									
<b>Oberfl. Modell</b>										/				∧		┌┐		∨∧		?

**Tabelle 3.6** Klassifizierung der verwendeten Ansätze nach 5 Gruppen.

- (1) **ZUORDNUNG**
  - Rasterorientiert
    - CC Kreuzkorrelation (pixel/subpixel)
    - KQZ Kleinste Quadrate Zuordnung (lokal-global)
    - Sim. Annealing Simulated Annealing
  - Merkmalsgestützt
    - Punkte (I nur Interestoperator, keine Zuordnung)
    - Kanten Linien Kanten - Liniensegmente
    - Kanten Zeroc. Kanten - Zerocrossings
    - Regionen Regionen
- (2) **STRATEGIE**
  - Interaktion Interaktion (Startpunkte, Kontrolle)
  - Hierarchie
    - Gl. Verf. Gleiches Verfahren
    - Ver. Verf. Verschiedene Verfahren (M = Manuelle Unterstützung)
  - Prädiktion Prädiktion auf einer Auflösungsstufe
- (3) **DICHTE DER ERGEBNISSE**
  - Pixelweise oder sparse
- (4) **RELATIVE ORIENTIERUNG**
  - Notwendig./Kontrolle Erforderlich/Wird zur Endkontrolle verwendet
- (5) **Oberfl. Modell**
  - / ∧ Oberflächmodell (lokal)
  - ┌┐ ∨∧ ? Horizontale Ebene /Geneigte Ebene / Gradienten- / Positionsdiskontinuitäten / Mischformen / Unbekannt

Die **Kleinste Quadrate Zuordnung** hat ihrerseits lokale und globale Aspekte, wenn als Kriterium der Konsistenzbereich betrachtet wird. Eine Kleinste Quadrate Zuordnung im Objektbereich fällt in die Gruppe der globalen Zuordnungen. Das **Simulated Annealing** bildet eine eigene Untergruppe. Als Mischform treten einige rasterorientierte Zuordnungen in Erscheinung, die Interestoperatoren benutzen, um geeignete Punkte zur Zuordnung zu finden. Oft wird dabei nur in einem Bild gearbeitet.

Die andere Hauptgruppe bei den Zuordnungen sind die **merkmalsgestützten Zuordnungen** (2.2.2). Es werden punktartige Merkmale, kantenartige Merkmale oder homogene Flächen, d.h. Regionen, verwendet. Bei kantenartigen Merkmalen wird eine Unterscheidung in Liniensegmente oder Zerocrossings getroffen.

Die verwendete **Strategie** ist von großer Bedeutung, wenn die Anwendbarkeit, bzw. die Flexibilität und die Zuverlässigkeit der Verfahren untersucht werden (siehe 2.6). Einige Verfahren benötigen interaktive Startpunkte oder interaktive Bereinigung der Ergebnisse. Einige Teilnehmer benutzen den gleichen Zuordnungsalgorithmus auf verschiedenen Ebenen einer Auflösungshierarchie. Andere kombinieren verschiedene Algorithmen auf verschiedenen Auflösungsebenen oder auch innerhalb einer Ebene. Es tritt also eine große Zahl von Mischformen auf.

Um **Näherungswerte** (siehe 2.6.2) für einen nächsten Zuordnungspunkt zu finden, wird nicht nur eine Hierarchie in der Auflösung verwendet, sondern auch Prädiktion innerhalb einer Auflösungsebene. Bei einigen Bildern wurden verschiedenartige Verfahren kombiniert eingesetzt um Teilaufgaben zu lösen, die dann zum Endergebnis vereinigt wurden. Allerdings wurden diese z.T. vom Operateur ausgewählt und gesteuert, d.h. der Automationsgrad ist noch gering in diesen Fällen.

Ein dichtes **Parallaxenfeld** zur Oberflächenbeschreibung (siehe 2.5) erhält man auf zweierlei Art. Die meisten der angewandten Verfahren liefern eine geringe Ergebnisdichte, d.h. dünn besetzte (sparse) Ergebnisse, aus denen erst über eine Interpolation dichte Ergebnisse erhalten werden. Einige Algorithmen ergeben aber auch pixelweise Ergebnisse, d.h. die Interpolation ist hier essentieller Bestandteil des Zuordnungsverfahrens.

Einige Ansätze benötigen die Kenntnis der Parameter der **Relativen Orientierung**, d.h. sie arbeiten mit **Epipolarometrie** (2.3.1). Einige andere benutzen die Relative Orientierung, um nach der Zuordnung verbleibende y-Parallaxen zu überprüfen. Andere benutzen die Epipolarbedingungen, bestimmen aber die Parameter der Relativen Orientierung automatisch aus den Daten.

Es wurden 5 verschiedene lokale **Oberflächenmodelle** (siehe 2.3.3) benutzt: eine lokale horizontale Oberfläche, eine lokal geneigte Oberfläche, eine Oberfläche mit Gradientendiskontinuitäten, eine Oberfläche mit Positionsdiskontinuitäten und eine allgemeinere Oberfläche. Für einen Ansatz (Nr. 20) war das Oberflächenmodell nicht ersichtlich. Der Baum und des Olympiadachs (speziell Olympia II) müssen getrennt betrachtet werden, dort gelten die üblichen Oberflächenmodelle nur in sehr eingeschränktem Maße.

### 3.2.2 Einteilung der Zuordnungsansätze nach Genauigkeit und Automationsgrad

Wie gesehen treten eine große Zahl von Mischformen von Zuordnungsverfahren auf. Um eine gemeinsame, überschaubare Basis für weitere Vergleiche zu schaffen, wurde jeder Ansatz in eine von 3 **Genauigkeitsklassen** und in eine von 3 **Strategieklassen** gruppiert. Für die Einteilung in eine Genauigkeitsklasse war das Genauigkeitspotential des Algorithmus, der zur Feinzuordnung verwendet wurde, ausschlaggebend. Diese vom Verfasser vorgenommene Einteilung auf der Basis der Verfahrensbeschreibung sollte durch die Testergebnisse überprüft werden. Eine weitere Klassifizierung der Ansätze in drei Strategieklassen wurde vom Verfasser vorgenommen, um die Zuverlässigkeit und den Automationsgrad der Verfahren, d.h. deren praktische Anwendbarkeit, beurteilen zu können. Die Beschreibung der drei Genauigkeitsklassen mit den ihnen zugeordneten Verfahren, sowie die Beschreibung der drei Strategieklassen mit dem entsprechenden Automationsgrad findet sich in Tabelle 3.7.

Genauigkeitsklasse	Verfahren der endgültigen Zuordnung
1 (sehr genau)	Kleinste Quadrate Zuordnung (KQZ) Kreuzkorrelation (CC - subpixel)
2 (genau)	Kreuzkorrelation (CC - pixel) Simulated Annealing Merkmalsgestützte Zuordnung (Punkte, Linien, Zerocr.)
3 (weniger genau)	Merkmalsgestützte Zuordnung (Regionen)
Strategiekategorie	Automationsgrad
1 (manuelle Interaktion)	Manuelle Interaktion bei der Zuordnung oder Endkontrolle
2 (hohe Automation, Hierarchie, Prädiktion)	Hierarchische Näherungswertbestimmung Prädiktion der Näherungswerte in einer Auflösungsstufe
3 (hohe Automation ohne Hierarchien)	Keine Hierarchie, keine Prädiktion, keine Startpunkte

**Tabelle 3.7** Klassifizierung der Ansätze in Genauigkeitsklassen und Strategieklassen.

In der Tabelle 3.8 wird eine Übersicht gegeben, auf welche Bilder und Standardaufgaben die einzelnen Ansätze angewandt wurden. Jeder Ansatz ist durch seine Zuordnung (R-xx wie rasterorientiert, M-xx wie merkmalsorientiert mit xx als Kurzbeschreibung für das Verfahren) gekennzeichnet, gemäß der in Tabelle 3.6 gegebenen Übersicht. Ergänzend kommen die Angaben bezüglich der oben eingeführten Genauigkeits- und Strategieklassen hinzu. Dabei ist zu beachten, daß der Wert der Strategiekategorie für die Klassen 2 und 3 um 0.5 vermindert wird, wenn ein Startpunkt oder einige wenige Startpunkte manuell vorgegeben wurden. Man stellt fest, daß nicht alle Ansätze auf alle Bilder angewandt wurden, daß aber doch mit einigen Ansätzen sehr verschiedene Bilder bearbeitet wurden.

### 3.2.3 Detailbeschreibung aller Ansätze

In Tabelle 3.6 wurde eine Klassifizierung der 20 Ansätze gegeben, ohne allerdings näher auf Details einzugehen. In den Tabellen 3.9 a)-d) werden Kurzbeschreibungen aller Ansätze gegeben. Weitergehende Angaben über die Verbindung von Teilnehmer und Ansatz sind wie vorab vereinbart nur den aktiven Teilnehmern des Tests zugänglich. Die in den Tabellen 3.9 a)-d) gemachten Angaben genügen, um die Wertung der Ansätze in den Ergebnissen der folgenden Kapitel mit einem bestimmten Zuordnungsverfahren in Verbindung zu setzen. In den Kurzbeschreibungen werden dabei die in den Tabellen 3.3 und 3.4 aufgeführten Schwerpunkte der Fragenkataloge betrachtet. Diese wiederum stehen in enger Verbindung mit den in den Kapiteln 2.2-2.6 beschriebenen Grundbestandteilen von Zuordnungsverfahren. Am Ende jeder Kurzbeschreibung wird jeweils auf Literatur zu den entsprechenden Zuordnungsverfahren verwiesen.

Da verschiedene Teilnehmer keine oder nur sehr kurze Antworten zu den Fragenkatalogen abgegeben haben, konnten nicht in jedem Fall, auch nach entsprechenden Nachfragen, alle Details geklärt werden. Es sei dazu auf die entsprechende Literatur und darin angegebene weitere Referenzen verwiesen.

Die Angaben in den Tabellen 3.9 a)-d) bedürfen eigentlich keiner näheren Erläuterung, so daß hier nur einige zusammenfassende Bemerkungen folgen. Wie erwartet sind die Anwendungsgebiete weit gestreut. Die Angaben über verwendete Merkmale, Ähnlichkeitsmaße, das geometrische Objektmodell und den Zuordnungsalgorithmus spiegeln die Vielfalt der Verfahren wider, die bereits in Kapitel 2 deutlich wurde. Die benötigten Steuerparameter sind meist empirisch ermittelt, beruhen z.T. aber auf Theorien zum menschlichen Sehen. Verdeckungen, Bruchkanten und Mehrfachoberflächen können von den verwendeten Realisierungen in der Regel nicht explizit behandelt werden. Mehrere Verfahren sind allerdings in der Lage, diese zu erkennen und auch zu lokalisieren. Prinzipiell sind Erweiterungen möglich, aber nicht realisiert. Die Auswahl der Bildpaare war von Zeitproblemen und der Tatsache beeinflusst, daß sehr viele Verfahren die Epipolargeometrie verwenden, dadurch wurden besonders oft die Epipolarbilder 1, 4, 7 und 10 gewählt.

Ansatz	Zuordnung	Angewandt auf Bilder	Standardaufgaben	Genauigkeitsklasse	Strategieklasse
1	R-CC	2	A	1	1
2	R-CC	1,2,7	A	1	1.5
3	R-CC	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12	A,B	1	2
4	R-CC	1,2,4,7,9,10,12	A	2	2
5	R-CC + M-P	1,2,7	B	1	2
6	M-R	2,3,4,6,7,10,12	B	3	3
7	R-CC	1	B	1	2.5
8	R-CC	1,4,10	A	2	1.5
9	R-CC/KQZ	1,2,4,7,10	A	1	2
10	R-CC/KQZ	1,2,3,7,11	B	1	2
11	R-CC/KQZ	1	B	1	1
12	R-CC/KQZ	1,4,7	A	1	1
13	R-KQZ + M-P	1,7,10	B	1	2
14	R-KQZ	1	B	1	1
15	R-Sim.	1,2,3,4,5,7,8,10	A	2	2
16	R-CC/KQZ + M-K	2,3,11,12	A,B	1	1
17	M-K	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12	B	2	3
18	M-K	1,4,7,10	A,B	2	3
19	M-K	1,7,10	A	2	2
20	M-P/K	1,10	A,B	2	2

**Tabelle 3.8** Übersicht über den Einsatz aller Ansätze in den verschiedenen Bildern und Standardaufgaben. Die Ansätze sind charakterisiert durch ihre Hauptklasse, d.h. die Art der Zuordnung, sowie ihre Zugehörigkeit zu einer Genauigkeits- und einer Strategiekategorie.

**Zuordnung**

- R-CC Rasterorientierte Zuordnung - Kreuzkorrelation
- R-KQZ -" - Kleinste Quadrate Zuordnung
- R-Sim. -" - Simulated Annealing
- M-P Merkmalsgestützte Zuordnung - Punktmerkmale
- M-K -" - Kanten
- M-R -" - Regionen

**Genauigkeitsklassen**

- (1) sehr genau
- (2) genau
- (3) weniger genau

**Strategieklassen**

- (1) starke manuelle Interaktion
- (2) hohe Automation mit Hierarchien/Prädiktion
- (3) hohe Automation ohne Hierarchien

In den Tabellen 3.9 a)-d) werden Abkürzungen für Zuordnung und für Genauigkeits- und Strategieklassen verwendet, wie sie bereits in Tabelle 3.8 eingeführt wurden; weitere sollen hier aufgelistet werden:

- Verdeckungen: Diese Rubrik steht auch für Bruchkanten und Mehrfachoberflächen
- Interaktion Start/Z/Kontr: Interaktion während der Initialisierung/ der Zuordnung/ der Konsistenzkontrolle
- DP: Dynamische Programmierung
- FB: Feature Bridging
- MPM: Multi Point Matching
- $\sigma_{px}$ : Standardabweichung der x-Parallaxe
- VLL: Vertical Line Locus (CC-Zuordnungsmethode)

Ansatz Nr.	1	2	3	4	5
<b>Hauptklasse</b>	R-CC	R-CC	R-CC	R-CC	R-CC + M-P
<b>Bilder</b>	2	1,2,7	1,2,3,4,5,6,7,8, 9,10,12	1,2,4,7,9,10,12	1,2,7
<b>Aufgaben</b>	A	A	A, B	A	B
<b>Genauigkeits- klasse</b>	1	1	1	2	1
<b>Strategie- klasse</b>	1	1.5	2	2	2
<b>Anwendungs- gebiete</b>	Elektronen- mikrosk bilder	Nahbereich (Industrie); DHM	Nahbereich; DHM	Bildfolgen; Deformations- analysen; Wolkenzug	Nahbereich (Industrie); DHM
<b>Merkmale</b>	---	---	Interestop. in einem Bild	Vektor mit Grau- wertmerkmalen (Mittel, Median, etc.)	Punkte; Interestoperator in jedem Bild
<b>Ähnlichkeits- maß</b>	Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$	Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$	Quadrat des normiert. Kreuz- korrelations- koeffizienten $\rho^*$	Korrelations- koeffizient (für Merkmals- vektoren)	Merkmalsmaße; Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$
<b>Geometrisches Objektmodell</b>	lokale horizont. Ebene (implizit)	lokale horizont. Ebene (implizit)	lokale horizont. Ebene (implizit)	lokale horizont. Ebene (implizit)	lokale horizont. Ebene (implizit)
<b>Zuordnungs- algorithmus</b>	CC (VLL) (subpixel); Hierarchie im DHM	CC (subpixel)+ Prädiktion	Hierarchische Zuordnung mit CC (+best first); bidirektional; Prädiktion in einer Stufe; subpixel	CC; Parallaxen- pyramide; Reduktion der Fenstergröße	FBM (Näherung) + CC (subpixel) + Prädiktion
<b>Verdeckungen</b>	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit, aber Disparitäten werden markiert	nicht explizit
<b>Steuer- parameter</b>	empirisch	empirisch	empirisch (auch Größe der Teilbilder)	empirisch (auch Gitter oder Regionen)	empirisch
<b>Initialisierung</b>	1 Startpunkt; Rel. Orientierung erforderlich	2 Startpunkte; grobe Orientierung; min-max Parallaxe	Nicht nötig, relative Orientierung wird berechnet	Rel. Orientierung erforderlich	grobe Orientierung; min-max Parallaxe
<b>Anpassung der Zuordnung</b>	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Fenstergrößen	?
<b>Qualitäts- kontrolle</b>	Operateur (graph. Display)	$\rho > 0.7$	Interne Tests, zB.: $\rho^* > 0.3$ zugeordnet J/N	$\rho$ ; y-Restparallaxen Nachbarschaft;	$\rho > 0.7$ ; y-Restparallaxen
<b>Interpolation der Ergebnisse</b>	Interpol. von Gitterpunkten	Nein	Nein	Gewichtet bilinear	Nein
<b>Auswahl der Bildpaare</b>	Zeitprobleme; epipolar erforderlich	Zeitprobleme; keine Software für Linienzuordnung	Nur Bild 11 gab keine Zuordnung	Versuche in 3, 6, 8, 11	Zeitprobleme; keine Software für Linienzuordnung
<b>Interaktion - Start/Z/Kontr</b>	Start und Verifikation	Start	Nein	Nein	Start
<b>Literatur</b>	Bethel, 1986 König, 1986 Li, R. 1988	---	Hannah, 1974, 1987, 1988	Straub, 1987	Dreschler, 1981 Förstner, 1986 Moravec, 1977

Tabelle 3.9a Kurzbeschreibungen der Ansätze 1-5.

Ansatz Nr.	6	7	8	9	10
<b>Hauptklasse</b>	M-R	R-CC	R-CC	R-CC/KQZ	R-CC/KQZ
<b>Bilder</b>	2,3,4,6,7,10,12	1	1,4,10	1,2,4,7,10	1,2,3,7,11
<b>Aufgaben</b>	B	B	A	A	B
<b>Genauigkeits- klasse</b>	3	1	2	1	1
<b>Strategie- klasse</b>	3	2.5	1.5	2	2
<b>Anwendungs- gebiete</b>	Nahbereich; Bildfolgen; DHM	DHM	DHM	DHM aus Luftbildern	DHM aus Luftbildern
<b>Merkmale</b>	Regionen + Beschreibung; Linien+Beschr. Relationen	---	---	---	Interestoperator in einem Bild; Kanten+Regionen
<b>Ähnlichkeits- maß</b>	Gewichtete Differenz zwischen Merkmals- beschreibungen	Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$	Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$	CC+Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$ KQZ (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen)	CC+Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$ KQZ (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen)
<b>Geometrisches Objektmodell</b>	lokale horizont. Ebene (implizit)	lokale geneigte Ebene (explizit)	lokale geneigte Ebene (explizit)	lokale Ebene CC (horizontal) KQZ (geneigt)	lokale Ebene CC (horizontal) KQZ (geneigt)
<b>Zuordnungs- algorithmus</b>	Hierarchische Regionen- zuordnung; Relaxation; best first li/re + re/li Zuordnung	CC (subpixel); Gitter im Objektraum	CC + Adaption der Zuordnungsfenster in Form und Größe; Prädiktion;	CC (subpixel) + KQZ (epipolar); 2 Auflösungs- stufen; Prädiktion	CC (subpixel) + KQZ (epipolar); 2 Auflösungs- stufen; Prädiktion
<b>Verdeckungen</b>	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit
<b>Steuer- parameter</b>	empirisch	empirisch	empirisch	empirisch	empirisch
<b>Initialisierung</b>	Segmentierung in Regionen	1 Startpunkt; Rel. Orientierung erforderlich	Näherungswerte für Parallaxen Epipolar erforderlich	Epipolar erforderlich	Epipolar erforderlich
<b>Anpassung der Zuordnung</b>	2-5 Iterationen in der Relaxation	Adaption der Fenstergrößen	Adaption der Steuerparameter	Beseitigung von Randproblemen	Beseitigung von Randproblemen
<b>Qualitäts- kontrolle</b>	Nein	y-Restparallaxen	$\rho > 0.3$ ; zugeordnet J/N	$\sigma_{px} < 0.2$	$\sigma_{px} < 0.2$
<b>Interpolation der Ergebnisse</b>	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
<b>Auswahl der Bildpaare</b>	Versuche: 5,11 schwache Segmentierung 1,8,9 keine Regionen	Zeitprobleme, nur 1 Bild	Nur Bilder in Epipolarform; keine Versuche in anderen	Aufgabe A wenn geeignet	Aufgabe B; alle versucht mit Ausnahme von Bildern 5,6
<b>Interaktion - Start/Z/Kontr</b>	Nein	1 Startpunkt	Startpunkte (1 Zeile/1 Spalte)	---	---
<b>Literatur</b>	Faugeras, 1981 Price, 1985, 1987	Boochs, 1987 Hartfiel, 1986, 1987	Norvelle, 1981	Claus, 1983 Piechel, 1986	Claus, 1983 Piechel, 1986

Tabelle 3.9b Kurzbeschreibungen der Ansätze 6-10.

Ansatz Nr.	11	12	13	14	15
<b>Hauptklasse</b>	R-CC/KQZ	R-CC/KQZ	R-KQZ + M-P	R-KQZ	R-SIM.
<b>Bilder</b>	1	1,4,7	1,7,10	1	1,2,3,4,5,7,8,10
<b>Aufgaben</b>	B	A	B	B	A
<b>Genauigkeits- klasse</b>	1	1	1	1	2
<b>Strategie- klasse</b>	1	1	2	1	2
<b>Anwendungs- gebiete</b>	DHM	Elektronen- mikroskopbilder	DHM	DHM; Qualitätskontrolle	Allgemeines Verfahren
<b>Merkmale</b>	---	---	Punkttripel (Zerocrossing + 2 Nachbarpunkte)	---	Laplace Pyramide
<b>Ähnlichkeits- maß</b>	CC+Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$ KQZ (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen)	CC+Kreuzkorrela- tionskoeffizient $\rho$ KQZ (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen)	FB (Kreuz- korrelations- koeffizient $\rho$ der Merkmalsmaße); MPM (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen)	KQZ (Quadrat- summe der Grau- wertdifferenzen) + Bedingungen (global)	Photometrische Ähnlichkeit der Grauwerte oder Ableitungen (Laplace)
<b>Geometrisches Objektmodell</b>	lokale Ebene CC (horizont.al) KQZ (geneigt)	lokale Ebene CC (horizont.al) KQZ (geneigt)	FB (lokale horizont. Ebene) MPM (KQZ global Gradienten- diskontinuitäten)	KQZ-lokal B1 (geneigte Ebene); KQZ global B2, B3 (Gradienten- diskontinuitäten)	Ebene, mit möglichen Diskontinuitäten
<b>Zuordnungs- algorithmus</b>	CC (subpixel) + KQZ; Hierarchie	CC (pixel) + KQZ; Hierarchie im DHM; Prädiktion; Adaption der Fenstergröße	FB (Maximierung von $\rho$ ) + MPM (KQZ, epipolar); Prädiktion	KQZ-lokal (Näherungswerte) + KQZ-global; Prädiktion	Simulated Annealing; Relaxaton; dichte Ergebnisse; Hierarchie grob nach fein
<b>Verdeckungen</b>	nicht explizit	nicht explizit	nicht explizit	Indikation	Indikation
<b>Steuer- parameter</b>	empirisch	empirisch	empirisch	empirisch	empirisch
<b>Initialisierung</b>	1 Startpunkt; CC Näherung für KQZ	1 Startpunkt; Rel. Orientierung erforderlich	Näherungswerte berechnet aus den Orientierungs- parametern	1 Startpunkt; Rel. Orientierung erforderlich	Min-max Parallaxen; Rel. Orientierung erforderlich
<b>Anpassung der Zuordnung</b>	Adaption der Fenstergrößen	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte und Fenstergrößen	Anpassung der Schwellwerte und Fenstergrößen	Keine Anpassung der Steuerparameter erforderlich
<b>Qualitäts- kontrolle</b>	$\sigma_{px}$ ; y-Restparallaxen	Operateur (graph. Display)	FB( $\rho$ ); MPM( $\sigma_{px}$ ); Zuordnung J/N	$\sigma_{px}$	Energieminimum je Bildelement
<b>Interpolation der Ergebnisse</b>	Nein	Interpol. von Gitterpunkten	Nein	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
<b>Auswahl der Bildpaare</b>	Zeitprobleme, nur 1 Bild	Zeitprobleme; Epipolar erforderlich	Epipolar erfordert Versuch in Bild 4	Zeitprobleme	?
<b>Interaktion - Start/Z/Kontr</b>	1 Startpunkt; Koordination von CC und KQZ	Start, Zuordnung und Verifikation	---	Startpunkt; Koordination	---
<b>Literatur</b>	Ackermann, 1983 Boochs, 1987 Hartfiel, 1986, 1987	Bethel, 1986 Benard, 1986 König, 1986 Li, R. 1988	Rosenholm, 1986 Zhang, 1988	Weisensee, 1987 Wrobel, 1987a,b	Barnard, 1986, 1987a, 1987b

Tabelle 3.9c Kurzbeschreibungen der Ansätze 11-15.

Ansatz Nr.	16	17	18	19	20
Hauptklasse	R-CC/KQZ + M-K	M-K	M-K	M-K	M-P/K
Bilder	2,3,11,12	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12	1,4,7,10	1,7,10	1,10
Aufgaben	A,B	B	A,B	A	A,B
Genauigkeitsklasse	1	2	2	2	2
Strategieklasse	1	3	2	2	2
Anwendungsgebiete	Elektronenmikroskopbilder	Nahbereich; Roboterarm	DHM	?	DHM aus Luftbildern
Merkmale	Kanten	Kanten (Liniensegmente); Nachbarschaftsgraph	Kanten (Zerocrossings oder Sobel) oder (CANNY)	Kanten (Zerocrossings)	Kanten (Zerocrossings); Textur von Regionen
Ähnlichkeitsmaß	CC+Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho$ KQZ (Quadratsum. der Grauwertdifferenzen); DP (Merkmalsunterschiede)	Unterschiede in den lokalen Merkmalsmaßen (Länge, Richtung, etc.)	lokale Merkmalsmaße (Kontrast Vorzeichen und Orientierung der Kante)	lokale Merkmalsmaße (Orientierung und Stärke, Vorzeichen der Krümmung)	Multiple Kriterien für Grauwerte und Ableitungen
Geometrisches Objektmodell	lokale Ebene CC (horizontal) KQZ (geneigt); DP (Diskontinuitäten)	Diskontinuitäten (Disparitätengradient)	Diskontinuitäten; Disparitäten Gradient = 1	Diskontinuitäten (explizit)	?
Zuordnungsalgorithmus	DP + CC (pixel) + KQZ; Hierarchie im DHM; Prädiktion; Adaption der Fenstergröße	Graphzuordnung der Liniensegmente; Relaxation; $l/r + r/l$ - Zuordnung	PMF; diskrete Relaxation; Miteinbeziehung der Nachbarschaft best first;	Kombinierte Zuordnung und Oberflächenrekonstruktion; Relaxation; grob nach fein	Multikriterion Zuordnung, Suchalgorithmus; best-first für Merkmale
Verdeckungen	nicht explizit	Gradientendiskontinuitäten	Gradientendiskontinuitäten	Diskontinuitäten werden erkannt und lokalisiert	nicht explizit
Steuerparameter	empirisch	empirisch ; Theorie des menschlichen Sehens	empirisch ; Theorie des menschlichen Sehens	empirisch ; Theorie des menschlichen Sehens	empirisch
Initialisierung	Rel. Orientierung erforderlich	Rel. Orientierung erforderlich; Min-max Parallaxen;	Rel. Orientierung erforderlich	Rel. Orientierung erforderlich	Rel. Orientierung erforderlich
Anpassung der Zuordnung	Anpassung der Schwellwerte	Grobe Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte	Anpassung der Schwellwerte
Qualitätskontrolle	Operateur (graph. Display)	Globale Verifikation der Hypothesen; Zuordnung $J/N$	Kontrast Stärke der Kanten; Zuordnung $J/N$	Prozentzahl erfolgreicher Zuordnungen	Multiple Kriterien
Interpolation der Ergebnisse	Interpol. von Gitterpunkten	Nein	Nicht gemessene Gitterpunkte	Nicht erforderlich	Interpolation der Gitterpunkte
Auswahl der Bildpaare	Zeitprobleme; Epipolar erforderlich	z.T. Zeitprobleme, nur Epipolarbilder; Bild 5 kein Ergebnis	Epipolar erforderlich	Zeitprobleme; Epipolar erforderlich; Bild 4 keine Ergebnisse	Nur Epipolarbilder
Interaktion - Start/Z/Kontr	Start, Zuordnung und Verifikation	---	---	---	---
Literatur	Bethel, 1986 Benard, 1986 König, 1986 Li, R. 1988	Ayache, 1987 Henriksen, 1986	Day, 1988, Frisby, 1987 Pollard, 1985	Olsen, 1986	Lin, 1986 Lin, 1988

Tabelle 3.9d Kurzbeschreibungen der Ansätze 16-20.

### 3.3 Testauswertung

Die Testauswertung wurde zentral vom Verfasser vorgenommen. Insgesamt wurden von den Teilnehmern 109 Sätze von Parallaxenmessungen der Hauptaufgaben A und B eingereicht. Die Testauswertung konzentrierte sich auf die Anwendbarkeit, insbesondere auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit und auf die Abhängigkeit vom Bildinhalt. Rechenzeiten oder spezielle Hardware waren nicht von Bedeutung. Als Methode der Überprüfung wurden Vergleichsmessungen zu den von den Teilnehmern ermittelten Parallaxen analysiert. Die Vergleichsmessungen (3.3.1) wurden vorab in Form von Sollwerten rechnerisch ermittelt oder aber in der großen Mehrzahl der Fälle durch konventionelle, photogrammetrische Punktmessung am Analytischen Plotter im Originalbildmaterial durchgeführt. In diesen Fällen war die Genauigkeit der manuellen Vergleichsmessung zur weiteren Beurteilung zu ermitteln (3.3.2).

Als Ergebnis der Vergleiche zwischen den Teilnehmermessungen und den Vergleichsmessungen erhielt man Parallaxendifferenzen an ausgewählten Punkten, woraus sich mehrere Qualitätsmaße bezüglich Zuverlässigkeit und Genauigkeit ableiten ließen (3.3.3).

#### 3.3.1 Art der Vergleichsmessungen

Für das Bildpaar 1 (CAR I) waren die Sollparallaxen vorab bekannt. Dies war den Teilnehmern des Tests von vornherein nicht bekannt. Damit konnte die Genauigkeit der Zuordnung überprüft werden, ohne auf das menschliche Stereosehen angewiesen zu sein. Bildpaar 1 wurde aus einem Bild generiert unter Zuhilfenahme der Epipolarbedingung und einem Modell für die x-Parallaxen. Das linke Bild wurde direkt von einem abgetasteten Bild übernommen und gaußverteiltes Rauschen addiert. Für das rechte Bild wurden die Parallaxen im Parallaxenmodell interpoliert und die Grauwerte mit einer linearen radiometrischen Transformation und additivem Rauschen versehen. Die Parallaxenwerte der Teilnehmer für dieses Bildpaar wurden rechnerisch überprüft.

Für die Bildpaare 2-12 wurden die Original Negative und Positive verwendet, um die Zuordnungen durch einen erfahrenen Operateur (Dipl.-Ing. Markus English) zu überprüfen. Es wurden ein photogrammetrisches analytisches Stereoauswertegerät (PLANICOMP C100) benutzt, das eine Bestimmung der Parallaxen mit 2-4  $\mu\text{m}$  im Bildmaßstab erlaubt, was ungefähr 0.1-0.2 Pixel in den Testbildern entspricht. Der Operateur hielt einen vom Teilnehmer gemessenen Punkt in einem Bild fest und bestimmte den homologen Punkt im anderen Bild. Die x-Parallaxe wurde dann mit der x-Parallaxe des Teilnehmers für diesen Punkt verglichen. Es wurden insgesamt 25000 Parallaxenmessungen auf diese Art durchgeführt. In den Fällen, bei denen das gelieferte Gitter des Teilnehmers für die Standardaufgabe A zu dicht war, wurde nur eine reduzierte Anzahl gemessen. Für die Standardaufgabe B wurden maximal 500 Punkte gemessen, die zufällig ausgewählt wurden, wenn die ursprüngliche Zahl höher war. Dies gilt nicht für Bildpaar 1, dort wurden alle Messungen überprüft, da hierzu Sollwerte vorlagen.

Festzuhalten bleibt, daß im folgenden nur die Ergebnisse für die x-Parallaxenmessungen dargestellt werden, da diese die Höheninformation liefern. Für die Epipolarbildpaare wurden meist keine y-Parallaxen gemessen und die restlichen Bilder wurden oftmals in Epipolargeometrie umgewandelt, so daß auch hierfür keine y-Parallaxen vorliegen. Damit bleibt eine kleine Zahl von Teilnehmerdatensätzen übrig, die y-Parallaxenmeßwerte bereitstellen. Auf eine Analyse dieser Messungen wurde verzichtet, da sie durch die kleine Zahl keine Aussagen erlauben würden, die über die der x-Parallaxenuntersuchung hinaus gehen.

#### 3.3.2 Genauigkeit der manuellen Vergleichsmessungen

Bei einer Reihe von Fällen, bei denen die Genauigkeit nicht extrem ist, sind die Differenzen praktisch die Genauigkeit des Zuordnungsverfahrens. In den Fällen der automatischen hochgenauen Parallaxenmessung liegt die Genauigkeit in der gleichen Größenordnung wie die der manuellen Messung, die somit festgestellt werden sollte.

Um Information über die Genauigkeit des menschlichen Operateurs zu erhalten wurden mehrere zufällig ausgewählte Teilnehmerdatensätze aus den Bildpaaren, mit Ausnahme von Bildpaar 1 und 6, vom Operateur zweifach gemessen und aus allen Daten eine Standardabweichung  $\sigma_{\text{man}}$  gerechnet. Aus den Messungen (zwischen 100 und 400 Punkten pro

Datensatz) kann eine mittlere Standardabweichung für eine Parallaxenmessung von  $\sigma_{\text{man}} = 3.6 \mu\text{m}$  bzw.  $\approx 0.2$  Pixel abgeleitet werden. Die Ergebnisse schwanken etwas von Bildpaar zu Bildpaar mit einem Minimalwert von  $\sigma_{\text{man}} = 2.2 \mu\text{m}$  bzw.  $\approx 0.15$  Pixel und dem schlechtesten Ergebnis in Bildpaar 4, das einen sehr geringen Kontrast aufweist, mit  $\sigma_{\text{man}} = 5.4 \mu\text{m}$  bzw.  $\approx 0.28$  Pixel. Bei der Umrechnung von  $\mu\text{m}$  in Pixel ist zu beachten, daß die Pixelgrößen nicht in allen Bildern gleich sind, sondern zwischen ca.  $15.5 \mu\text{m}$  und  $18.5 \mu\text{m}$  variieren. Insgesamt sind die manuellen Vergleichsmessungen als sehr genau zu betrachten. Im Vergleich mit den automatischen Verfahren sind sie bei den hochgenauen Verfahren nicht zu vernachlässigen. Absolute Angaben über die Genauigkeit der automatischen Punktmessung sind am einfachsten über die Ergebnisse in Bild 1 zu erhalten, wo Sollwerte vorlagen, die nicht manuell bestimmt waren. In allen anderen Bildern ist zu beachten, daß die eigentlichen Zuordnungsverfahren genauer sind als die Genauigkeitsangaben aus den Differenzen zu den manuellen Messungen aussagen.

### 3.3.3 Qualitätsmaße zur vergleichenden Beurteilung der empirischen Testergebnisse

Die Qualitätsmaße setzen sich aus der **Zuverlässigkeit** (Zahl der Ausreißer) und der **Genauigkeit** zusammen. Aus den Parallaxendifferenzen (nur x-Parallaxen) zwischen den Werten der Teilnehmer und den Sollwerten bzw. den manuellen Vergleichsmessungen wurden mehrere Maße wie Bereiche, Schwellwerte für Ausreißer und Standardabweichungen abgeleitet und für jeden Datensatz getrennt berechnet.

Bezüglich der Zuverlässigkeit wurde für jeden Datensatz zuerst ein **Bereich der Differenzen** angegeben, also die Größe der maximalen **Ausreißer** in den Differenzen (Teilnehmer minus Vergleich). Es wird zwischen maximalen negativen (MIN) und maximalen positiven (MAX) Ausreißern unterschieden

$$\text{MIN} = \min (dx_i) \quad dx_i = \text{x-Parallaxendifferenzen} \quad (3-1)$$

$$\text{MAX} = \max (dx_i) \quad dx_i = \text{x-Parallaxendifferenzen} \quad (3-2)$$

Für realistische Genauigkeitsangaben ist es wünschenswert, Ausreißer zu eliminieren. Man braucht dazu ungefähre Angaben über die Verteilung. Zu dem Zweck wird der **Medianwert** (MED) aller Parallaxendifferenzen ( $dx_i$ ) in einem Datensatz berechnet. Dieser gibt eine robuste Schätzung für den Mittelwert. Um die zugehörige **Standardabweichung** zu schätzen wird die Median Absolut Differenz (MAD) berechnet, also der Medianwert der Absolutdifferenzen zum Median

$$\text{MAD} = \text{med} (|dx_i - \text{MED}|) \quad dx_i = \text{x-Parallaxendifferenzen} \quad (3-3)$$

Zieht man die asymptotischen Eigenschaften der Median Absolut Differenz zur Normalverteilung in Betracht, so läßt sich eine robuste Standardabweichung  $\sigma_{dx}$ (MAD) schätzen nach

$$\sigma_{dx} (\text{MAD}) = \text{MAD}/0.6745 \approx 1.5 \times \text{MAD} \quad (3-4)$$

unter der Annahme, daß die Parallaxendifferenzen normalverteilt sind (Hahn, 1988). Der Wert  $0.6745 = \Phi^{-1}(0.75)$  läßt sich aus der inversen kumulativen Normalverteilung ableiten. Mit Hilfe von  $\sigma_{dx}$  wurden grobe Ausreißer in den Differenzen eliminiert.

Auf dieser Basis werden zwei interne **Schwellwerte**  $N_{\text{max, min}}$  zur Bestimmung von **Ausreißern** berechnet

$$N_{\text{max, min}} = \text{med} \{x_i\} \pm 3 \sigma_{dx} \quad (3-5)$$

Alle Parallaxendifferenzen außerhalb des Intervalls  $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}]$  werden als Ausreißer betrachtet. Dieser Schwellwert beruht auf der robust geschätzten empirischen Genauigkeit, womit die Zahl der Ausreißer ein Maß dafür gibt, inwieweit die Differenzen einer Normalverteilung folgen, bzw. wie homogen die Daten sind. Eine hohe Prozentzahl von Ausreißern weist dabei auf eine geringe Zuverlässigkeit hin. Im folgenden wird die Zahl der Ausreißer unterhalb des

unteren Schwellwertes unter der Bezeichnung „N-“ und die oberhalb des oberen Schwellwertes liegenden unter der Bezeichnung „N+“ aufgeführt. Die Summe dieser Ausreißer wird unter „N“ in Prozent angegeben.

Es hat sich gezeigt, daß dieses Maß nicht immer für Vergleiche geeignet ist, da die Verteilung der Parallaxendifferenzen nicht in allen Fällen einer Normalverteilung entspricht, z.B. wenn Ausreißer einseitig vorliegen. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Zuverlässigkeitsmaß eingeführt, das für alle Ansätze und für alle Bilder konstant ist. Es legt ebenfalls die Zahl von Ausreißern zu Grunde. Als **Grenzwerte**  $K_{max,min}$  werden  $\pm 8$  Pixel in den Differenzen festgelegt

$$K_{max,min} = \pm 8 \text{ Pixel} \tag{3-6}$$

Die Zahl der Ausreißer unterhalb  $K_{min}$  wird unter der Bezeichnung „K-“ und die über  $K_{max}$  unter der Bezeichnung „K+“ aufgeführt. Auch hier wird die Summe der Ausreißer in Prozent angegeben, in diesem Fall unter der Bezeichnung „K“.

$N_{min,max}$  und  $K_{min,max}$  sind also immer gemeinsam zu bewerten. Die Schwellwerte  $N_{min,max}$  haben den Vorteil, daß diese Werte intern berechnet werden können, unter der Annahme der Normalverteilung der Parallaxendifferenzen. Die absoluten Schwellwerte  $K_{min,max}$  müssen dagegen vom Bearbeiter vorgegeben werden und müssen angepaßt sein, da ansonsten zu viele oder zu wenige Ausreißer eliminiert werden.

Für die Berechnung eines robusten Mittelwertes und einer Standardabweichung werden im folgenden nur die intern berechneten Schwellwerte ( $N_{min,max}$ ) zur Eliminierung der Ausreißer verwendet. Aus den akzeptierten Differenzen, d.h. also ohne Ausreißer, wird als Maß für die Genauigkeit der BIAS (3-7), der Mittelwert der Differenzen, und die robuste Standardabweichung (3-8), hier als RMS bezeichnet, berechnet.

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^{P^*} dx_i}{P^*} \quad \text{mit } dx_i = \text{Differenz}_i \text{ (ohne Ausreißer)} \tag{3-7}$$

$P^* = \text{Zahl der Vergleichsmessungen (ohne Ausreißer)}$

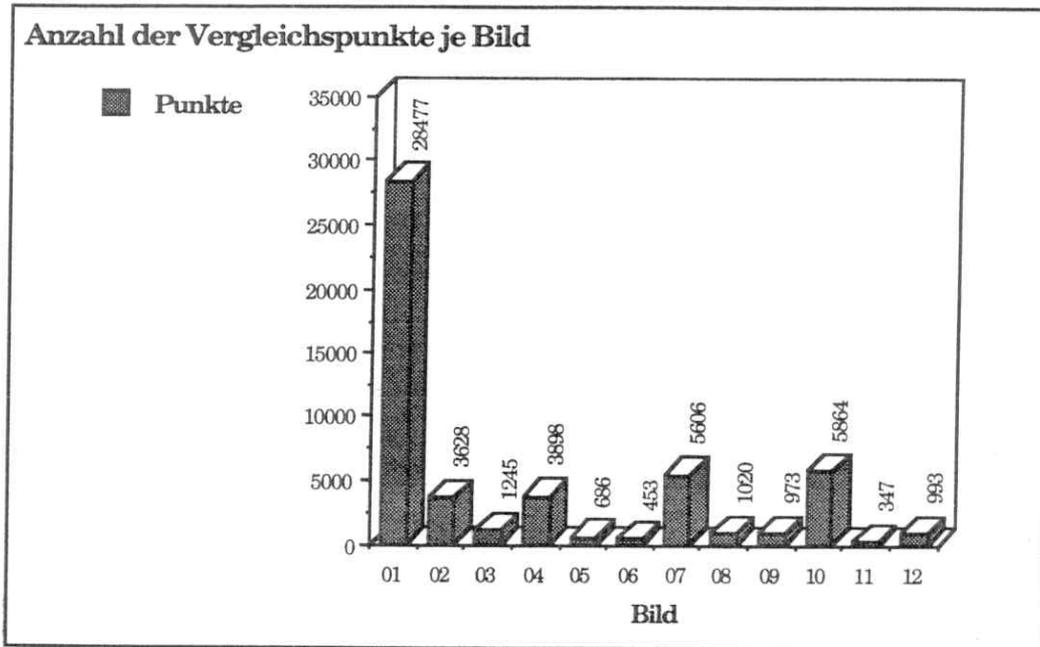
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{P^*} (dx_i - \text{Bias})^2}{P^* - 1}} \quad \text{mit } dx_i = \text{Differenz}_i \text{ (ohne Ausreißer)} \tag{3-8}$$

$P^* = \text{Zahl der Vergleichsmessungen (ohne Ausreißer)}$

### 3.4 Ergebnisse im Überblick

Nach den im vorigen Kapitel 3.3 beschriebenen Methoden wurden alle von den Teilnehmern eingereichten Lösungen der Standardaufgaben überprüft. In den 109 Datensätzen wurden an ca. 53000 Punkten x-Parallaxen verglichen, wobei ca. 25000 der Vergleichsmessungen manuell ermittelt worden sind. Die Vergleiche zum Bild 1 wurden am Rechner mit den gegebenen Sollwerten durchgeführt. Die Verteilung der Häufigkeit der Vergleichsmessungen je Bild ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Deutlich ist zu sehen, daß in den epipolar vorgegebenen Bildpaaren 1,4,7 und 10 die meisten Punkte gemessen wurden. In den anderen Bildpaaren ist die Zahl der Vergleichsmessungen dort besonders gering, wo nur die Standardaufgabe B bearbeitet wurde. Die Zahl der gelieferten Meßwerte vor allem in der Standardaufgabe A war insgesamt noch viel größer, mußte aber aus Gründen des enormen Aufwands für eine manuelle Vergleichsmessung auf ein realistisches Maß reduziert werden.



**Abbildung 3.2** Anzahl der Vergleichspunkte je Bild(paar) als Summe über alle Teilnehmer. Bild 1 wurde nicht manuell verglichen.

Es folgt nun eine Gesamtübersicht aller numerischen Ergebnisse der 109 Datensätze, geordnet nach Bild und Teilnehmernummer. Folgende Werte sind in den Tabellen 3.10a-c aufgeführt.

<b>B</b>	= Bildpaar Nr.
<b>File</b>	= Datensatz. Der Filename enthält folgende Codierung:
TnnIkkXi	= Teilnehmer nn
Ikk	= Bildpaar kk
Xi	= A (Aufgabe A, i-te Variante)
	= B (Aufgabe B, i-te Variante)
	= F1/2 (Aufgabe B, gefiltert nach Kontinuitätsbedingung, 1 Marr-Hildreth- 2 Sobel Operator)
	= S1/2 (Aufgabe B, nicht gefiltert, 1 Marr-Hildreth- 2 Sobel Operator)
	= N (500 Punkte zufällig ausgewählt)
	= Y (y-Parallaxen in Epipolarbildern; nicht berücksichtigt)
<b>P</b>	= Anzahl der Vergleichspunkte
<b>MIN/MAX [pel]</b>	= Minimale und Maximale Differenzen der x-Parallaxenmessungen
<b>K- /K+ [Anzahl]</b>	= Ausreißer nach Schwellwerten in Gl. (3-6)
<b>K [%]</b>	= Summe der Ausreißer nach K- und K+
<b>N- /N+ [Anzahl]</b>	= Ausreißer nach Schwellwerten in Gl. (3-5)
<b>N [%]</b>	= Summe der Ausreißer N- und N+
<b>Bias [pel]</b>	= „robuster“ Mittelwert nach Gl. (3-7)
<b>RMS [pel]</b>	= „robuste“ Standardabweichung nach Gl (3-8)
<b>A</b>	= Ansatz Nr.

Diese Tabellen 3.10a-c werden hier noch nicht eingehend kommentiert. Sie bilden die Grundlage aller weiteren spezifischen Untersuchungen, die gemäß den Fragestellungen (siehe Tabelle 3.1) durchgeführt wurden und die in den weiteren Abschnitten des Kapitel 3 aufgeführt werden. Im folgenden werden zunächst die Fragen der Anwendbarkeit und der Flexibilität der Verfahren besprochen (3.5) sowie die Randbedingungen, bzw. Anforderungen an Vorwissen (3.6), ehe die Hauptfrage der Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsergebnisse behandelt wird (3.7). Die Methoden der Selbstdiagnose werden in Abschnitt 3.8 behandelt. In Abschnitt 3.9 wird abschließend eine Gesamtbewertung vorgenommen.

B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
1	T01I01A	529	-1.30	11.80	0	1	0.2	48	19	12.7	-0.08	0.31	15
	T02I01A	529	-2.25	9.80	0	1	0.2	4	7	2.1	0.08	0.37	20
	T02I01B	339	-0.85	0.90	0	0	0.0	5	6	3.2	0.01	0.24	20
	T03I01A	515	-0.64	1.66	0	0	0.0	3	12	2.9	0.01	0.21	9
	T03I01B	258	-0.59	0.72	0	0	0.0	4	12	6.2	-0.02	0.18	10
	T04I01A	507	-0.95	0.94	0	0	0.0	4	9	2.6	0.00	0.23	3
	T04I01B	330	-0.82	0.82	0	0	0.0	3	5	2.4	0.00	0.21	3
	T05I01B	243	-0.72	1.57	0	0	0.0	1	6	2.9	0.01	0.23	13
	T07I01A	1755	-17.70	12.00	45	4	2.8	123	16	7.9	0.73	1.45	8
	T08I01A	529	-0.84	2.40	0	0	0.0	1	14	2.8	0.01	0.26	2
	T08I01B	95	-1.00	7.21	0	0	0.0	2	3	5.3	0.00	0.24	5
	T09I01A	2025	-0.62	0.95	0	0	0.0	13	21	1.7	0.04	0.20	12
	T10I01B	956	-21.22	35.15	13	38	5.3	39	71	11.5	0.02	0.76	17
	T11I01B	485	-4.39	8.69	0	1	0.2	11	10	4.3	-0.08	0.77	17
	T12I01A	529	-5.12	12.34	0	9	1.7	14	61	14.2	0.01	0.49	19
	T13I01B1	256	-0.52	0.75	0	0	0.0	0	6	2.3	0.01	0.21	14
	T13I01B2	256	-1.43	1.59	0	0	0.0	3	3	2.3	0.02	0.43	14
	T13I01B3	256	-1.56	2.30	0	0	0.0	0	1	0.4	0.00	0.59	14
	T14I01F1	3728	-11.50	36.30	8	25	0.9	72	89	4.3	-1.01	1.04	18
	T14I01F2	2386	-31.10	43.60	89	133	9.3	257	157	17.4	-1.30	1.54	18
	T14I01S1	4555	-27.40	36.30	19	49	1.5	112	124	5.2	-1.01	1.05	18
	T14I01S2	3317	-35.09	50.90	164	248	12.4	363	290	19.7	-1.47	1.79	18
	T15I01A	528	-1.44	1.25	0	0	0.0	7	6	2.5	-0.08	0.31	18
	T15I01B	524	-75.53	3.67	5	0	1.0	33	14	9.0	-0.10	0.39	18
	T16I01B1	437	-0.54	0.69	0	0	0.0	2	10	2.7	0.00	0.17	7
	T16I01B2	437	-0.42	0.60	0	0	0.0	3	12	3.4	0.01	0.14	11
	T17I01A	2173	-3.00	3.00	0	0	0.0	123	125	11.4	-0.01	0.29	4
B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
2	T01I02A	499	-30.00	23.41	99	24	24.6	128	38	33.3	-0.09	0.70	15
	T03I02A	491	-3.71	2.47	0	0	0.0	23	10	6.7	-0.06	0.23	9
	T03I02B	250	-1.94	2.76	0	0	0.0	6	9	6.0	-0.16	0.27	10
	T04I02A	437	-2.28	1.05	0	0	0.0	1	0	0.2	-0.33	0.56	3
	T04I02B	249	-2.05	3.41	0	0	0.0	6	2	3.2	-0.17	0.30	3
	T06I02B	5	-9.15	49.58	1	3	80.0	0	0	0.0	16.01	26.54	6
	T08I02AN	435	-3.05	1.05	0	0	0.0	7	1	1.8	-0.34	0.54	2
	T08I02BN	43	-2.99	0.16	0	0	0.0	10	0	23.3	-0.05	0.10	5
	T09I02A	289	-6.59	9.24	0	1	0.3	3	10	4.5	-0.15	1.08	1
	T09I02BN	52	-0.67	0.28	0	0	0.0	1	0	1.9	-0.04	0.19	16
	T10I02B	402	-64.17	52.62	24	35	14.7	29	46	18.7	-0.49	1.60	17
	T17I02AN	476	-2.33	7.30	0	0	0.0	1	36	7.8	0.03	0.77	4

**Tabelle 3.10a** Ergebnisse der Differenzen der x-Parallaxen Vergleichsmessungen für die Bildpaare 1 und 2.

**B** (Bildpaar)

**File** (Datensatz mit Codierung, siehe oben)

**P** [Anzahl]

**K-/K+** [Anzahl] **K** [%]

**BIAS** [pel] **RMS** [pel]

**MIN/MAX** [pel]

**N-/N+** [Anzahl] **N** [%]

**A** [Ansatz Nr.]

B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
3	T01I03A	475	-26.50	55.15	15	97	23.6	19	115	28.2	0.39	1.23	15
	T03I03B	78	-0.41	0.99	0	0	0.0	4	2	7.7	0.06	0.12	10
	T04I03B	139	-0.94	1.86	0	0	0.0	1	4	3.6	0.19	0.38	3
	T06I03B	15	-7.42	18.50	0	2	13.3	1	2	20.0	0.71	1.67	6
	T09I03A	434	-2.89	6.26	0	0	0.0	10	26	8.3	0.08	0.59	16
	T10I03B	104	-13.01	6.43	1	0	1.0	6	8	13.5	0.47	0.90	17
B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
4	T01I04A	529	-3.26	25.76	0	120	22.7	0	129	24.4	0.74	1.76	15
	T03I04A	428	-2.84	6.85	0	0	0.0	2	20	5.1	0.33	0.73	9
	T04I04B	169	-5.44	5.77	0	0	0.0	3	12	8.9	0.29	0.81	3
	T06I04BY	7	-4.35	20.36	0	3	42.9	0	0	0.0	7.86	12.83	6
	T07I04AN	418	-9.50	20.36	3	98	24.2	1	31	7.7	3.02	5.30	8
	T09I04AY	165	-13.32	28.24	3	18	12.7	7	23	18.2	0.29	1.61	12
	T10I04B	350	-92.43	89.13	108	76	52.6	32	26	16.6	-2.24	14.70	17
	T11I04BN	341	-35.92	69.44	42	89	38.4	22	73	27.9	-0.25	5.74	17
	T14I04FN	385	-34.34	75.86	36	240	71.7	0	0	0.0	19.32	29.51	18
	T14I04SN	362	-38.23	75.25	45	218	72.7	0	0	0.0	17.88	29.31	18
	T15I04B	327	-89.89	22.24	19	8	8.3	25	23	14.7	-0.48	1.55	18
	T17I04AN	417	-6.90	3.70	0	0	0.0	33	7	9.6	0.21	0.77	4
B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
5	T01I05A	506	-8.14	3.16	3	0	0.6	7	21	5.5	-5.41	5.44	15
	T04I05B	180	-8.88	0.88	1	0	0.6	6	1	3.9	-0.25	0.34	3
B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
6	T04I06B	109	-0.77	238.46	0	1	0.9	24	23	43.1	0.00	0.00	3
	T06I06B	14	-1.60	11.46	0	2	14.3	0	0	0.0	4.75	6.10	6
	T10I06B	330	-8.81	8.14	1	1	0.6	8	14	6.7	0.00	0.76	17
B	FILE	P	MIN	MAX	K-	K+	K	N-	N+	N	BIAS	RMS	A
7	T01I07A	529	-10.35	64.84	3	109	21.2	13	131	27.2	-0.05	0.46	15
	T03I07A	441	-2.37	9.44	0	1	0.2	5	23	6.3	-0.15	0.42	9
	T03I07B	225	-1.53	17.20	0	1	0.4	1	13	6.2	-0.18	0.39	10
	T04I07B	260	-1.40	4.35	0	0	0.0	4	12	6.2	-0.12	0.27	3
	T05I07B	165	-2.88	5.75	0	0	0.0	4	6	6.1	-0.15	0.62	13
	T06I07BY	7	-4.22	38.95	0	1	14.3	0	1	14.3	-1.52	2.78	6
	T08I07AY	293	-3.07	10.49	0	1	0.3	7	18	8.5	0.08	0.49	2
	T08I07B	65	-1.91	1.40	0	0	0.0	2	1	4.6	-0.22	0.40	5
	T09I07AY	214	-49.17	29.10	10	11	9.8	15	21	16.8	0.02	0.21	12
	T10I07B	544	-40.08	56.15	46	46	16.9	63	65	23.5	-0.13	1.13	17
	T11I07B	127	-5.88	8.06	0	1	0.8	10	8	14.2	0.04	0.64	17
	T12I07AN	529	-10.23	19.51	1	61	11.7	3	72	14.2	-0.36	2.22	19
	T14I07FN	351	-30.37	64.46	3	21	6.8	39	58	27.6	-0.01	0.19	18
	T14I07SN	387	-31.07	63.76	8	28	9.3	23	50	18.9	0.06	0.39	18
	T15I07A	528	-16.24	18.62	9	27	6.8	29	67	18.2	0.06	0.49	18
T15I07B	491	-25.89	43.30	13	29	8.6	50	76	25.7	0.03	0.41	18	
T17I07AN	450	-15.28	14.01	6	2	1.8	35	29	14.2	-0.09	0.42	4	

**Tabelle 3.10b** Ergebnisse der Differenzen der x-Parallaxen Vergleichsmessungen für die Bildpaare 3 bis 7. (Erläuterungen der Bezeichnungen siehe oben in Tabelle 3.10 a)

<b>B</b>	<b>FILE</b>	<b>P</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>K-</b>	<b>K+</b>	<b>K</b>	<b>N-</b>	<b>N+</b>	<b>N</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMS</b>	<b>A</b>
<b>8</b>	T01I08A	474	-16.90	60.44	38	90	27.0	43	91	28.3	0.12	2.60	15
	T04I08B	196	-2.00	8.47	0	1	0.5	2	39	20.9	0.11	0.32	3
	T10I08B	350	-13.33	21.20	8	27	10.0	19	55	21.1	0.24	1.01	17
<b>B</b>	<b>FILE</b>	<b>P</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>K-</b>	<b>K+</b>	<b>K</b>	<b>N-</b>	<b>N+</b>	<b>N</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMS</b>	<b>A</b>
<b>9</b>	T04I09B	168	-2.11	23.61	0	2	1.2	64	19	49.4	0.00	0.00	3
	T10I09B	448	-226.28	83.73	92	108	44.6	56	79	30.1	-0.47	6.41	17
	T17I09AN	357	-54.16	49.06	44	19	17.6	50	31	22.7	-0.12	1.35	4
<b>B</b>	<b>FILE</b>	<b>P</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>K-</b>	<b>K+</b>	<b>K</b>	<b>N-</b>	<b>N+</b>	<b>N</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMS</b>	<b>A</b>
<b>10</b>	T01I10AN	529	-4.40	6.17	0	0	0.0	15	11	4.9	0.18	0.65	15
	T02I10AN	529	-5.60	7.22	0	0	0.0	11	28	7.4	0.47	0.85	20
	T02I10B	290	-1.65	4.07	0	0	0.0	3	9	4.1	0.31	0.54	20
	T03I10AN	529	-3.41	4.73	0	0	0.0	25	30	10.4	0.21	0.47	9
	T04I10B	194	-0.86	1.90	0	0	0.0	1	16	8.8	0.14	0.27	3
	T05I10B	251	-8.42	16.35	1	1	0.8	4	8	4.8	0.47	0.73	13
	T06I10BY	15	-15.84	14.13	3	2	33.3	3	3	40.0	0.54	0.66	6
	T07I10AN	440	-33.71	17.41	98	52	34.1	29	0	6.6	-0.18	7.23	8
	T10I10B	356	-10.98	15.63	2	9	3.1	17	21	10.7	0.40	0.99	17
	T11I10B	489	-14.40	12.29	8	2	2.0	28	18	9.4	0.47	1.25	17
	T12I10A	529	-8.55	7.88	1	0	0.2	13	17	5.7	0.47	1.40	19
	T14I10FN	397	-28.79	37.58	16	19	8.8	31	34	16.4	0.23	0.56	18
	T14I10SN	345	-28.45	36.86	13	14	7.8	34	37	20.6	0.20	0.52	18
	T15I10B	442	-102.52	52.90	53	11	14.5	67	17	19.0	0.12	0.83	18
	T17I10AN	529	-3.88	6.57	0	0	0.0	13	16	5.5	0.17	0.75	4
<b>B</b>	<b>FILE</b>	<b>P</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>K-</b>	<b>K+</b>	<b>K</b>	<b>N-</b>	<b>N+</b>	<b>N</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMS</b>	<b>A</b>
<b>11</b>	T03I11B	60	-0.33	0.87	0	0	0.0	10	10	33.3	0.00	0.00	10
	T09I11A	175	-2.14	2.16	0	0	0.0	1	5	3.4	-0.27	0.64	16
	T10I11B	112	-155.41	138.63	3	10	11.6	5	19	21.4	-0.12	0.69	17
<b>B</b>	<b>FILE</b>	<b>P</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>K-</b>	<b>K+</b>	<b>K</b>	<b>N-</b>	<b>N+</b>	<b>N</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMS</b>	<b>A</b>
<b>12</b>	T04I12B	92	-0.76	4.69	0	0	0.0	0	5	5.4	0.13	0.43	3
	T06I12B	15	-8.73	24.58	1	3	26.7	0	1	6.7	1.47	5.42	6
	T09I12A	298	-9.27	25.58	1	7	2.7	10	25	11.7	0.28	0.88	16
	T09I12BN	40	-0.60	2.92	0	0	0.0	0	7	17.5	0.13	0.32	16
	T10I12B	148	-15.08	43.20	2	7	6.1	4	15	12.8	0.30	1.39	17
	T17I12AN	400	-27.50	29.90	17	5	5.5	28	57	21.3	0.25	0.63	4

**Tabelle 3.10c** Ergebnisse der Differenzen der x-Parallaxen Vergleichsmessungen für die Bildpaare 8-12.

**B** (Bildpaar)  
**File** (Datensatz mit Codierung, siehe oben)  
**P** [Anzahl] **MIN/MAX** [pel]  
**K-/K+** [Anzahl] **K** [%] **N-/N+** [Anzahl] **N** [%]  
**BIAS** [pel] **RMS** [pel] **A** [Ansatz Nr.]

### 3.5 Anwendbarkeit und Flexibilität der Verfahren

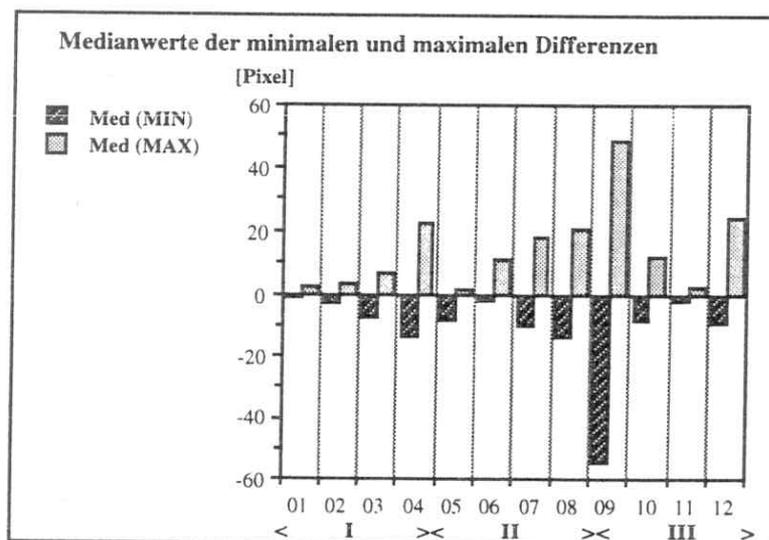
Zunächst war wichtig zu sehen, ob bzw. wann die Ansätze überhaupt funktioniert haben. Eine Reihe von Verfahren wurde nur auf eine begrenzte Zahl von Bildern angewandt, wie schon aus Tabelle 3.8 hervorgeht. Hinsichtlich der **Anwendbarkeit** werden zunächst alle 20 Ansätze gemeinsam betrachtet.

Der Auswahl der Bilder lag eine Einteilung in drei verschiedene geometrische Komplexitätsstufen zugrunde (siehe Tabelle 3.3). Die Abhängigkeit von der **Komplexität der Oberfläche** soll hier besonders betrachtet werden. Für jedes Bildpaar werden dazu die Ergebnisse aller Teilnehmer zusammengefaßt und der jeweilige Medianwert (50% Wert) der Qualitätsmaße MIN, MAX, K, N, Bias und RMS (siehe 3.3.3) aller beteiligten Datensätze angegeben und diskutiert (3.5.1). Der Medianwert wurde als robustes Vergleichsmaß gewählt, da eine Mittelbildung je Bild und aller Bilder in einer Komplexitätsstufe keine objektive Beurteilung der verschiedenen Ansätze erlaubt. Von weiterem Interesse war die Abhängigkeit vom **Bildmaßstab**. Auch hierzu werden zusammenfassend für jede Maßstabsklasse (siehe 3.1.1) Medianwerte der Qualitätsmaße angegeben und diskutiert (3.5.2).

Hinsichtlich der **Flexibilität** der Ansätze war von größtem Interesse, wie der gleiche Ansatz auf unterschiedliche Bilder reagiert. Hierzu sollen 7 ausgewählte Ansätze für sich betrachtet werden, die auf mindestens fünf Bildpaare angewandt worden sind, womit statistisch aussagekräftige Beurteilungen möglich werden (3.5.3).

#### 3.5.1 Abhängigkeit von der Komplexität der Objektoberfläche

Die drei Komplexitätsstufen (gering, mittel, hoch) waren subjektiv bei der Auswahl der Bilder festgelegt worden, wobei als Hauptkriterium die **Komplexität der Oberfläche** verwendet wurde. Betrachtet man zuerst den Bereich der maximalen Ausreißer (MIN, MAX), so gibt der Medianwert aller Datensätze ein robustes Maß für die Beurteilung. In Abbildung 3.3 sind die Medianwerte der minimalen und maximalen Differenzen (Median(MIN), Median(MAX)) aller Datensätze im jeweiligen Bild markiert.

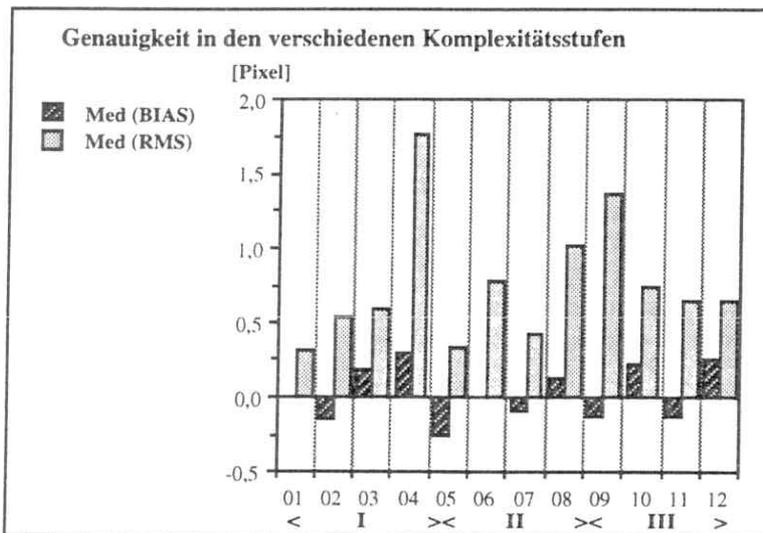


**Abbildung 3.3** Medianwerte der minimalen und maximalen x-Parallaxendifferenzen (Med(MIN), Med(MAX)) für jedes Bildpaar in den 3 Komplexitätsstufen I,II, III der Oberfläche.  
Komplexitätsstufen: I (gering), II (mittel), III (hoch)

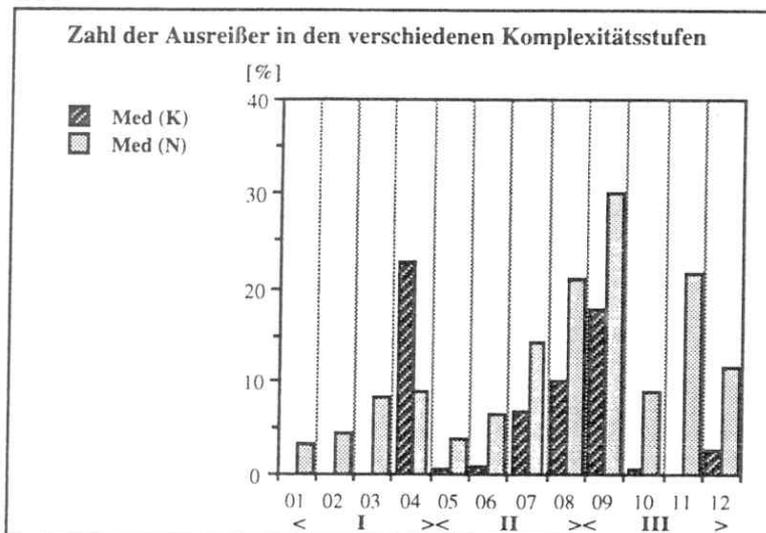
Die Bilder sind nach Komplexitätsstufen I-III geordnet. Von Stufe I (geringe Komplexität) nach Stufe II (mittlere Komplexität) ist im Mittel ein Anstieg der Beträge der Minimal- und Maximalwerte zu erkennen, d.h. mehr Ausreißer bei höherer Komplexität. In Stufe III (hohe Komplexität) weisen die Ergebnisse in den Bildern 9 und 12 und auch von

10 auf noch größere Probleme der Ansätze mit diesen Bildern hin mit Medianwerten von bis zu  $\pm 50$  Pixel in den Differenzen, die absolut nicht akzeptabel sind. Allein Bild 11 weicht von dieser Tendenz ab, wobei allerdings zu bemerken ist, daß hier nur ca. 350 Vergleichsmessungen vorliegen, die sich auf Teilbereiche des Bildes beziehen, wobei also die schwierigsten Stellen ausgespart worden sind. Insgesamt betrachtet ist das Verhältnis von negativen zu positiven Maximalwerten in etwa ausgewogen. Es ist also eine gewisse Abhängigkeit der Maximalwerte der Parallaxendifferenzen von der subjektiv beurteilten geometrischen Komplexität der Oberfläche festzustellen.

Betrachtet man die **Genauigkeit** mit Hilfe des **RMS Wertes** der x-Parallaxendifferenzen, so ist keine eindeutige Abhängigkeit festzustellen (siehe Abbildung 3.4a). Betrachtet man Bild 4 als Ausnahme, so ist im Mittel der vier Bilder pro Komplexitätsstufe nur eine unbedeutende Zunahme der Medianwerte der RMS Werte mit zunehmender Komplexität zu beobachten, also eine Abnahme der Genauigkeit. In Stufe (I) liegt der Med(RMS)-Wert im Mittel bei ungefähr 0.5 Pixel, in Stufe (II) bei ca. 0.7 Pixel und in Stufe (III) bei ca. 0.8 Pixel.



(a)



(b)

**Abbildung 3.4** Einfluß der Komplexität der Objektoberfläche (a) auf die Genauigkeit (RMS Werte) und (b) auf die Zuverlässigkeit (Zahl der Ausreißer K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.  
Komplexitätsstufen: I (gering), II (mittel), III (hoch)

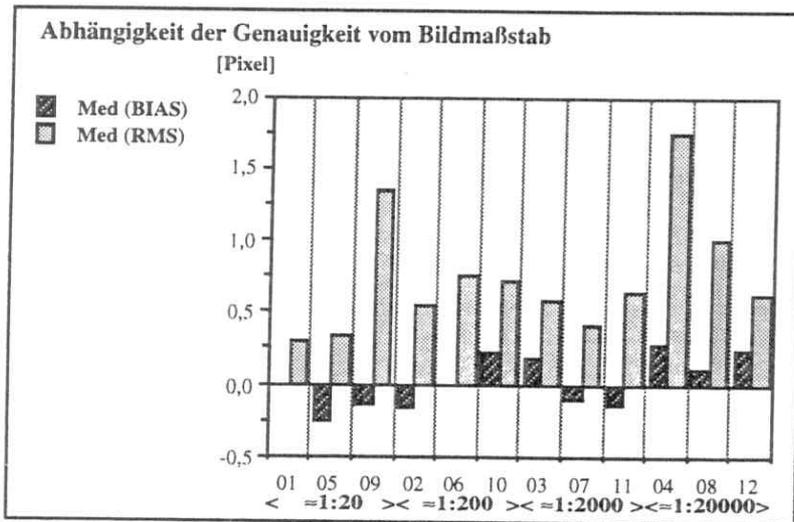
Bild 4 ist als Ausnahme zu betrachten, da die schwache Textur dieses Bildes nicht in der Komplexität berücksichtigt wurde. Im Vergleich zu Bild 1 der gleichen Komplexitätsstufe (I) liegt der Medianwert der RMS Werte mit 1.76 Pixel um ca. den Faktor 5-6 höher. Hingegen ist bezüglich der **Zuverlässigkeit** (siehe Abbildung 3.4b), bzw. der Zahl der Ausreißer nach den Maßen K und N in den x-Parallaxendifferenzen wiederum eine starke Abhängigkeit von der

Komplexitätsstufe festzustellen. Im Mittel der vier Bilder pro Komplexitätsstufe ist ein deutlicher Anstieg der Zahl der Ausreißer von Stufe I von unter 10 % nach den Stufen II und III mit über 10 % und z.T. sogar über 30 % festzustellen. In den meisten Fällen ist die Zahl der Ausreißer nicht beunruhigend groß, aber bei 15-10 % ist ein Verfahren nicht mehr ohne weiteres anwendbar.

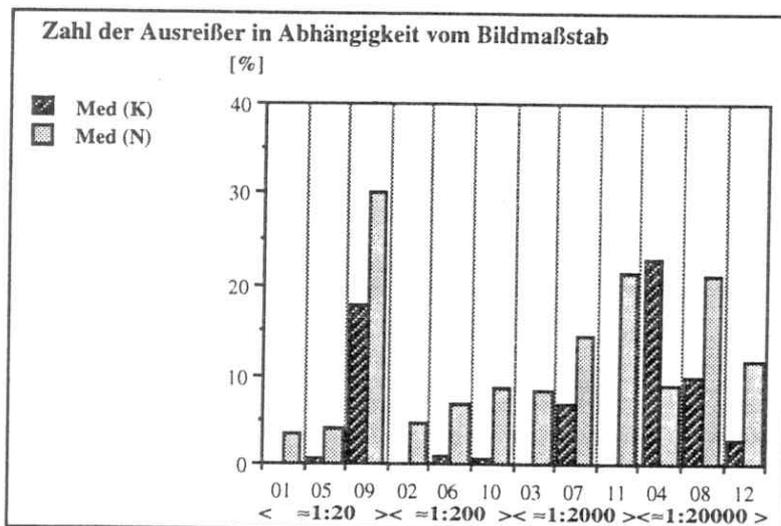
Insgesamt gesehen ist eine leichte Abhängigkeit der Zuordnungsverfahren dieses Tests von der Komplexität der Oberfläche festzustellen. Es zeigt sich jedoch, daß andere Effekte, wie schwache Bildtextur und Bildqualität, das Ergebnis in der gleichen Größenordnung beeinflussen können und somit auch für einfachere Oberflächen, wie z.B. Bild 4, Probleme bringen können.

### 3.5.2 Abhängigkeit vom Bildmaßstab

Wie in 3.2 aufgeführt, hatten die Bilder vier verschiedene Bildmaßstabbereiche. Diese sind bezeichnet mit a ( $\approx 1:20$ ), b ( $\approx 1:200$ ), c ( $\approx 1:2000$ ) und d ( $\approx 1:20000$ ), wie schon in Tabelle 3.3 ersichtlich. Im folgenden werden für jeden Maßstabbereich getrennt die **Genauigkeit** und die **Zuverlässigkeit** untersucht und dazu, wie bereits in 3.5.1, die Medianwerte der Beurteilungsmaße angegeben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.5 dargestellt.



(a)



(b)

**Abbildung 3.5** Einfluß des Bildmaßstabes auf (a) die Genauigkeit (RMS Werte) und (b) auf die Zuverlässigkeit (Zahl der Ausreißer K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Hinsichtlich der **Genauigkeit**, ausgedrückt im Medianwert der robusten Standardabweichung RMS, ist ein etwas besseres Ergebnis im großmaßstäbigen Bereich (1:20) gegenüber den anderen Maßstabbereichen festzustellen, also niedrigere RMS Werte. Eine Ausnahme bildet Bild 9, das eine hohe Komplexität aufweist. Die Ergebnisse der Maßstabbereiche b,c unterscheiden sich nicht sehr voneinander, liegen aber insgesamt etwas schlechter als Bereich a. Im kleinmaßstäbigen Bereich d (1:20000) ist eine weitere Verschlechterung der Ergebnisse festzustellen. Die Biaswerte liegen insgesamt gesehen leicht im Positiven und betragsmäßig unter 0.3 Pixel.

Hinsichtlich der Zahl der **Ausreißer** ist eine etwas deutlichere Abhängigkeit vom Maßstab festzustellen. Dies gilt für beide Maße N und K. Mit Ausnahme des Bildpaars 9 treten im wesentlichen nur in den kleinmaßstäbigen Bildern 4,8 und 12 signifikante Werte für Med(K) auf, die bis zu 22.7 % gehen können. Bild 9 weicht entschieden von der Tendenz ab, wobei hierbei sicherlich die hohe Oberflächenkomplexität dominiert und für diese enorm hohe Zahl von Ausreißern auch in den K Werten verantwortlich ist.

Der reine Maßstabeffekt ist insgesamt als relativ gering zu betrachten. Hohe Komplexität der Objekte, wie in Bild 9, oder schwache Textur, wie in Bild 4, dominieren weitaus stärker. Eine Maßstabsabhängigkeit ist als solche also kaum gegeben, sondern nur durch indirekte Effekte wie Bildqualität und Textur.

### 3.5.3 Diskussion ausgewählter Ansätze

In der obigen Diskussion wurden alle Resultate zusammengefaßt betrachtet. Hier sollen nun die statistisch gewichtigeren Resultate einzeln diskutiert werden, um vertiefende Aussagen über die Anwendbarkeit zu erhalten.

Die **7 Verfahren**, die auf mindestens **fünf Bildern** angewandt worden sind, werden nun gesondert betrachtet. Es handelt sich dabei um die **Ansätze 3, 4, 6, 9, 10, 15 und 17**. Bei mindestens fünf Bildern aus dem Testsatz läßt sich bereits eine aussagekräftige Beurteilung hinsichtlich der Anwendbarkeit, Flexibilität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit treffen. Hier zeigt sich, wie homogen ein einzelner Ansatz auf unterschiedliche Komplexität des Bildmaterials reagierte. Damit ergeben sich gezielte Hinweise darauf, wie der Ansatz auf neues, unbekanntes Bildmaterial von ähnlicher Komplexität reagieren würde. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, welche Änderungen im Verfahren nötig sind, um dies zu erreichen. Diese Änderungen, meist Steuerparameter betreffend, können, zumindest bezogen auf den Test, der Tabelle 3.9 entnommen werden.

Der **Ansatz 3** (R-CC, Strategiekategorie 2=hohe Automation) zeigt ein sehr homogenes Verhalten über eine große Zahl von Bildern (siehe Abbildung 3.6). Der RMS Wert der Parallaxendifferenzen liegt in den meisten Fällen zwischen 0.2 Pixel und 0.4 Pixel. Das Verfahren arbeitet also sehr genau und sehr homogen. Zu beachten ist, daß abgesehen von Bild 1 darin auch die manuelle Meßgenauigkeit der Vergleichsmessung enthalten ist. Die Zahl der Ausreißer nach dem Maß K ist praktisch gleich Null. Auch die intern ermittelten Ausreißer nach dem Maß N liegen üblicherweise unter 10 %.

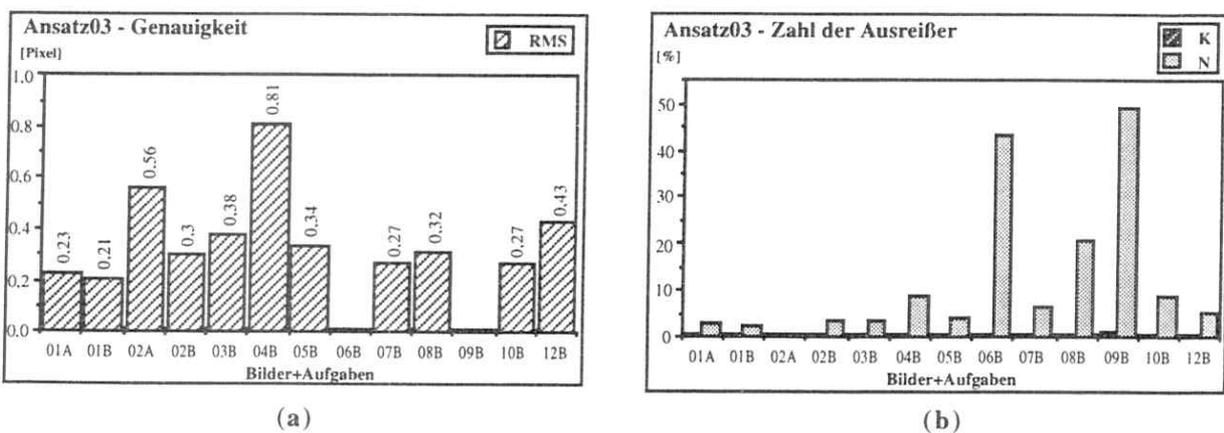


Abbildung 3.6 Ansatz 03. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

In zwei Fällen ist die Zahl deutlich höher, wobei zu beachten ist, daß die Standardabweichung dabei unter 0.005 Pixel liegt. Das Maß N ist also für diese zwei Fälle nicht besonders für einen absoluten Vergleich geeignet. Insgesamt ist dieses Verfahren als sehr leistungsfähig einzustufen.

Der **Ansatz 4** (R-CC, Strategiekategorie 2=hohe Automation) zeigt ein ähnliches homogenes Verhalten und bleibt hinsichtlich der Genauigkeit abgesehen von Bild 9 doch deutlich unter 1.0 Pixel im RMS Wert der x-Parallaxendifferenzen (siehe Abbildung 3.7). Die Zahl der Ausreißer K ist nur in den ohnehin sehr schwierigen Bildern 9 und 12 hoch. Dies wird auch durch hohe Werte im internen Maß N bestätigt. Insgesamt ist dieses Verfahren auch als sehr leistungsfähig einzustufen.

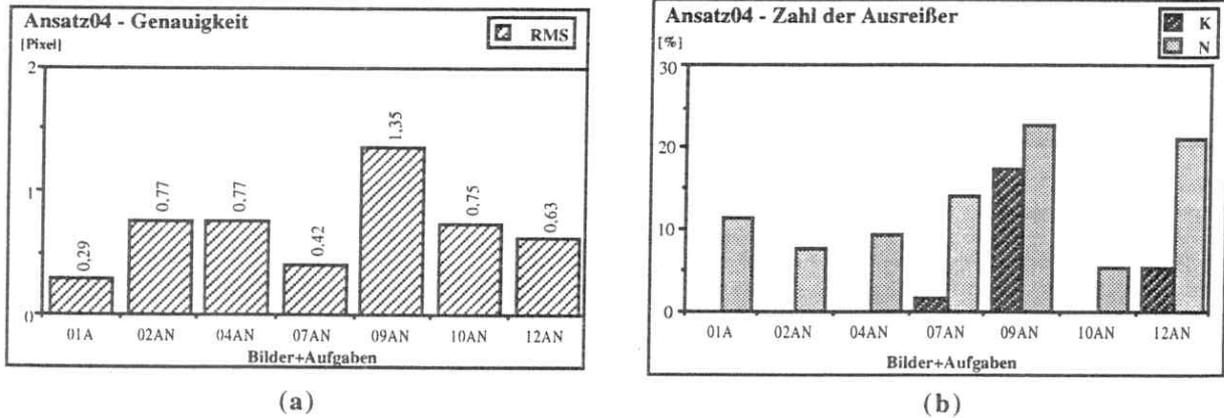


Abbildung 3.7 Ansatz 04. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Der **Ansatz 6** (M-R, Strategiekategorie 3=hohe Automation ohne Hierarchie) eignet sich sehr gut für eine **Grobzuordnung**, vorausgesetzt Regionen können extrahiert werden. Eine Genauigkeit im RMS Wert der Parallaxendifferenzen (siehe Abbildung 3.8) von ca. 10 Pixel ist ein gutes Ergebnis angesichts einer Bildgröße von 240x240 Pixel. Nur in den Bildern 2 und 4 ist das Ergebnis auch für Grobzuordnung nicht befriedigend, das liegt daran, daß in diesen Bildern die Möglichkeit zur Extraktion homogener Regionen stark eingeschränkt ist. Die Werte für die Zahl der Ausreißer sind in diesem Fall nicht sehr aussagekräftig, da in diesem Verfahren mit einer sehr kleinen Datenzahl von manchmal nur sechs Messungen gearbeitet wird. Die Werte für K, als absolutes Maß, weisen auf große Probleme in den Bildern 2 und 4 hin, und bestätigen damit die oben gemachte Aussage. Insgesamt gesehen kann dieses Verfahren gut zur Grobzuordnung eingesetzt werden.

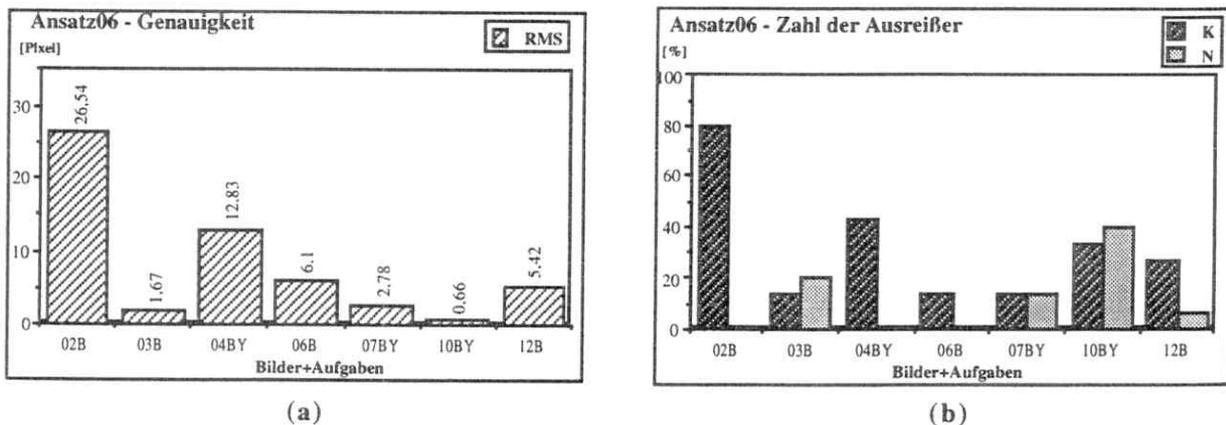
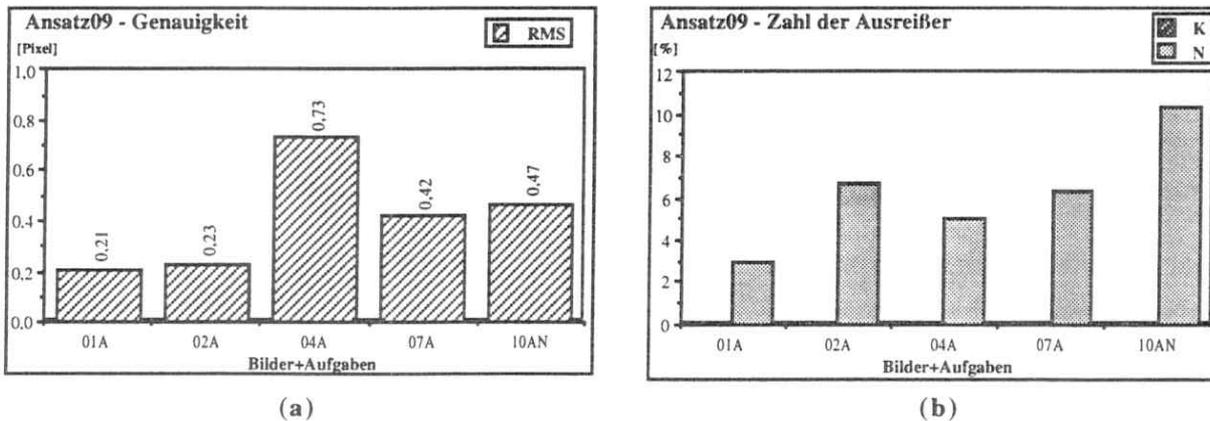


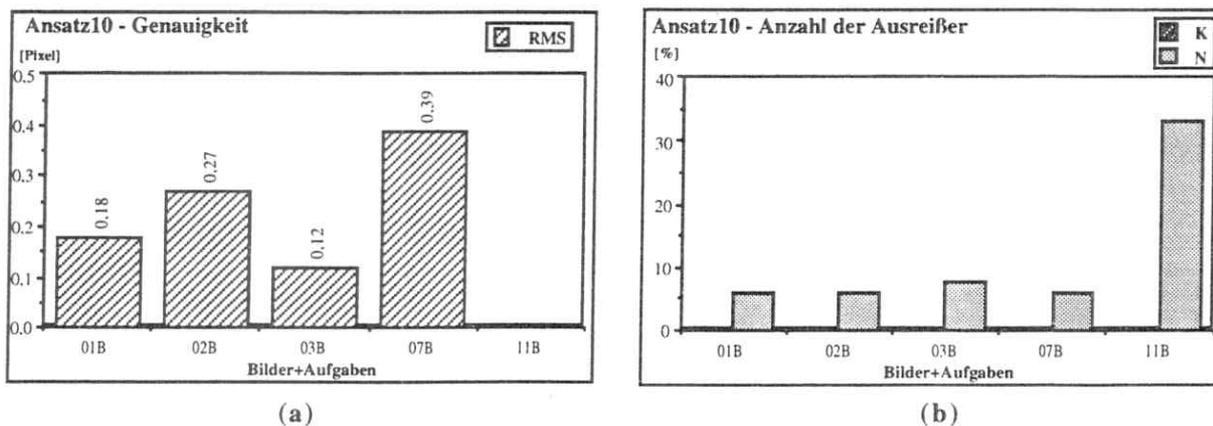
Abbildung 3.8 Ansatz 06. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Der **Ansatz 9** (R-CC/KQZ, Strategiekategorie 2=hohe Automation) zeigt ein sehr gutes Genauigkeitsverhalten (siehe Abbildung 3.9). Die RMS Werte der x-Parallaxendifferenzen liegen zwischen 0.21 Pixel und 0.73 Pixel, wobei das letztere Ergebnis im texturschwachen Bild 4 erzielt wurde. Abgesehen davon ist hier eine Abhängigkeit von der Komplexität festzustellen. Die Bilder 1 und 2 aus der unteren Komplexitätsklasse weisen um den Faktor 2 bessere Ergebnisse auf als die Bilder 7 und 10 aus den höheren Komplexitätsklassen. Die Zahl der Ausreißer nach dem Maß K ist praktisch Null, d.h. es handelt sich um ein sehr zuverlässiges Verfahren. Dies wird auch durch das interne Maß N mit Werten von unter 10 % Ausreißern bestätigt. Ansatz 9 ist als sehr leistungsfähig einzustufen.



**Abbildung 3.9** Ansatz 09. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Der **Ansatz 10** (R-CC/KQZ, Strategiekategorie 2=hohe Automation) unterscheidet sich von Ansatz 9 nur dadurch, daß nicht an Gitterpunkten, sondern an ausgewählten Punkten gemessen wird, die von einem Interestoperator ausgewählt wurden. Das Genauigkeitsergebnis ist damit im Mittel sogar noch besser als in Ansatz 9, da durch die selektive Auswahl von Punkten texturschwache Gebiete vermieden werden (siehe Abbildung 3.10). Bild 11 weist einen hohen Wert in der Zahl der Ausreißer N auf. Dabei ist zu beachten, daß der RMS Wert der x-Parallaxendifferenzen unter 0.005 Pixel liegt. D.h. auch hier muß der Wert N in Bezug zur Genauigkeit gesetzt werden. Das externe Maß K weist wie auch in Ansatz 9 auf höchst zuverlässige Ergebnisse hin.



**Abbildung 3.10** Ansatz 10. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Der **Ansatz 15** (R-Sim., Strategiekategorie 2=hohe Automation) reagiert sehr unterschiedlich auf die Bilder (siehe Abbildung 3.11). Die Ergebnisse variieren stark und liegen im Mittel deutlich über 0.5 Pixel im RMS Wert. Bild 5 führt zu einem schwachen Resultat, wobei hier die Zahl der Ausreißer K sehr gering ist. Abgesehen von Bild 1 zeigen die Maße N und K ein ähnliches Verhalten. Die Zahl der Ausreißer nach dem externen Maß K ist mit bis zu 25 % sehr hoch. Durch die dichten (pixelweisen) Ergebnisse ließen sich hier sicherlich weitere Verbesserungen durchführen. Besonders hervorzuheben ist, daß bei diesem Ansatz zwischen den Bildern keine Anpassung von Steuerparametern durchgeführt wurde. Dieser Ansatz weist ein höheres Potential auf als hier ersichtlich. Es zeigt sich, daß zwar eine Anwendung auf unterschiedliches Bildmaterial möglich ist, ohne die Steuerparameter zu verändern, daß dabei aber auch schwächere Ergebnisse in Kauf genommen werden müssen.

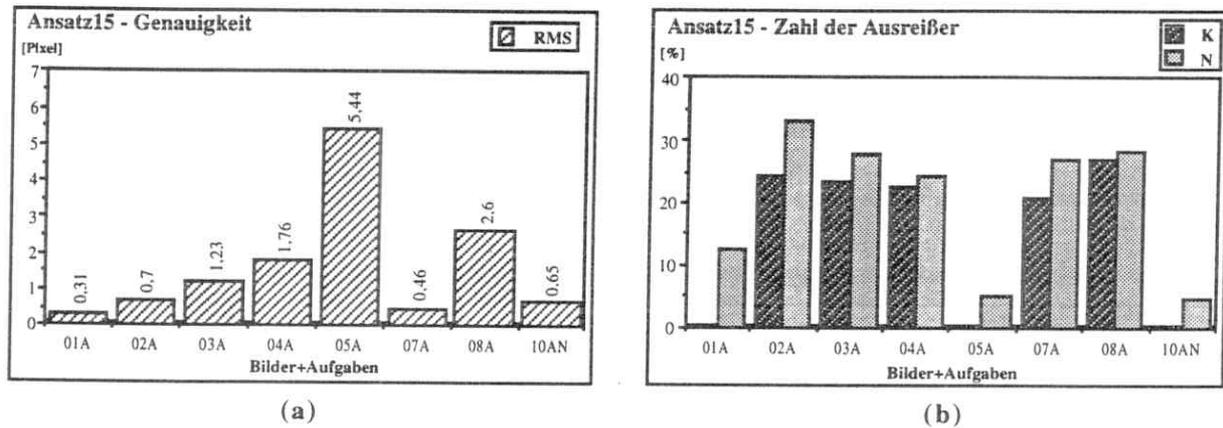


Abbildung 3.11 Ansatz 15. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Der **Ansatz 17** (M-K, Strategiekategorie 3=hohe Automation ohne Hierarchie) zeigt abgesehen von drei Fällen ein homogenes Genauigkeitsergebnis mit ca. 0.7 Pixel bis 1.4 Pixel in den RMS Werten der x-Parallaxendifferenzen (Abbildung 3.12a). In diesen Fällen ist auch die Zahl der Ausreißer nach K und N akzeptabel (Abbildung 3.12b). In drei Fällen ist das Ergebnis hinsichtlich der Genauigkeit schwach, was auch durch die geringe Zuverlässigkeit nach beiden Maßen K und N unterstrichen wird. Insgesamt gesehen ist dieses Verfahren als sehr leistungsfähig einzustufen. Es wurde erfolgreich auf eine große Zahl von Bildern angewandt. Die Genauigkeit ist durch die angewandte merkmalsgestützte Zuordnung (M-K) begrenzt.

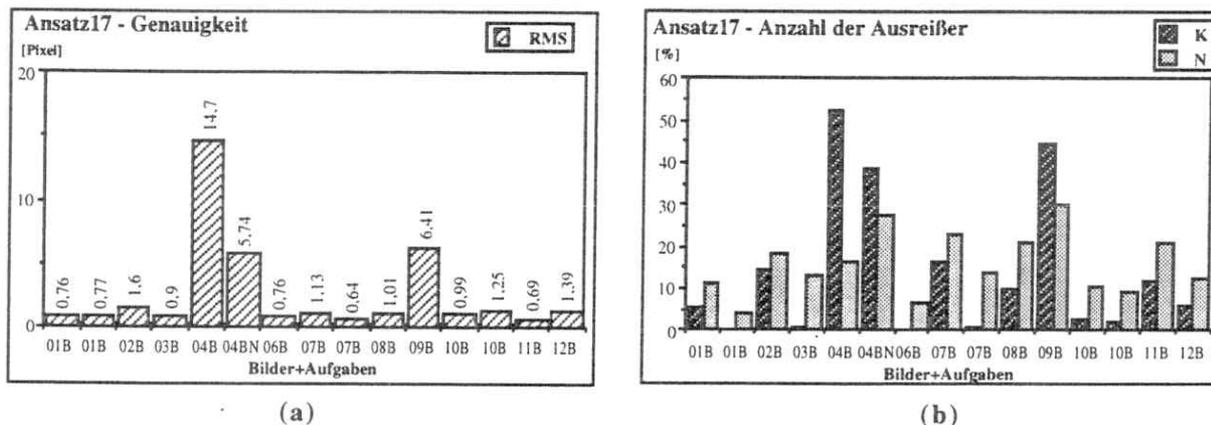


Abbildung 3.12 Ansatz 17. (a) Genauigkeit (RMS Werte) und (b) Zahl der Ausreißer (K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

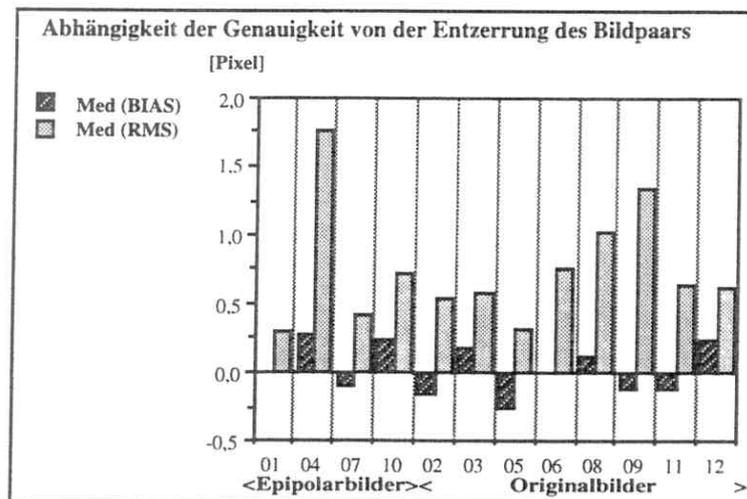
### 3.6 A priori Erwartungen

Neben einer Einteilung der Bildpaare in Maßstabs- und Komplexitätsklassen war auch eine Einteilung in entzerrte Bilder und originale Bilder vorgenommen worden (siehe 3.2). Hier soll nun untersucht werden (3.6.1), inwieweit eine solche **Vorverarbeitung**, oder Randbedingung, Einfluß auf das Zuordnungsergebnis hat.

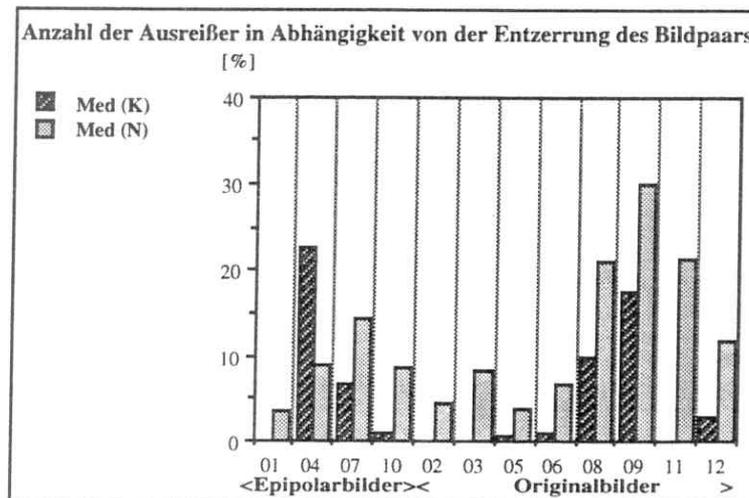
Aus den Testbeschreibungen der Teilnehmer konnte eine **a priori Klassifizierung** der Ansätze hinsichtlich des **Automationsgrades** in drei Strategieklassen getroffen werden, wie sie in 3.2.2 beschrieben ist. Aus der Kenntnis des Zuordnungsverfahrens, das zur Feinzuordnung verwendet wurde, läßt sich auch eine **Genauigkeitserwartung** ausdrücken, die sich in der im gleichen Abschnitt vorgestellten Einteilung der Ansätze in 3 Genauigkeitsklassen niedergeschlagen hat. Hier soll untersucht werden (3.6.2 und 3.6.3), inwieweit solche Vorkenntnisse oder Erwartungen über einen Ansatz durch den Test bestätigt werden.

#### 3.6.1 Abhängigkeit von der Epipolargeometrie

Einige Bildpaare wurden unter Anwendung der Parameter der Relativen Orientierung und einer bi-linearen Interpolation in Epipolarbilder transformiert und so den Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Die anderen Bildpaare liegen in Originalform vor und mußten, falls erforderlich, durch den Teilnehmer selbst entzerrt werden. Zur Beurteilung wurden jeweils die Medianwerte der Maße Bias, RMS, K, N der x-Parallaxendifferenzen aller Ansätze in einem Bild gewählt.



(a)



(b)

**Abbildung 3.13** Einfluß des Entzerrung des Bildpaares auf (a) die Genauigkeit (Bias und RMS Werte und (b) auf die Zuverlässigkeit (Zahl der Ausreißer K, N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Es soll nun die Gruppe der Epipolarbilder (1, 4, 7 und 10) im Vergleich mit den restlichen Bildern betrachtet werden. Gemessen an den Medianwerten des RMS Wertes der x-Parallaxendifferenzen (Abbildung 3.13a) sind die Ergebnisse der Epipolargruppe abgesehen von Bild 4 etwas genauer. Bild 4 zeigt wegen der schwachen Textur ein schwaches Genauigkeitsverhalten. Die Medianwerte der Biaswerte liegen bei der Epipolargruppe mehr im Positiven, in der zweiten Gruppe sind sie eher ausgeglichen, insgesamt weisen aber beide Gruppen die gleiche Größenordnung auf. Hinsichtlich der Zahl der Ausreißer K zeigen beide Gruppen ein inhomogenes Verhalten (Abbildung 3.13b). Für das Maß Med(K) liegen in beiden Gruppen sehr schwache Ergebnisse vor, mit bis zu ca. 20 % Ausreißern, die nicht zu akzeptieren sind. Für das Maß Med(N) sind die Ergebnisse in der Epipolargruppe etwas günstiger und liegen im Mittel bei 5-7 %. Auffallend ist, daß bei der Gruppe der Originalbilder dagegen ein Wert von 10 % Ausreißern für beide Maße (K) und (N) mit Werten bis zu ca. 30 % doch mehrfach deutlich überschritten wird.

Insgesamt ist eine schwache Tendenz dahingehend festzustellen, daß die Ergebnisse in den bereits entzerrten Bildern etwas besser sind, woraus allerdings keine allgemeine Aussage abgeleitet werden kann, daß dies immer so ist. Eine mögliche Erwartung, daß durch das Resampling bei der Generierung der Epipolarbilder schlechtere Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit ergeben könnten, hat sich nicht bestätigt. In der Regel wird die Epipolargeometrie nicht wegen Genauigkeits- oder Zuverlässigkeitsaspekten, sondern wegen des geringeren Rechenaufwandes bei der Zuordnung gewählt.

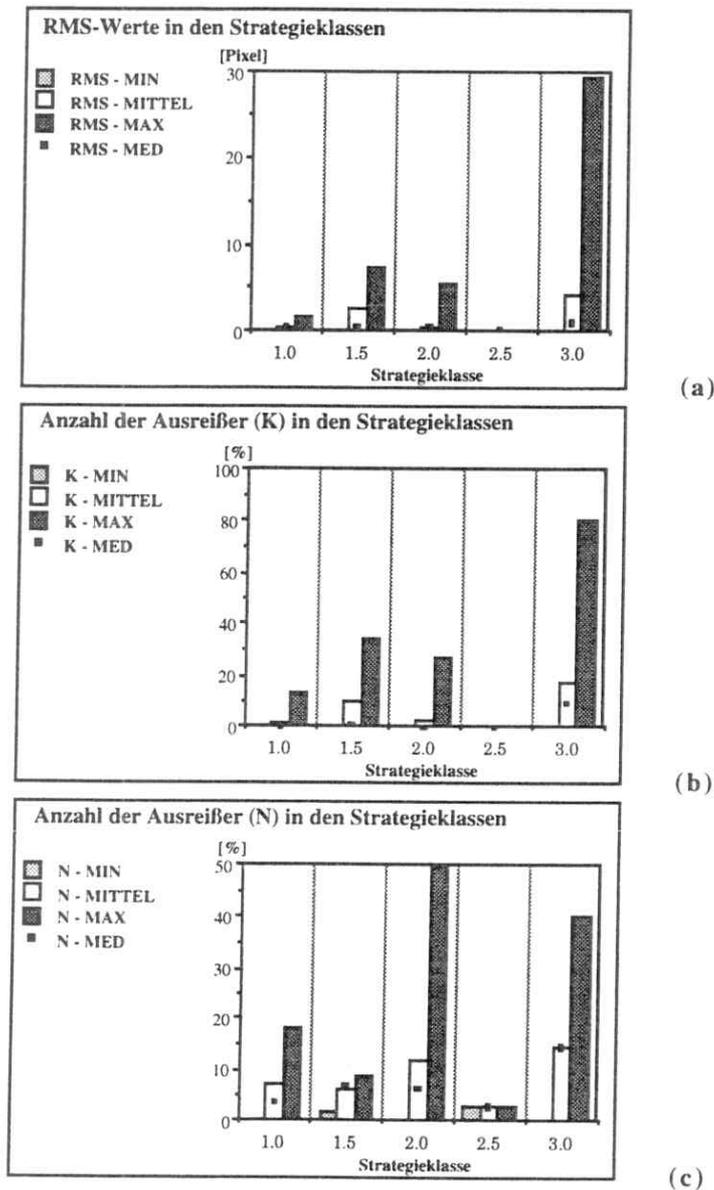
### 3.6.2 Automationsgrad der Zuordnungsverfahren

Die Zuordnungsverfahren unterscheiden sich stark hinsichtlich den Anforderungen und der Art und Weise der automatischen Durchführung. Alle Ansätze wurden deshalb einer von 3 **Strategieklassen** (3.2.2) zugeteilt. **Strategiekategorie 1** sammelt alle Ansätze, in denen ein **erheblicher manueller Einsatz** während der Zuordnung oder in der Nachbearbeitung beschrieben oder stark vermutet wurde. Oftmals lagen speziell hierzu keine klaren Aussagen der Teilnehmer vor. Wurde in den unklaren Fällen ein numerisches Maß zur Selbstkontrolle verwendet, so wurde davon ausgegangen, daß keine weitere wesentliche manuelle Unterstützung vorlag. **Strategiekategorie 2** umfaßt alle diejenigen Ansätze, in denen verschiedenartige Hierarchien und Prädiktionsmethoden zur Erreichung einer **hohen Automation** eingesetzt wurden und keine wesentliche manuelle Unterstützung erfolgte. **Strategiekategorie 3** umfaßt alle restlichen Ansätze mit **hoher Automation**, die ebenfalls ohne manuelle Unterstützung, aber auch **ohne spezielle Strategien** zur Steuerung der Zuordnung auskommen. Wurden in den Klassen 2 und 3 Startpunkte vorgegeben, so wurden die Ansätze in die Klasse 1.5 bzw. 2.5 eingeteilt.

In Abbildung 3.14 sind nun die Minimum-, Mittel-, Maximum- und Medianwerte der Qualitätsmaße RMS, K und N der x-Parallaxendifferenzen aller Datensätze pro Strategiekategorie aufgeführt. Hier treten also nur positive Werte auf.

Wie erwartet zeigen die Ansätze in Strategiekategorie 1 gute Ergebnisse. Dies gilt sowohl für die Genauigkeit als auch für die Zuverlässigkeit, mit meist geringeren Werten gegenüber den anderen Strategieklassen. Betrachtet man Strategieklassen 1.5 und 2, so liegen die Medianwerte auch auf dem Niveau der Klasse 1, die Maximalwerte zeigen aber deutlichere Ausschläge. Im Vergleich zwischen den Strategieklassen 1.5 und 2 ist festzustellen, daß die Vorgabe von Startpunkten (1.5) nicht unbedingt ein besseres Ergebnis liefert. Hinsichtlich der Maße RMS und K sind die Ergebnisse in Strategiekategorie 1.5 sogar schwächer als in Strategiekategorie 2. Strategiekategorie 2.5 nimmt eine gewisse Sonderstellung ein, da nur ein Datensatz aus Bild 1 dieser Klasse angehört und ein sehr gutes Ergebnis geliefert hat. Betrachtet man aber die Strategiekategorie 3, so ist zu sehen, daß ohne Hierarchien, Prädiktionen oder anderer Strategien die Zuordnung in vielen Fällen doch deutlich schwächere Ergebnisse liefert. Dies zeigt sich besonders stark in den Mittel- und Maximalwerten. Der Medianwert von RMS ist allerdings vergleichbar zu dem der anderen Klassen. Die Zahl der Ausreißer liegt jedoch deutlich über 10 % und ist somit nicht akzeptabel.

Insgesamt ist festzuhalten, daß es Verfahren gibt, die mit Hilfe ausgeklügelter Strategien zur Steuerung des Zuordnungsalgorithmus (insbesondere Strategieklassen 2 und 1.5) in der Lage sind Ergebnisse zu liefern, die andere Ansätze nur mit essentieller manueller Unterstützung erreichen (Strategiekategorie 1).



**Abbildung 3.14** Strategieklassen. (a) Genauigkeit (RMS Werte), (b) Zahl der Ausreißer (K) und (c) Zahl der Ausreißer (N) in den x-Parallaxendifferenzen. Es sind jeweils Minimum-(MIN), Mittel-(MITTEL), Maximal-(MAX) und Medianwerte (MED) für jedes der Qualitätsmaße angegeben. Mittelwerte sind nicht gewichtet.

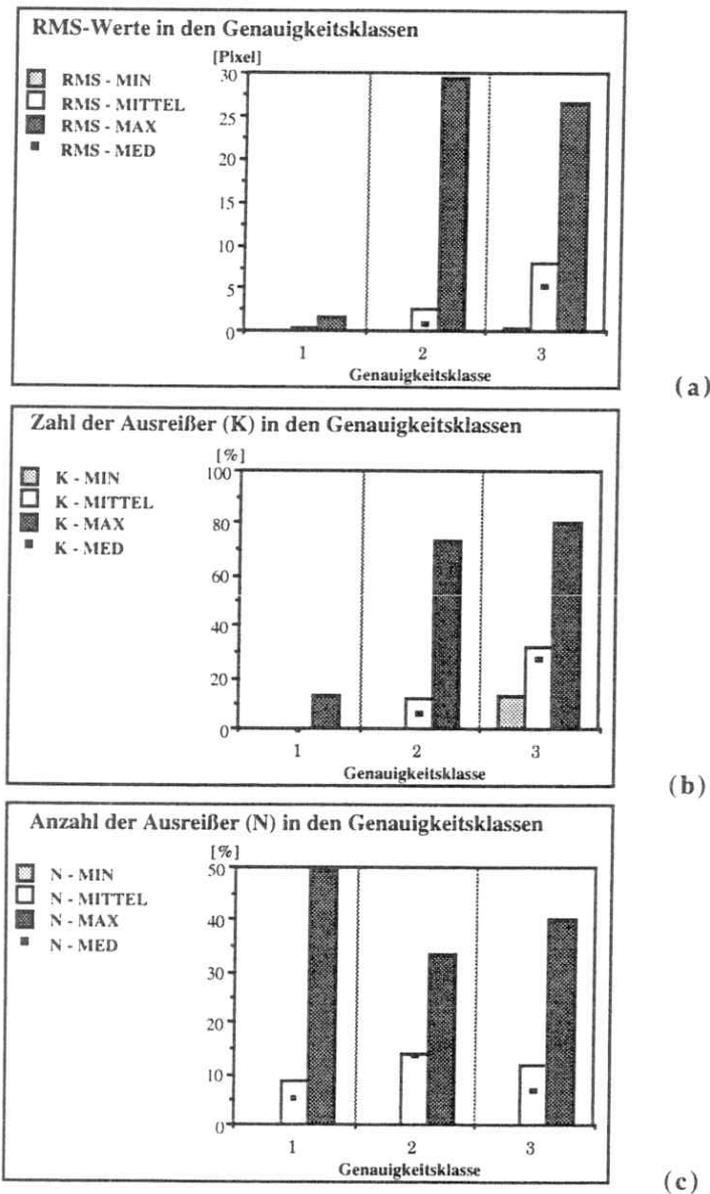
### 3.6.3 Genauigkeitsklassen der Zuordnungsverfahren

Hinsichtlich der zu erwartenden Genauigkeit wurden die Datensätze a priori nach Genauigkeitsklassen eingeteilt, wobei **Genauigkeitsklasse 1** die Ansätze umfaßt, die von vornherein hoch präzise Ergebnisse liefern sollten. **Genauigkeitsklasse 2** läßt genaue Ergebnisse und **Genauigkeitsklasse 3** schließlich die weniger genauen Ergebnisse erwarten. Klasse 3 nimmt insofern eine Sonderstellung ein, als nur ein Verfahren dieser Klasse angehört.

Zur Beurteilung der Testergebnisse bezüglich der Einteilung in Genauigkeitsklassen sind in Abbildung 3.15 die Minimum-, Mittel-, Maximum- und Medianwerte der Qualitätsmaße RMS, K und N der x-Parallaxendifferenzen aller Datensätze in einer Klasse aufgeführt. Sehr deutlich ist in Abbildung 3.15a eine Bestätigung der Erwartung hinsichtlich der **Genauigkeit** (RMS) zu sehen. Die Ansätze in Genauigkeitsklasse 1 liefern eindeutig die besten Ergebnisse im RMS-Wert mit einem sehr geringen Maximalwert und einem Medianwert unter 1.0 Pixel in den x-Parallaxendifferenzen. Dies bedeutet, daß 50 % aller Datensätze in Genauigkeitsklasse 1 mit dem RMS Wert der x-Parallaxendifferenzen unter 1.0 Pixel liegen. In Genauigkeitsklasse 2 liegt der Medianwert des RMS Wertes nun etwas über 1.0 Pixel, also noch überraschend gut im Vergleich zu Klasse 1. Aber der Mittelwert und der Maximalwert liegen doch

höher als in Klasse 1. Genauigkeitsklasse 3 bestätigt die geringeren Genauigkeitserwartungen für das einzige hierbei verwendete Verfahren.

Hinsichtlich der **Zahl der Ausreißer** haben Verfahren in Genauigkeitsklasse 1 sehr wenige Ausreißer nach dem absoluten Qualitätsmaß K (Abbildung 3.15b), zeigen aber deutliche Ausschläge nach Maß N (Abbildung 3.15c). Die Verfahren in Genauigkeitsklasse 2 liegen nach Medianwert und Mittelwert der Ausreißer auf dem gleichen Niveau wie die in Klasse 1, zeigen aber ebenfalls deutliche, zu große Ausschläge im Maximalwert. Die Datensätze in Klasse 3 bringen wie erwartet die etwas weniger genauen Ergebnisse, liegen aber überraschend gut im Vergleich mit Klasse 2, sowohl hinsichtlich der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit. Dies wird auch unterstrichen durch die geringe Zahl von Ausreißern nach dem Maß N. Insgesamt bleibt festzuhalten, daß die Kenntnis des Typs des Feinzuordnungsalgorithmus eindeutige Erwartungen hinsichtlich der Genauigkeit treffen läßt. Hinsichtlich der zu erwartenden Zuverlässigkeit sollte allerdings immer auch die Kenntnis der Strategie in die Betrachtungen miteinbezogen werden, d.h. Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind gemeinsam zu betrachten.



**Abbildung 3.15** Genauigkeitsklassen. (a) Genauigkeit (RMS Werte), (b) Zahl der Ausreißer (K) und (c) Zahl der Ausreißer (N) in den x-Parallaxendifferenzen.

Es sind jeweils Minimum-(MIN), Mittel-(MITTEL), Maximal-(MAX) und Medianwerte (MED) für jedes der Qualitätsmaße angegeben. Mittelwerte sind nicht gewichtet.

### 3.7 Genauigkeit und Zuverlässigkeit - Ansätze im Vergleich

Nach den mehr allgemeinen Fragestellungen in den vorigen Abschnitten soll nun hier jeder einzelne Ansatz für sich beurteilt werden und zwar für jedes Bildpaar getrennt. Zuerst wird eine **Reihenfolge** der Ansätze für **Genauigkeit** und **Zuverlässigkeit** angegeben. Damit können vom interessierten Benutzer die geeignetsten Verfahren für ein spezifisches Bildmaterial, das einem der 12 hier verwendeten Bilder in den Eigenschaften ähnlich ist, ausgewählt werden. Hinweise zum durchschnittlichen Verhalten eines Ansatzes, sowie eine Gesamtbewertung findet sich in Abschnitt 3.7.2. In Verbindung mit den Angaben in Tabelle 3.9 lassen sich somit die günstigsten Verfahren herausuchen, die dann nachprogrammiert und angewendet werden können.

#### 3.7.1 Vergleich der Ansätze je Bildpaar

Der Vollständigkeit halber kommt jedes Bild getrennt zur Darstellung. Die **Abbildungen hierzu sind im Anhang A** zu finden. In den Abbildungen 3.16 (Bild 01) bis Abbildung 3.27 (Bild 12) sind die RMS, K und N Werte der x-Parallaxendifferenzen für jeden Ansatz im entsprechenden Bild aufgeführt. Die Ansätze sind von links nach rechts so sortiert, daß der erste genannte Ansatz das beste Resultat bezüglich dem jeweiligen Qualitätsmaß in diesem Bild geliefert hat. Zu beachten ist, daß jeweils für einen Ansatz nur der Datensatz mit dem besten Ergebnis in Betracht gezogen wurde. Es wurde keine Mittelbildung durchgeführt, wenn mehr als ein Versuch oder Datensatz pro Ansatz vorlag. Es ist weiterhin zu beachten, daß bei gleichem Resultat (die Werte sind jeweils in der Grafik vermerkt) die Reihenfolge nicht nach Ansatznummer geordnet sein muß. Die Graphische Darstellung spricht für sich und braucht nicht weiter erläutert zu werden.

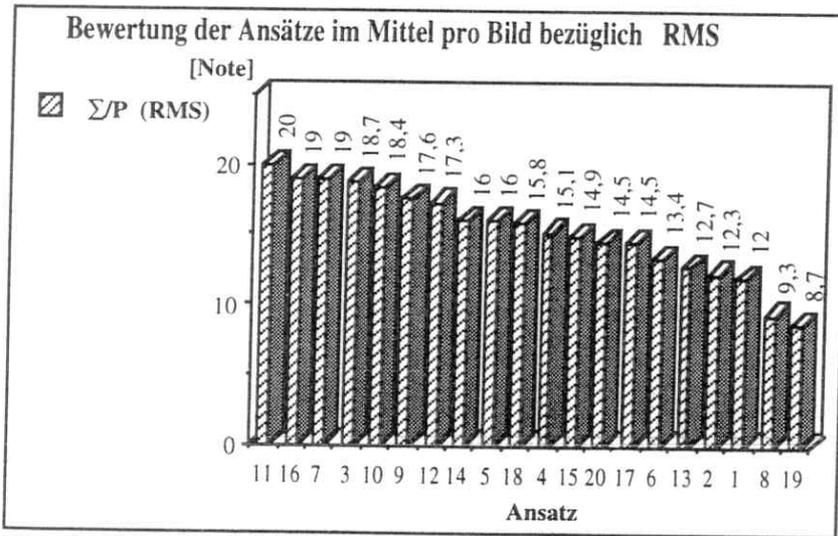
In Bild 1 (siehe Abbildung 3.16 im Anhang A) sind die angegebenen RMS-Werte praktisch die absolute Genauigkeit der Zuordnung, da keine manuelle Messung sondern rechnerische Sollwerte zum Vergleich vorlagen. So liegen **Ansatz 11** (R-CC/KQZ), **Ansatz 7** (R-CC) und **Ansatz 10** (R-CC/KQZ) sogar unter 0.2 Pixel, was ungefähr 2-3  $\mu\text{m}$  im Bild entspricht, also eine sehr hohe Genauigkeit repräsentiert und somit gleich oder sogar besser als die manuelle Meßgenauigkeit liegt.

Die Rangfolgen können zur Auswahl von Verfahren für spezifisches Bildmaterial verwendet werden. Soll z.B. die DHM Messung als Aufgabe gewählt werden, so stellt z.B. Bildpaar 7 einen Luftbildfall dar. In Abbildung 3.22 (siehe Anhang A) wird ersichtlich, daß 13 Ansätze auf dieses Bildpaar angewandt wurden. Bezüglich der Genauigkeit (RMS-Wert) weisen die **Ansätze 18** (M-K) und **12** (R-CC/KQZ) die besten Ergebnisse auf mit 0.19 Pixel bzw. 0.21 Pixel. Hinsichtlich der Zahl der Ausreißer (Maße K und N) treten jedoch Werte von z.T. über 15 % auf, die für eine praktische Anwendung nicht akzeptabel sind. Betrachtet man alle drei Maße (RMS, K, N) zusammen, so ist wohl den **Ansätzen 3** (R-CC), **5** (R-CC+M-P), **9** (R-CC/KQZ) oder **10** (R-CC/KQZ) in diesem Fall der Vorzug zu geben, die in allen drei Fällen in der Spitzengruppe der besten Verfahren liegen. In ähnlicher Weise lassen sich so für andere Objekte, die sich im Testmaterial wiederfinden, Prognosen für geeignete Zuordnungsverfahren treffen. Damit ist ein wichtiges Ziel des Tests erfüllt, Hinweise zu geben, welche Verfahren auf welches Bildmaterial angewendet werden sollten.

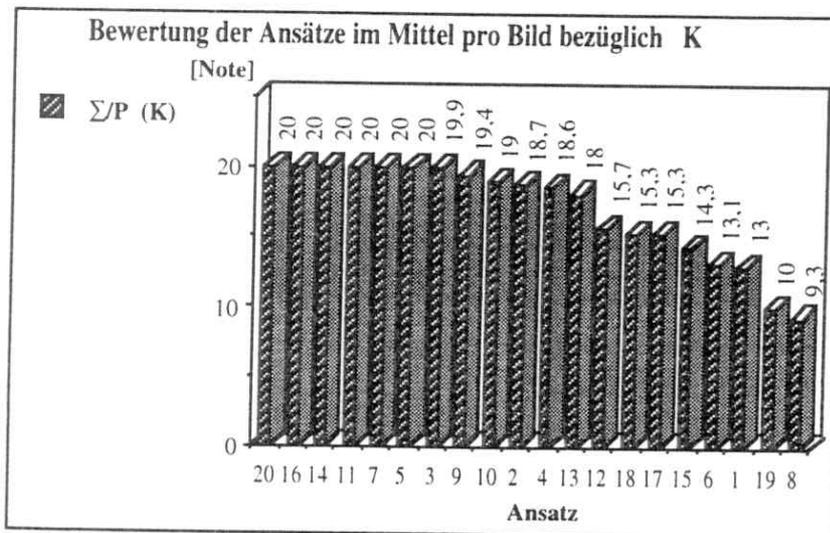
#### 3.7.2 Bewertung der Ansätze

Um eine **repräsentative Qualitätsaussage** über die Zuordnungsverfahren zu ermöglichen, wurde jeder Ansatz bewertet. Die **Bewertung** der Ansätze erfolgt in **drei Stufen**.

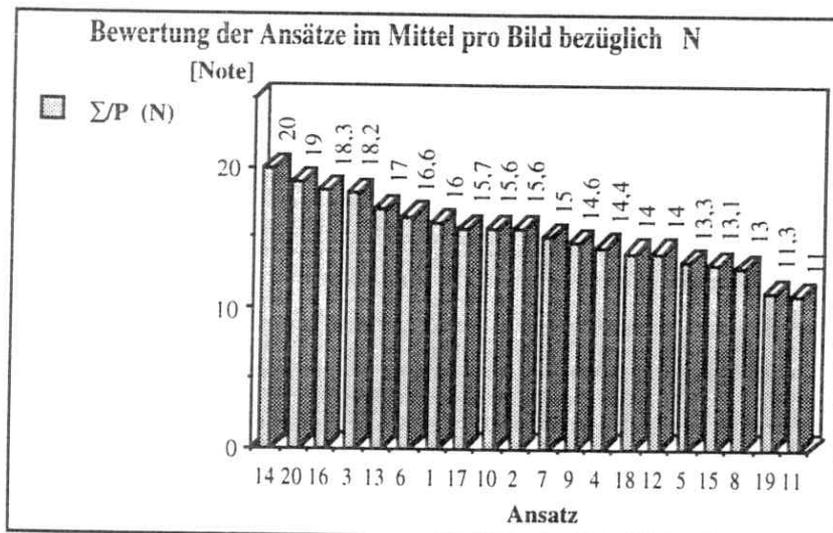
In der **Bewertungsstufe 1** wird für jedes Bild wie in 3.7.1 dargestellt eine Reihenfolge der besten Ansätze festgelegt. Der beste Ansatz wurde mit der Note 20 bewertet. Der nächst beste mit 19 usw. Alle Ansätze, die nicht vertreten waren, bekamen die Note 0. Nun wurde die **Gesamtsumme „ $\Sigma$ “** aller Noten eines Ansatzes über alle Bilder gebildet. Daraus wird der **Mittelwert „ $\Sigma/P$ “** gebildet, wobei P die **Zahl** der bearbeiteten Bilder ist. Dies wird für die Qualitätsmaße RMS, K und N durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Sortierung nach Noten, wie in Abbildung 3.28 dargestellt. Das Verfahren mit der besten Note (20) steht ganz links.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 3.28** Einzelbewertung der Ansätze im Mittel für ein Bild.  
 Die Ansätze sind sortiert nach (a) Genauigkeit (RMS), (b) Anzahl der Ausreißer (K) und (c) Anzahl der Ausreißer (N).  
 20 ist die maximal erreichbare Note.  $\Sigma$  (Gesamtpunktzahl über alle Bilder);  
 P (Zahl der bearbeiteten Bilder)

Für den „ $\Sigma/P$ “-RMS-Wert ist eine deutliche Reihenfolge festzustellen. Der **Ansatz 11** (R-CC/KQZ, Strategiekkl. 1) bekommt die höchste Note (20). Dichtauf folgen **Ansatz 16** (R-CC/KQZ+M-K, Strategiekkl. 1) und **Ansatz 7** (R-CC, Strategiekkl. 2.5). **Ansatz 8** (R-CC, Strategiekkl. 1.5) und **Ansatz 19** (M-K, Strategiekkl. 2) liegen mit Noten von unter 10 doch deutlich schwächer, d.h. Kreuzkorrelation und Kleinste Quadrate Zuordnung liefern nach dieser Bewertung insgesamt gesehen die besten Ergebnisse.

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit, ausgedrückt in der Zahl der Ausreißer mit dem Maß „ $\Sigma/P$ “(K), bekommen 6 Verfahren die beste Note. Es sind dies **Ansatz 20** (M-P/K, Strategiekkl. 2), **Ansatz 16** (R-CC/KQZ + M-K, Strategiekkl. 1), **Ansatz 14** (R-KQZ, Strategiekkl. 1), **Ansatz 11** (R-CC/KQZ, Strategiekkl. 1), **Ansatz 7** (R-CC, Strategiekkl. 2.5) und **Ansatz 5** (R-CC + M-P, Strategiekkl. 2). Andere Verfahren folgen mit ähnlich guten Ergebnissen, d.h. Verfahren aus Strategiekklasse 1 (starke manuelle Interaktion) und aus Strategiekklasse 2 (hohe Automation) zeigen gleich gute Ergebnisse.

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit, ausgedrückt nach der Zahl der Ausreißer mit dem Maß „ $\Sigma/P$ “(N), bekommt **Ansatz 14** (R-KQZ, Strategiekkl. 1) die beste Note. Weiterhin treten **Ansatz 20** (M-P/K, Strategiekkl. 2), **Ansatz 16** (R-CC/KQZ + M-K, Strategiekkl. 1) und **Ansatz 3** (R-CC, Strategiekkl. 2) besonders hervor. Auch hier ist eine Mischung aus Strategiekklasse 1 und Strategiekklasse 2 unter den besten Ergebnissen.

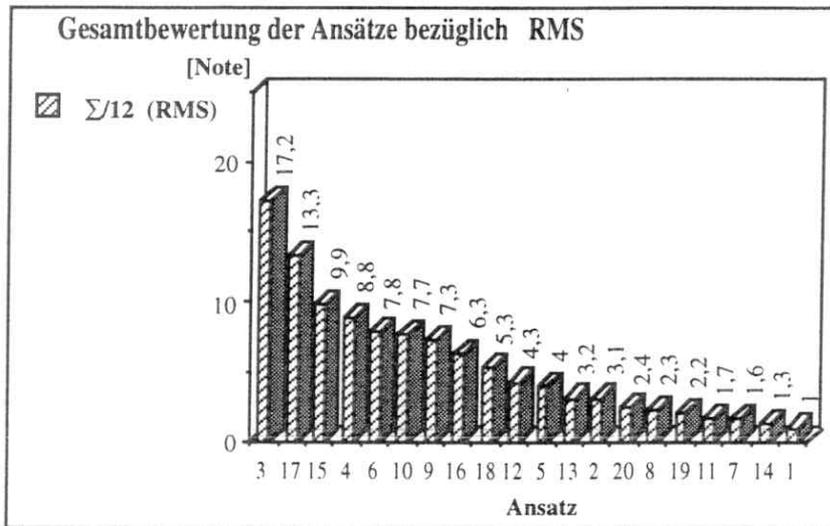
In **Bewertungsstufe 1** wird deutlich, daß ein Verfahren, das nur ein einzelnes Bild bearbeitet hat und dies vortrefflich gemeistert hat, nun sehr hoch in der Bewertung rangiert. Damit wird also die **Anwendbarkeit** und die **Flexibilität** nicht in Betracht gezogen.

Daher wird in der **Bewertungsstufe 2** das Maß „ $\Sigma/P$ “ gewichtet mit „ $P/12$ “, das heißt Verfahren, die alle 12 Bilder bearbeitet hätten, würden das höchste Gewicht 1 ( $P=12$ ) bekommen. Mit dem daraus resultierenden Maß „ $\Sigma/12$ “ kann nun eine Reihenfolge, wie sie in der Abbildung 3.29 dargestellt ist, für alle Ansätze bezüglich der drei Qualitätsmaße RMS, K und N der x-Parallaxendifferenzen erstellt werden, womit eine Beurteilung der Ansätze möglich ist, die die Anwendbarkeit miteinbezieht. Hier wird nun sehr deutlich, daß große Unterschiede bestehen. Der **Ansatz 3** (R-CC, Strategiekkl. 2) und der **Ansatz 17** (M-K, Strategiekkl. 3) zeigen für alle drei Qualitätsmaße (RMS, K, N) die mit Abstand besten Ergebnisse. Weitere 5-6 Verfahren können noch als gut bewertet werden, wobei allerdings Unterschiede der Rangordnung in den drei Qualitätsmaßen auftreten.

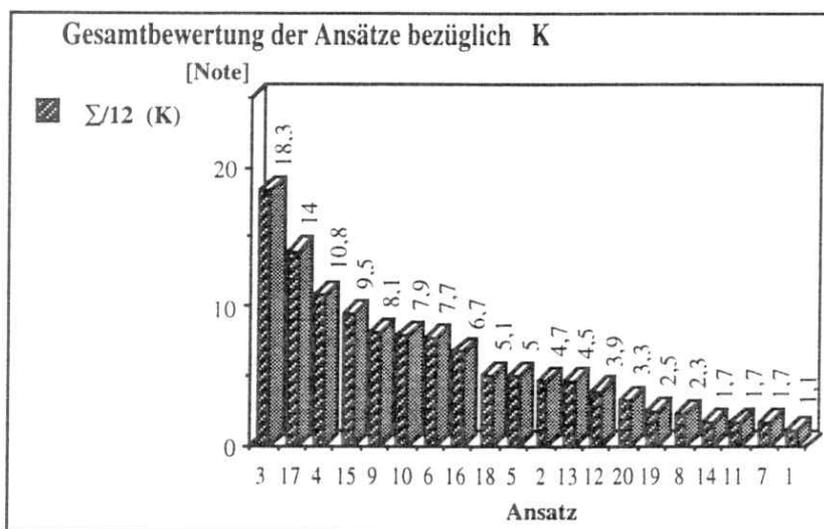
Wie bereits in 3.6.3 gefolgert sollte Genauigkeit und Zuverlässigkeit hier gemeinsam betrachtet werden. In einer **dritten Bewertungsstufe** wird daher die Genauigkeit in Verbindung mit der Zuverlässigkeit betrachtet. Es wird der **Mittelwert** aus den Noten für die **Genauigkeit** (RMS) und die **Zuverlässigkeit** (nach dem externen, absoluten Maß K) gebildet. In Abbildung 3.30 ist diese Bewertung visualisiert. In Abbildung 3.30a wird die Bewertung im Mittel pro Bild aufgeführt, also nach dem Maß „ $\Sigma/P$ “ für RMS und K, wie es in Bewertungsstufe 1 benutzt wurde. Nach dieser Bewertung würde der **Ansatz 11** (R-CC/KQZ, Strategiekkl. 1) an erster Stelle liegen dicht gefolgt von **Ansatz 16** (R-CC/KQZ + M-K, Strategiekkl. 1), **Ansatz 7** (R-CC, Strategiekkl. 2.5) und **Ansatz 3** (R-CC, Strategiekkl. 2).

Wird zusätzlich noch die **Anwendbarkeit** und die **Flexibilität** gewertet, ist die Reihenfolge der Ansätze in Abbildung 3.30b maßgebend. Das **eindeutig beste Ergebnis** wird mit dem **Ansatz 3** (R-CC, Strategiekkl. 2) erzielt, dem eine sehr lange, intensive empirische Erfahrung zugrunde liegt. Auf ähnlichem Niveau liegt **Ansatz 17** (M-K, Strategiekkl. 3). Mit Abstand folgen **Ansatz 4** (R-CC, Strategiekkl. 2) und **Ansatz 15** (R-Sim., Strategiekkl. 2).

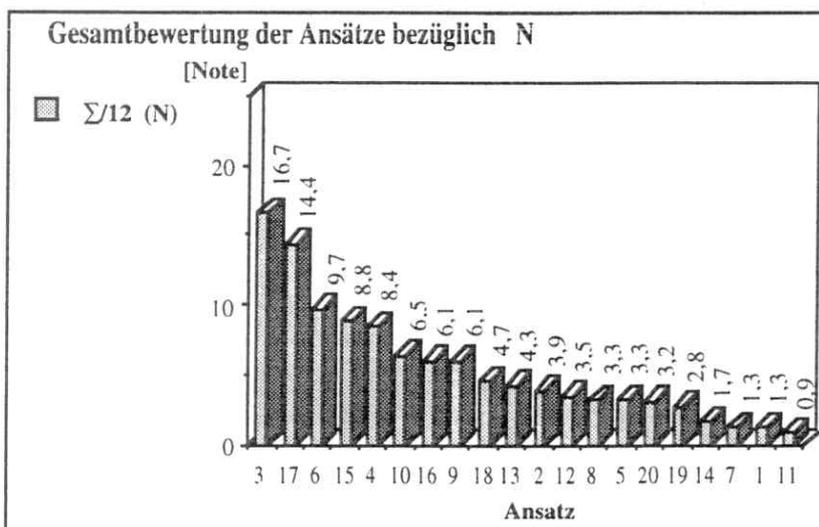
Die Grafiken für alle 3 Bewertungsstufen stellen also das **summarische Endergebnis des Tests** dar. Sie können zur Auswahl von Verfahren benützt werden bzw. als Hinweise dienen, wie ein eigenes Verfahren eventuell verbessert oder in der Struktur und Strategie verändert werden kann. Damit ist das wichtigste Ziel des Tests erreicht, Informationen auszutauschen und für spätere Anwendungen weiterzugeben.



(a)

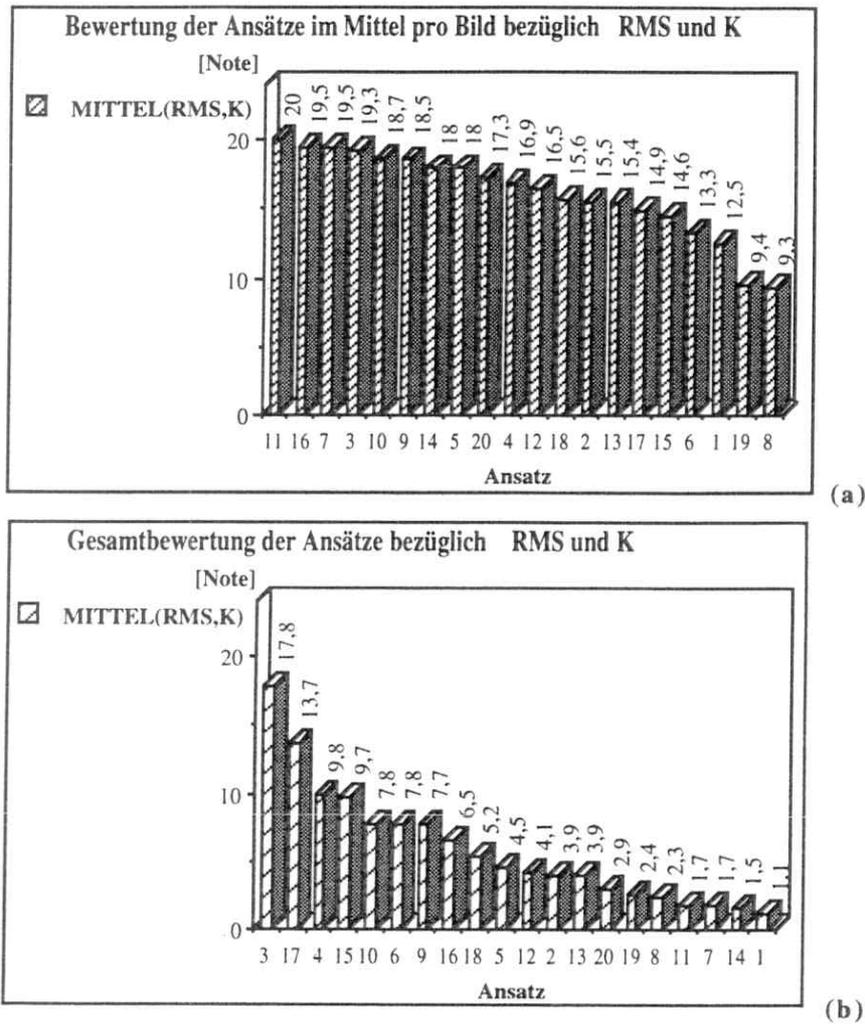


(b)



(c)

**Abbildung 3.29** Mit der Zahl der bearbeiteten Bilder gewichtete Gesamtbewertung der Ansätze. Die Ansätze sind sortiert nach (a) Genauigkeit (RMS), (b) Anzahl der Ausreißer (K) und (c) Anzahl der Ausreißer (N). 20 ist die maximal erreichbare Note.  $\Sigma$  (Gesamtpunktzahl über alle Bilder).



**Abbildung 3.30** Rangfolge der Ansätze wenn die Noten für Genauigkeit (RMS-Werte) und Zuverlässigkeit (K Werte) gemittelt werden. (a) Durchschnittliche Bewertung pro Bild und (b) mit der Zahl der bearbeiteten Bilder gewichtete Gesamtbewertung über alle Bilder, also unter Einbeziehung der Anwendbarkeit. 20 ist die maximal erreichbare Note.

### 3.8 Selbstdiagnose

Für ein Zuordnungsverfahren ist das eigenständige Erkennen von Fehlern und Problemen wichtig, d.h. die Fähigkeit zur Selbstdiagnose. Hierzu gibt es wenig allgemeine Übereinstimmung. Liegen Sollwerte für Vergleiche vor, so können z.B. mit Hilfe der Qualitätsmaße K und N die Güte der Ergebnisse beurteilt werden. Solche Vergleichsmessungen sind jedoch in der Regel nicht vorhanden. Einige Teilnehmer haben nun versucht, die Qualität der Zuordnung interaktiv durch den Bearbeiter oder automatisch aus den Zuordnungen zu beurteilen. Detaillierte Informationen über Steuerparameter und Kontrollen können der Tabelle 3.9 in Abschnitt 3.2.3 sowie der darin angeführten Literatur entnommen werden.

#### 3.8.1 Interaktive Kontrolle und verbale Beurteilung der Zuordnung

Für die interaktive Kontrolle durch den Bearbeiter wurde oft eine graphische Ausgabe gewählt, um Ausreißer zu finden. Es wurden z.B. Monitore mit Anaglyphen Technik verwendet. Andere wählten perspektivische Ansichten oder Ausdrücke der Grauwertbilder mit überlagerten zugeordneten und nicht zugeordneten Punkten. Die Ergebnisse der Selbstdiagnose wurden benutzt, um z.B. nur 'gute' Parallaxen abzugeben, oder in verbaler Form eine Beurteilung abzugeben. Es war festzustellen, daß die meisten Teilnehmer im Mittel eine treffende eigene Beurteilung abgaben und daß nur wenige etwas zu optimistisch oder auch zu pessimistisch waren.

### 3.8.2 Automatische Kontrolle und numerische Beurteilung

Einige Verfahren waren in der Lage, **bei der Zuordnung** automatisch ein Qualitätsmaß zu jeder Parallaxe zu liefern. Dieses Qualitätsmaß wurde mit einem bestimmten Grenzwert verglichen und die Parallaxe dann als gut oder schlecht gekennzeichnet. Der Grenzwert war entweder fest eingestellt oder wurde vom Teilnehmer je nach Bild ausgewählt. In Tabelle 3.11 sind die hauptsächlich verwendeten Qualitätsmaße mit Angaben üblicher Schwellwerte aufgeführt.

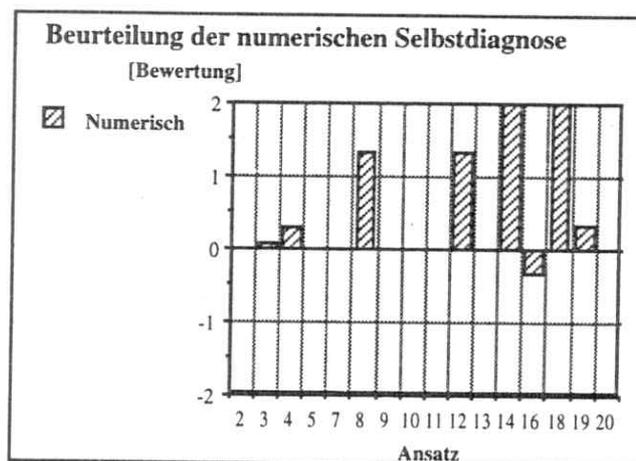
- Normalisierter Kreuzkorrelationskoeffizient (untere Grenze 0.35-0.70)
- Quadrat des normalisierten Kreuzkorrelationskoeffizienten mit Beibehaltung des Vorzeichen (untere Grenze 0.3)
- Geschätzte Genauigkeit der Parallaxe mit maximaler Grenze von einigen 1/10 eines Pixels
- Kantenstärke

**Tabelle 3.11** Liste der verwendeten internen Qualitätsmaße zur automatischen Selbstkontrolle mit einigen üblichen Schwellwerten.

In einigen Fällen wurden automatische Kontrollen **nach der Zuordnung** durchgeführt. Die Parameter der relativen Orientierung wurden benutzt, um verbleibende y-Parallaxen im Epipolarbild zu überprüfen, die auf problematische Zuordnungen hinweisen könnten. Numerische Werte wurden entweder für jede Parallaxe angegeben oder in Form eines gut/schlecht Indikators bzw. auch in Kombination. Dies wurde unterstützt durch visuelle Darstellungen wie Photographien, 3D-Beschreibungen oder Plots.

Die verwendeten numerischen Maße sind in den meisten Fällen für die interne Qualitätskontrolle geeignet. Einige Maße waren allerdings öfters zu optimistisch (**Ansätze 8, 12, 14, 18**), wie in Abbildung 3.31 zu sehen. Ein Teilnehmer verwendete die Kantenstärke als Maß, die aber in seinen Datensätzen keinerlei Korrelation mit der Qualität der Zuordnungen gezeigt hat. Ein unterer Grenzwert für den normalisierten Kreuzkorrelationskoeffizienten von unter 0.5 ist nicht geeignet, aber auch ein Grenzwert von über 0.7 kann nicht immer falsche Zuordnungen vermeiden. Ein sehr gut anwendbares Maß ist die Schätzung der Genauigkeit der Parallaxe, wie sie bei den Kleinsten Quadrate Verfahren durchgeführt wird.

Insgesamt gesehen hat sich gezeigt, daß Verfahren zur internen automatischen Qualitätsanalyse existieren, die z.T. auch theoretisch untermauert sind, daß aber in vielen Fällen doch eine abschließende, mehr oder weniger starke Interaktion des Bearbeiters am Rechner erforderlich war, um Ergebnisse zu kontrollieren.



**Abbildung 3.31** Bewertung der numerischen Selbstdiagnose.

Noten -2 (zu pessimistisch), -1 (pessimistisch), 0 (treffend), 1 (optimistisch), 2 (zu optimistisch). Es wurde jeweils das Mittel aller Angaben zu dem betreffenden Ansatz über alle Bildpaare gebildet

### 3.9 Gesamtbewertung

Der Test zur Bildzuordnung sollte Auskunft geben über den aktuellen Stand der Bildzuordnung und die praktische Anwendbarkeit der Zuordnungsverfahren. Die Fragen der Anwendbarkeit und Flexibilität, der Genauigkeit und Zuverlässigkeit, der benötigten Vorkenntnisse und der Selbstdiagnose standen im Vordergrund. Zu diesem Zweck wurde geeignetes, umfangreiches Datenmaterial versandt und von insgesamt 17 Teilnehmern mit insgesamt 20 verschiedenen Zuordnungsverfahren und Strategien erfolgreich bearbeitet. Eine große Zahl unterschiedlicher Zuordnungsverfahren versuchte sich an möglichst vielen Testbildern, darunter auch solche Verfahren mit ganz anderen Anwendungsgebieten. Einige der Bilder wurden nur von jeweils 3 Teilnehmern bearbeitet, womit festzustellen ist, daß die meisten Verfahren für Extremfälle wie dem Baum in Bild 6 oder den transparenten Flächen in Bild 11 (OLYMPIA II) nicht ausgelegt sind. Die meisten Bilder wurden doch vom Großteil der Verfahren bearbeitet, in vielen Fällen sehr erfolgreich, wobei die hohe Komplexität der Bildpaare 8, 9, 10 und 12 aber doch einige Probleme brachte. Die schwierigen Stellen in diesen Bildern wurden entweder nur teilweise gelöst oder auch einfach umgangen.

Sowohl **rasterorientierte** als auch **merkmalsgestützte Zuordnungsverfahren** sind in den meisten Fällen erfolgreich. Es wird meistens eine gute Genauigkeit erreicht, die z.T. der Genauigkeit der manuellen Messung gleichkommt, und die Zahl der Ausreißer ist mit ca. 5 % erträglich. Dies gilt insbesondere für die Verfahren mit Kreuzkorrelation und mit Kleinster Quadrate Zuordnung.

Um die Reaktion auf **Oberflächen unterschiedlicher Komplexität** näher zu beleuchten, wurden die Ansätze 3, 4, 6, 9, 10, 15 und 17 speziell untersucht. Sie zeigen eine hohe **Anwendungsbreite** und Flexibilität, die sie für praktische Anwendungen sehr interessant machen. Es ist gelungen, für jedes Bild getrennt eine **Liste der besten Ansätze** zu erarbeiten. Zusammen mit der Beschreibung der Ansätze ist damit für den interessierten Benutzer ein Hilfsmittel gegeben, um geeignete Zuordnungsverfahren für bestimmte Bildinhalte zu finden. Für eine Gesamtbewertung, die die Anwendbarkeit und Flexibilität mitbeurteilt, wurde daraus eine **Rangfolge der Ansätze** abgeleitet, die dazu dient, praktisch einsetzbare Verfahren hervorzuheben. Diese verwenden bestimmte Strategien und Techniken, die für eigene Zuordnungsverfahren kopiert oder modifiziert werden können. Es hat sich gezeigt, daß einige der flexibleren Verfahren nur eine Anpassung der Steuerparameter benötigen (z.B. Ansatz 3), oder gar ohne eine solche auskommen (z.B. Ansatz 15). Die insgesamt gesehen besten Verfahren sind Ansatz 3, 17, 4 und 15 sowohl hinsichtlich Anwendbarkeit als auch hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Wie erwartet, zeigen **interaktiv** stark unterstützte Ansätze gute Ergebnisse. Dabei beschränkt sich die Interaktion nicht nur auf die Elimination von Ausreißern in der Endkontrolle, sondern auch auf wesentliche manuelle Unterstützung bei der Verbindung von zwei oder mehreren Verfahren. Dies bedeutet, daß Grob- und Feinzuordnung, die nicht mit demselben Verfahren arbeiten, nicht immer homogen in einem Guß ablaufen. Ein manuell unterstützter Start allein ist noch keine Garantie für ein gutes Ergebnis. Um Näherungswerte zu bekommen, können stattdessen auch andere Methoden benutzt werden, wie sie von einigen Teilnehmern mit Erfolg angewandt wurden und die mit der Feinzuordnung eine Einheit bilden, die auch theoretisch untermauert ist.

Dieser Test zeigt, daß **Genauigkeit** und **Zuverlässigkeit** gemeinsam betrachtet werden müssen. Die Genauigkeit in der Parallaxenmessung der Verfahren ist allgemein hoch. Überraschenderweise erzielen auch einige der merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren eine hohe Genauigkeit. Hier soll nochmals bemerkt werden, daß sich die Genauigkeitsangaben in den Kapiteln 3.4-3.7 auf die x-Parallaxendifferenzen zwischen Teilnehmermessungen und Vergleichsmessungen bezogen haben. Nur in Bild 1 liegen rechnerische Sollwerte vor. In Bild 1 erreichen einige Verfahren mit Kreuzkorrelation und mit Kleinster Quadrate Zuordnung Genauigkeit der Punktmessung im Bereich von 0.2 Pixel, was ein hervorragendes Ergebnis ist und voll im Bereich manueller Meßgenauigkeit liegt.

Die Genauigkeit der manuellen Vergleichsmessungen in den Bildern 2 bis 12 ist im Mittel bekannt (3.3.2) und liegt zwischen 0.15 Pixel und 0.28 Pixel, womit also auch für diese Bilder die Genauigkeit der automatischen Messung nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz abgeleitet werden kann. Vorsicht ist jedoch in den Fällen geboten, wo wenige Vergleichsmessungen durchgeführt worden sind, oder wo durch Elimination der Ausreißer nur wenige Messungen zum RMS Wert der Parallaxendifferenzen beitragen. Führt man die Fehlerfortpflanzung für die Ansätze durch, so stellt man

fest, daß mit Ausnahme der regionenorientierten Zuordnung (Ansatz 6), die schon von der Definition her größere Näherungswerte liefert, alle anderen Verfahren in der Lage waren eine **absolute automatische Punktmeßgenauigkeit** von 0.2 Pixel bis 1.5 Pixel zu erreichen, was ein unerwartet gutes Ergebnis darstellt. Dies war für jeden Ansatz zumindest in einem Teil der bearbeiteten Bilder möglich. Abweichungen davon resultierten aus z.B. ungeeigneter Wahl der Steuerparameter oder auch fehlenden internen Kontrollen.

In Bezug auf die **Zuverlässigkeit** der Zuordnung lassen sich keine vollkommen eindeutigen Aussagen treffen. In vielen Fällen ist jedoch mit einer überraschend hohen Zahl von Ausreißern zu rechnen von z.T. über 10-15 %, die für eine praktische Anwendung nicht akzeptabel sind. Trotzdem hat sich bei einigen Ansätzen gezeigt, daß insbesondere hierarchische Lösungen vorteilhaft sind. Ein Verfahren (Ansatz 3) benutzte mit sehr gutem Erfolg einen Algorithmus auf unterschiedlichen Auflösungen, mit Zuordnungen links nach rechts und rechts nach links sowie vielen ausgefeilten, internen Kontrollmechanismen. Andere Ansätze wiederum beruhen darauf, daß geeignete Algorithmen durch den Operateur für verschiedene Unteraufgaben ausgewählt und dann die Ergebnisse manuell vereinigt werden. In diesen Fällen besteht noch ein großer Bedarf zur Entwicklung von automatischen Auswahlkriterien und Strategien.

Die **Zahl der zugeordneten Punkte**, die benötigt werden, um die Objektoberfläche zu repräsentieren, hängt von der Form der Oberfläche ab. Mehrmals wurde eine **Anhäufung** von zugeordneten Punkten in Teilbereichen beobachtet mit fehlenden Daten an anderen Stellen. Um dieses Problem zu lösen wurde in einigen Ansätzen z.T. mit einer festen Unterteilung in Bildabschnitte gearbeitet oder auch eine feste Zahl von Punkten pro Epipolarlinie angestrebt. Ein Algorithmus, der pixelweise Ergebnisse liefert, ist von Vorteil, da eine nachträgliche Interpolation von beliebig verteilten Punkten kompliziert wäre. Liefert das Verfahren wie in einem Fall Informationen über Diskontinuitäten in der Parallaxe, könnte dies einen wesentlichen Beitrag zur Interpolation liefern, was allerdings nicht verwirklicht wurde.

Es wurde gezeigt, daß theoretisch untermauerte **Erwartungen** oder **Vorkenntnisse** über einen Ansatz hinsichtlich Feinzuordnung oder manuellem Einsatz (Strategie) durchaus geeignet sind, eine **Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsprognose** zu geben. Damit ist das Verhalten eines Ansatzes vorhersagbar, was selbstverständlich von großer Bedeutung für die Wahl eines Ansatzes für eine bestimmte Aufgabe ist. Der Test hat in diesem Zusammenhang wesentlich dazu beigetragen, insbesondere die Strategieseite näher zu beleuchten und zu beurteilen.

Eine **Maßstabsabhängigkeit** der Zuordnung ist nicht ausgeprägt. Auch ist keine klare Abhängigkeit von der **Vorentzerrung** festzustellen. Ein bereits entzerrtes Bild wird von vielen Verfahren benötigt, aber es hat sich gezeigt, daß die Parameter zur Entzerrung der Originalbilder auch erfolgreich aus den Bilddaten abgeleitet werden können.

Die wenigen automatischen bzw. numerischen Methoden der **Selbstdiagnose** arbeiten in der Regel gut. Sie sind z.T. auch theoretisch untermauert und mit empirisch festgelegten wirkungsvollen Schwellwerten versehen. Insgesamt ist das Abschätzen der Genauigkeit aus den Daten bezüglich einer Zuordnung erst in den letzten Jahren in einigen der Fachbereiche stärker in den Vordergrund getreten. Damit läßt sich wohl für die Zukunft die Erwartung ausdrücken, daß die jetzt noch enorm große Zahl manueller Kontrollen nach und nach zufriedenstellend automatisiert werden kann.

Was hat dieser Test im Sinne dieser Arbeit gebracht? Rückblickend bleibt festzustellen, daß ein derartiger empirischer Test nicht erschöpfend sein kann, weil die Aussagen von Randbedingungen und dem Umfang des Tests abhängig sind. Nur mit vertiefter konzeptioneller Analyse können weitergehende Aussagen abgeleitet werden. Immerhin wurde klar bestätigt, daß eine **große Anzahl von Zuordnungsverfahren sich zur praktischen Anwendung eignet**. Es gibt Unterschiede in der Anwendungsbreite und in der Genauigkeit. Letztlich hängt die Wahl für ein Verfahren davon ab, zu welchem Zweck die Punktmessung benötigt wird. Bezogen auf die theoretische, methodische Übersicht in Kapitel 2 sind einige Feststellungen bestätigt worden, andererseits aber auch unvermutete Ergebnisse zu vermelden.

Im folgenden **zweiten Teil** dieser Arbeit geht es um die Anwendung der Bildzuordnung zum Zweck der DGM Erfassung. Dies ist eine spezielle Klasse von Anwendungen mit ganz bestimmten Anforderungen. Man hat den Spezialfall von Luftbildpaaren und Geländeoberflächen. Die Anforderungen an die Strategie und die Genauigkeit sind sehr hoch. Die rasterorientierten Zuordnungsverfahren mit Kreuzkorrelation oder Kleinster Quadrate Zuordnung besitzen das erforderliche Genauigkeitspotential zur Lösung der Punktmessung. Verbunden mit einer guten Strategie kann eine große Anwendungsbreite und damit eine hohe Flexibilität erreicht werden. Die Frage der Näherungswerte läßt sich mit denselben Verfahren (Hierarchie) oder mit merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren zufriedenstellend lösen.

## 4 AUTOMATISCHE DGM/DHM ERZEUGUNG

Eine besonders aktuelle und wichtige Anwendung der digitalen Bildzuordnung betrifft die automatische Generierung digitaler Geländemodelle aus Bilddaten (4.1). In den Kapiteln 2 und 3 wurde nur allgemein von Zuordnung gesprochen, hier wird sie nun auf einen konkreten Spezialfall angewandt.

Anwendungsgebiet für das Digitale Höhenmodell war ursprünglich die Ableitung von Schichtlinien für kartographische Zwecke, heute ist aber auch die Gewinnung von Höheninformation zur Steuerung der Orthophotoherstellung und zur Regi-strierung von Satellitenszenen von großer Bedeutung. Aus dem Höhenmodell lassen sich auch Profile, Querschnitte und Volumenbestimmungen für den Verkehrswegebau, Neigungsmodelle für die Flurbereinigung, Sichtbarkeitsanalysen für Militär oder Fernsender und vieles mehr ableiten. Dies hat bewirkt, daß seit Anfang der 70er Jahre der Bedarf an Höheninformation und daraus abgeleiteten Produkten deutlich zugenommen hat und digitale Höhenmodelle zu einem eigenständigen Vermessungsprodukt geworden sind. Die konventionellen Methoden zur DHM Erfassung stützen sich auf **tachymetrische Messungen, Digitalisierung von Schichtlinien** in Karten oder auf **photogrammetrische Methoden**. Hier sollen nur die photogrammetrischen Verfahren betrachtet werden.

Mit den neuen Möglichkeiten der Speicherung von digitalen Bildern und der Bildzuordnung stehen strategische Gesichtspunkte (4.3, 4.4) im Vordergrund. Um diese darzustellen wird zuerst auf bisherige photogrammetrische Verfahren zur DHM Erfassung und Generierung zurückgeblückt (4.2). Danach werden die in Kapitel 2 und 3 gemachten Erfahrungen mit der digitalen Bildzuordnung in ein **erstes konkretes Konzept zur automatischen digitalen DHM Erfassung** eingebracht (4.5), das sich gegenüber der konventionellen Messung in der Philosophie wesentlich unterscheidet.

### 4.1 Geländebeschreibung und Geländemodellierung

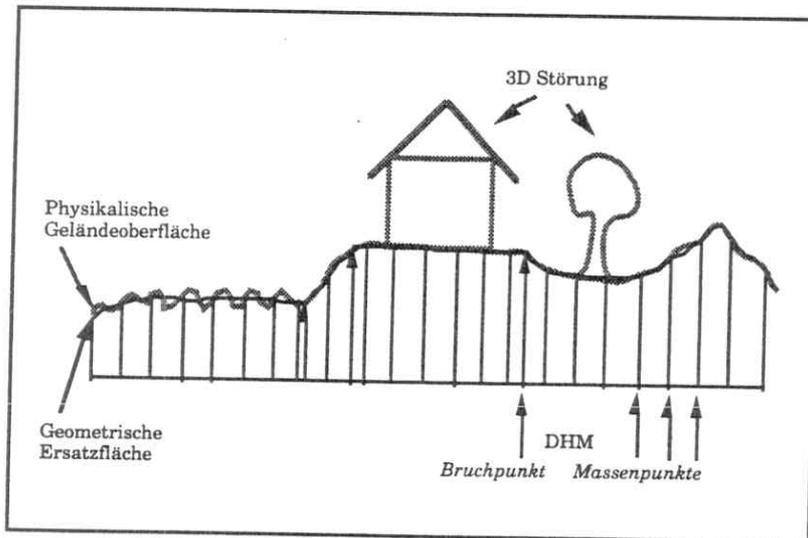
Die Grundlage für die photogrammetrische Erfassung der Geländeoberfläche bilden hier optisch photographische Abbildungen der Erdoberfläche. Die Abbildungen beziehen sich auf die physikalische Realität im Bereich der betreffenden Wellenlängen. Ziel der Geländeerfassung ist nicht die physikalische, sichtbare Oberfläche selbst, sondern eine geometrische Ersatzfläche, die die geometrische Idealisierung der physikalischen Erdoberfläche darstellt (Wild, 1983). Dabei ist zu beachten, daß die **Definition der Geländeoberfläche** bzw. der **Ersatzfläche** im Detaillierungsgrad nicht eindeutig ist, sondern von den jeweiligen Anforderungen der Anwendung abhängt. Eine Beschreibung von Ackerfurchen, die möglicherweise abgebildet sind, ist für die Herstellung topographischer Kartenwerke bedeutungslos. Andere Anwendungen, wie z.B. Untersuchungen zum Fahrwerksdesign von Kettenfahrzeugen, sind hingegen an einer Mikrostrukturanalyse mit Zentimeterauflösung interessiert, wobei z.B. Ackerfurchen wesentlicher Bestandteil der Geländebeschreibung werden können. Damit wird über die Anwendung und die physikalischen Beschränkungen aus der Aufnahme ein Maß für die Idealisierung, d.h. ein Modell festgelegt.

Hier befassen wir uns mit dem Thema topographischer Beschreibungen im Sinne von topographischen Karten in größeren und kleineren Maßstäben. Ziel ist die Approximation einer geometrischen Ersatzfläche auf der Basis von **Sampling** (punktweise Erfassung), dabei unterscheidet man üblicherweise in der Realisierung verschiedene Möglichkeiten der Erfassung. Diese erfolgt durch Stützpunkte in dreieckiger oder rechteckiger Gitterstruktur und/oder durch Formparameter, d.h. rein geometrische Parameter. Die Zielsetzung der Messung und der Generierung eines Digitalen Geländemodells besteht in der möglichst kompletten und dichten Beschreibung der Oberflächenform inklusive Bruch- und Strukturlinien. Beschreibt das Digitale Geländemodell ausschließlich die Höhen von Punkten der Oberfläche in Abhängigkeit von Lagekoordinaten, so spricht man von einem **Digitalen Höhenmodell**.

In aller Regel wird die geometrische Ersatzfläche als einwertig vorausgesetzt, d.h. die Höhe ( $z$ ) eines Punktes ist eine Funktion der Lagekoordinaten,  $z = f(x,y)$ . Dies wird üblicherweise als 2.5-D Darstellung bezeichnet, da es die Beschreibung einer kontinuierlichen nicht gefalteten Fläche im Raum ist. Zulässig sind sogenannte Bruchkanten, d.h. Sprünge in der 1. Ableitung (Neigungssprünge) wegen Sonderformen und morphologischen Details. Zu beachten ist,

daß nicht nur Höheninformation, sondern auch planimetrische Information von Bedeutung ist. Es werden üblicherweise keine Grundrisse von z.B. Gebäuden erfaßt, wichtig sind jedoch planimetrische Informationen, die Bedeutung für die Höhe haben, wie Uferlinien von Seen oder geomorphologische Linien, die markante Strukturen der Erdoberfläche beschreiben. Dies bedeutet, daß die Art der Beschreibung mit kleinen Rastern und Elementarflächen noch nicht ausreicht, um die morphologischen Strukturen im Gelände zu beschreiben. Eine weitergehende Beschreibung ist erforderlich, die Bruch- und Strukturlinien miteinbezieht, um eine hohe Qualität des digitalen Geländemodells zu erreichen. Dies wird immer wichtiger, je geringer die Samplingrate wird. Bei weiteren planimetrischen Linien handelt es sich um die Begrenzungslinien für den Meßbereich und Aussparungsflächen wie Waldgebiete oder dicht bebaute Gebiete.

Das grundsätzliche Problem bei der photogrammetrischen Geländeerfassung besteht nun darin, daß die in den Bildern abgebildete Oberfläche nicht in jedem Fall die physikalische Geländeoberfläche, geschweige denn die geometrische Ersatzfläche ist. Allerdings ist zu bemerken, daß gerade die abgebildete Oberfläche (z.B. Vegetationsoberflächen) für manche Anwendungen, wie die Orthophotoherstellung, gewünscht sein kann. Die grundsätzliche Schwierigkeit bei der Definition der Ersatzfläche tritt vor allem bei **Gebäuden** und **Vegetation** in Erscheinung. Diese werden im Zusammenhang mit einer Geländeerfassung nicht als Bestandteile des Geländes, sondern als **3D-Störungen** bezeichnet. Die Ersatzfläche approximiert nicht die 3D-Form des Hauses oder des Baumes, sondern stellt die gedachte Fortsetzung der Geländeoberfläche unter dem Haus oder unter dem Baum dar. Abbildung 4.1 zeigt ein Profil durch ein Gelände mit der geometrischen Ersatzfläche und der Approximation durch Massen- und Bruchpunkte im Digitalen Höhenmodell.



**Abbildung 4.1** Physikalische Oberfläche, geometrische Ersatzfläche und Approximation durch Gitter- oder Massenpunkte und Bruchpunkte im Digitalen Höhenmodell.

Für die Zukunft steht die Erweiterung dieses Konzepts auf die 3D-Modellierung des Geländes einschließlich Gebäuden usw. an, d.h. die Erweiterung der 2.5D-Geländemodellierung zu einer 3D-Objektmodellierung. Zur Beschreibung von Gebäuden und Sonderformen wie Brücken, Höhlen, Überhängen etc., bedeutet dies, daß jeder Lageposition mehrere Höhenwerte zuzuordnen sind. Damit ist die Einwertigkeit der Ersatzfläche nicht mehr gegeben und es muß der Übergang von einer 2.5D- zu einer 3D-Darstellung erfolgen. Selbst Bäume und Äste könnten dreidimensional modelliert werden, dies bleibt hier aber ausgeklammert.

## 4.2 Konventionelle photogrammetrische DGM/DHM Erzeugung

Die **DGM Erzeugung** läßt sich in einen **Erfassungsteil**, d.h. die Messung des Geländes (Sampling), und in einen **Generierungsteil**, d.h. die rechnerische Ableitung eines digitalen Geländemodells oder Höhenmodells aus den erfaßten Daten (siehe z.B. Torlegård, 1983), einteilen. Konventionell ist beides also getrennt. Die Messung erfolgt z.B. im Analytischen Plotter, die DHM Generierung erfolgt durch rechnerische Interpolation.

#### 4.2.1 Konventionelle Methoden der photogrammetrischen DHM Erfassung

Die **Philosophie** der konventionellen photogrammetrischen Messung des Geländes ist charakterisiert durch **Interaktion** und durch das **Minimalprinzip**. Der menschliche Operateur mißt im orientierten Stereomodell Punkte, Bruch- und Strukturlinien. Als wirtschaftliche Randbedingung gilt, daß er mit möglichst wenig Punkten eine für den jeweiligen Zweck adäquate Beschreibung des Geländes erreicht. Der Operateur entscheidet über die Auswahl von Punkten. Er stellt sich die Ersatzfläche vor und mißt entsprechend. Er leistet also Interpretationsarbeit, indem er den zu messenden Geländepunkt so auswählt, daß der Punkt nicht auf einer 3D-Störung aufsitzt, sondern eine möglichst markante Stelle der Geländemorphologie wiedergibt. Die Punkte werden also intelligent gesetzt und 3D-Störungen werden vermieden. Es liegt **keine Redundanz** der Messungen vor und es ist **keine direkte Qualitätskontrolle** möglich. Die Qualität ist also wesentlich vom Operateur abhängig. Ausreißer sind meist nur nachträglich und nur schwer festzustellen. Dadurch daß möglichst wenig Punkte gemessen werden sollen, ist die gleichzeitige Erfassung von morphologischen Strukturen wesentlich, um eine gute Geländebeschreibung zu erhalten.

Die **manuelle selektive Einzelpunkterfassung** setzt auf die Erfassung weniger aber morphologisch bedeutender Punkte und Punktreihen. Markante Einzelpunkte sind z.B. Hoch- oder Tiefpunkte im Gelände. Bruchkanten werden als Punktreihen erfaßt, desgleichen Strukturlinien, die andere Typen von geomorphologischen Gegebenheiten repräsentieren. Auch die Begrenzungslinien des DHM werden als Punktreihen erfaßt.

Bei der **homogenen Massenpunkterfassung** wird die ungefähre Lage von Punkten nach einer z.B. quadratischen oder rechteckigen Gitterstruktur vorgegeben. Am Meßgerät werden diese Punkte dann automatisch angefahren und durch stereoskopische Parallaxenmessung die Höhenbestimmungen ausgeführt. Die Gitterlinien können im gleichen Sinne auch profilweise abgearbeitet werden. Der Operateur übernimmt hier reine Meßaufgaben, sofern der angefahrene Punkt nicht auf Vegetation oder Gebäuden sitzt. In diesen Fällen wird seine Interpretationsfähigkeit gefordert und er wählt einen geeigneten Punkt in der Nähe aus. Die homogene Struktur begünstigt eine Automation. So waren auch die Ansätze mit elektronischer Korrelation zur Höhenmessung nach dieser Methode ausgerichtet.

Das „**Progressive Sampling**“ (Makarovic, 1973) ist eine Erfassungsmethode, bei der die Gitterstruktur an die Geländeoberfläche adaptiert wird. Ausgehend von einem homogenen groben Gitter wird in den Gebieten weiter verdichtet, in denen starke Variationen der Höhen auf bewegtes Gelände hinweisen. Dem Vorteil einer möglichen großen Reduktion in der Punktzahl, vor allem bei wenig bewegtem Gelände, steht die Gefahr gegenüber, markante Geländestrukturen innerhalb einer Gittermasche nicht zu erkennen, die durch interaktive Übersichtskontrollen aufgefangen werden muß. Die Methode des „**Composite Sampling**“ (Makarovic, 1979) erfaßt zuerst die morphologisch bedeutsamsten Strukturen durch selektive Einzelpunktmessung, und füllt die Zwischenräume durch Massenpunktmessung nach der Methode des „Progressive Sampling“ aus. Hier wird nun wieder eine Interpretation durchgeführt, die sich aber auf markante Strukturen beschränkt und die größeren, weniger variierenden Gebiete durch Massenpunkte erfaßt. Diese Methode wird in der photogrammetrischen Praxis am häufigsten angewandt.

Für alle angesprochenen Verfahren gilt, daß 3D-Störungen durch Interpretation ausgespart oder umgangen werden. Großräumige Flächen, wie z.B. geschlossene Waldgebiete, werden von vornherein ausgeschlossen. Liegt ein Meßpunkt auf einer einzelnen 3D-Störung, werden stattdessen Punkte in der nächsten Nachbarschaft ausgewählt. Allgemein gilt auch, daß Qualitätsmaße für die Messung nur generell gegeben sind, d.h. nicht für jeden gemessenen Punkt getrennt ausgewiesen werden können.

#### 4.2.2 Konventionelle DGM/DHM Generierung

Bei der DHM Generierung werden die **rohen Meßdaten** üblicherweise einer **Vorverarbeitung** unterzogen, wo Fehler beseitigt, Daten verdichtet oder ausgedünnt und systematische Fehlereinflüsse durch Verzeichnung, Gerätefehler usw. bereinigt werden. Nach der Aufbereitung der Meßdaten erfolgt die **Generierung** des DHM's durch **Interpolation**. Das DHM besteht üblicherweise aus einer Zahl diskreter Punkte in Gitterform angeordnet und aus Bruchkanten. Die Höhen der Gitterpunkte werden aus den gemessenen Höhen durch Interpolation abgeleitet. Unter Umständen werden direkt die gemessenen Höhenwerte miteinbezogen, oder das ganze DHM wird nur auf diesen aufgebaut.

Die wichtigsten Klassen von Gitterstrukturen sind die regelmäßigen und die Dreiecksraster. Entscheidend ist, daß die Raster häufig so eng gewählt werden, daß innerhalb des Rasters eine einfache Interpolation genügt. Eine geeignete Interpolationsvorschrift ist erforderlich, um die Höhen von beliebigen Punkten aus den bekannten Gitterhöhen zu berechnen.

Das Raster ist aus den genannten Gründen bei regelmäßiger Struktur enger als das Samplingsintervall (also das Meßintervall) zu wählen, bei Dreiecksrastern ist es meist gleich. Bei Dreiecksrastern ist die Zahl der Punkte üblicherweise niedriger, aber es ist wichtig, daß diese Punkte repräsentativ gesetzt sind, wobei für hohe Anforderungen nicht linear interpoliert werden muß.

Die **Genauigkeit** eines DHM's, also die Höhenfehler an beliebig interpolierten Punkten, hängt im Grunde nur davon ab, wie gut die Geländeoberfläche beim Sampling erfaßt wird, d.h. je nach Geländeschwierigkeit von der Punktdichte und den morphologischen Zusatzmessungen. Die notwendige Punktdichte ist stark von der Geländerauhigkeit, d.h. der Bewegtheit des Geländes, abhängig. Mit anderen Worten sind das Krümmungsverhalten und nicht die Neigungen oder Höhenwerte bestimmend (Ackermann, 1993). Üblicherweise liegt die DHM Genauigkeit  $\sigma_{\text{DHM}}$  im Bereich von  $\sigma_{\text{DHM}} \geq 0.1-0.2 \text{ ‰} \cdot h_g$  ausgedrückt in der Flughöhe  $h_g$ , oder bei  $\sigma_{\text{DHM}} \geq 2 \sigma_{\text{man}}$ , als Funktion der stereoskopischen Meßgenauigkeit  $\sigma_{\text{man}}$ .

Eine abschließende Editierung ermöglicht es, das strukturierte Gitter, Bruchkanten und auch singuläre Punkte zu korrigieren. Außer statistischen Tests werden **keine Qualitätskontrollen** vorgenommen. Neuerdings wird allerdings durch Rückprojektion des abgeleiteten Gitters oder der daraus erzeugten Schichtlinien ins Stereomodell eine visuelle Überprüfung ermöglicht.

Die Ableitung des DHM's und der Folgeprodukte, wie Schichtlinien oder Neigungskarten, wird heutzutage rechnergestützt durchgeführt. Diese sind nicht Gegenstand der eigentlichen DHM Generierung. Insgesamt ist festzustellen, daß für hohe Genauigkeit der Meßaufwand stark ansteigt. Der größte Anteil an der Erzeugung eines Digitalen Höhenmodells hinsichtlich Zeit und Aufwand liegt in diesen Fällen in der Erfassung der Geländehöhen, mit einem Anteil von ca. 60 % am Gesamtaufwand.

### 4.3 Automatische DHM Generierung durch digitale Bildzuordnung

Mit der digitalen Speicherung von Bildern und der Anwendung von Verfahren zur Bildzuordnung für die Punktmessung werden **Möglichkeiten** geschaffen, die DHM Generierung zu automatisieren, wobei nun die Messung oder Erfassung und die Generierung des DHM's zusammenfallen können. Insofern ist dies ein Ausdruck der Entwicklung hin zur digitalen Photogrammetrie. Die besondere **Motivation** dabei ist die Entlastung des menschlichen Operateurs von mühsamer Meßarbeit, die automatisiert werden kann. In diesem Zusammenhang spielt auch die Wirtschaftlichkeit eine Rolle, die hoch ist, wenn schnelle Meßverfahren eingesetzt werden können. Eigentlich müßte auch die Genauigkeit eine Rolle spielen, die wegen der möglichen höheren Punktdichte höher werden müßte.

#### 4.3.1 Anforderungen an die automatische DHM Generierung

Eine Automation der DHM Generierung betrifft zunächst die Messung. Eine Automation sollte keinen Rückschritt gegenüber der konventionellen Methode bringen, sondern klare Vorteile durch Ausnutzung neuer technischer Möglichkeiten. Eine Kopie konventioneller Verfahrensschritte ist nicht unbedingt notwendig, kann aber in bestimmten Umfang in Betracht gezogen werden. Solange nicht alle Schritte automatisiert sind, ist ohnehin eine Schnittstelle zum konventionellen Verfahren erforderlich.

Das Gesamtziel einer genauen, effizienten Erfassung des DHM's gliedert sich in eine Reihe von Teilaspekten, z.B. minimale Interaktion, qualitativ hochwertige Erfassung von Massenpunkten und Strukturen, Eliminierung von 3D-Störungen und Wirtschaftlichkeit (siehe Tabelle 4.1).

- Minimale manuelle Vorbereitung
- Automatische Erfassung von Massenpunkten
- Automatische Erfassung von morphologischen Strukturen
- Automatische Erfassung von 3D-Störungen oder robuste Eliminierung
- Selbstdiagnose (Zuverlässigkeit, Präzision)
- Minimale manuelle Nachbereitung
- Schnelligkeit, Wirtschaftlichkeit
- Optionale Schnittstelle zur klassischen DHM Erzeugung

**Tabelle 4.1** Anforderungskatalog an ein automatisches Verfahren zur DHM Erfassung.

Idealerweise wird völlige **Autonomie** angestrebt, d.h. Interaktivität ist stark zurückgedrängt, oder sogar eliminiert. Realistisch gesehen ist Interaktion vorerst noch ein geringer Bestandteil des Erfassungsvorganges. Der Bearbeiter bestimmt, in welchen Gebieten gemessen werden soll und er beurteilt das Resultat einer automatischen Messung. Das bedeutet, daß sein Mitwirken nicht für eine interaktive Kontrolle des Meßvorgangs gefordert wird, sondern für Vorbereitungsarbeiten und abschließende Akzeptanzüberprüfung. Damit ist also nicht ausgeschlossen, daß auch diese Aufgaben weiter automatisierbar sind, was sowohl durch algorithmische Lösungen als auch mit Hilfe wissensbasierter Systeme möglich sein sollte. Die in jedem Fall durchzuführenden Vorbereitungen umfassen typische Aufgaben wie die Orientierung der Bilder, die Digitalisierung von Begrenzungslinien und eventuellen Aussparungsflächen. Weiterhin sind vom Bearbeiter Prozeßparameter bereitzustellen, wie Gitterweiten für das DHM oder Parameter zur Kontrolle der eingesetzten Bildzuordnungsverfahren.

Die **Meßstrategie** wird sich zunächst danach ausrichten, Massenpunkte und morphologische Strukturen zu erfassen. Massenpunkte und Strukturlinien bedingen sich gegenseitig. Bei vielen Massenpunkten braucht man weniger Strukturlinien und umgekehrt. Bei Massenpunkten sollte keine Interaktion durch den Operateur erforderlich sein. Bei morphologischen Strukturen genügt die Messung der Höhen allein nicht, die Strukturen müssen erkannt, interpretiert und lokalisiert werden. Dabei ist ein Unterschied, ob sie direkt interaktiv gemessen werden oder durch Analyse der lokalen Geländemorphologie erkannt und lokalisiert werden können.

Die Meßstrategie muß auch **Problemgebiete** umgehen, d.h. solche Gebiete, in denen nicht gemessen werden soll. Mit Zusatzinformation, z.B. Multispektralbildern, ist eine Automation denkbar. Hier wird zunächst auf die interaktive Angabe durch den Operateur zurückgegriffen, der Flächen ausschließt.

Eine unüberwachte Messung muß in der Lage sein, selbständig **Probleme bei der Messung** zu erkennen und zu interpretieren. Ein einzelner fehlender Meßpunkt darf nicht die gesamte Messung stoppen. Probleme können aus schlechter Bildqualität oder schwacher Textur im Gelände resultieren. Solche Gebiete müssen überbrückt werden können, bzw. die Messung an dieser Stelle abgebrochen und an anderer Stelle fortgesetzt werden können.

Ob **3D-Störungen**, z.B. durch Gebäude, automatisch erkannt und eliminiert werden, hängt von der Meßstrategie ab. Sind geeignete Verfahren vorhanden, 3D-Störungen zu rekonstruieren und zu umgehen, so gestatten sie unter Umständen auch diese in ein Geländemodell mit aufzunehmen, d.h. ein Geländemodell kann damit um ein Objektmodell erweitert werden.

Der gesamte Meßvorgang muß insgesamt so ausgelegt sein, daß das System selbständig interpretiert und auch in der Lage ist, eigene Fehler zu erkennen und zu analysieren, d.h. eine **Selbstdiagnose** über Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu geben. Hinsichtlich dieser Parameter sind die Leistungen einer konventionellen Messung zu erreichen oder zu übertreffen. Selbstdiagnose wird bei großer Redundanz mit statistischer Analyse aus den Daten selbst denkbar, damit ergeben sich völlig neue Möglichkeiten im Vergleich zur konventionellen Messung.

Problemstellen, die vom Programm erkannt sind, müssen dem Bearbeiter in geeigneter Form zur **Editierung** aufbereitet werden. Damit wird eine manuelle **Akzeptanzprüfung** unterstützt oder überhaupt erst ermöglicht, die den wesentlichen Teil der Nachbearbeitung darstellt. Zum Komplex der Editierung gehört auch die Qualitätskontrolle, dabei

ist die Information von der Selbstdiagnose von entscheidender Bedeutung. Bei automatischen Verfahren hat die **Qualitätskontrolle** größere Bedeutung gegenüber der konventionellen Erfassung. Nicht allein die Genauigkeit ist von Bedeutung, sondern auch die Zuverlässigkeit. Eine Selbstdiagnose macht Aussagen über die Erfüllung der Aufgabenstellung, die letztlich vom Bearbeiter beurteilt wird. Dazu stehen dem Bearbeiter vor allem visuelle Hilfsmittel wie z.B. „Superimposition“, d.h. die Einspiegelung der Ergebnisse in das Stereomodell, zur Verfügung.

Die **Schnelligkeit** des Verfahrens ist ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit. Aus der Geschwindigkeit der konventionellen Erfassung ergibt sich als realistische Zielvorstellung für die Schnelligkeit der automatischen Methode, z.Zt. eine Meßdauer von unter einer Stunde für ein übliches photogrammetrisches Modell.

Eine **Schnittstelle** zur klassischen DHM Speicherung und den entsprechenden Folgeprogrammen ist erforderlich. Diese Programme sind in die Praxis eingeführt und sollten auch weiterhin verwendet werden, wo dies sinnvoll erscheint.

Aus den oben angestellten Überlegungen lassen sich 2 Hauptrichtungen für eine automatische DHM Generierung absehen:

- a) der **Minimalaufwand an Messungen** im Sinne der bisherigen, konventionellen photogrammetrischen Methoden wird beibehalten. Es muß dann allerdings **Intelligenz** eingebracht werden. Eine Anlehnung an interaktive Steuerung ist vorzusehen, aber im Extrem sollten Methoden der Künstlichen Intelligenz die notwendigen Interpretationsarbeiten erbringen.
- b) **algorithmische Lösungen**, die mit **hoher Redundanz** der Messungen arbeiten, also sehr viele Punkte messen. Dabei soll die anschließende **statistische Analyse** die Intelligenzleistung erbringen. Technische Voraussetzung ist, daß die Elementarverfahren schnell sind.

#### 4.3.2 Eignung von Bildzuordnungsverfahren zur DHM Messung

Nach der Formulierung der Anforderungen an eine automatische DHM Erfassung vom Standpunkt des Endprodukts DHM sollen nun spezielle Erfahrungen aus den Kapiteln 2 und 3 konsultiert werden, um zu sehen, inwieweit existierende Bildzuordnungsverfahren in der Lage sind, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Die detaillierten Beschreibungen der Bildzuordnungsverfahren dienen dazu, Hilfsmittel zur Erfassung von Höheninformation durch direkte Bestimmung oder durch Messung von Parallaxen mit ihren Vor- und Nachteilen vorzustellen. Das Interesse hier ist nun eingeschränkt auf die möglichen Anwendungen von Bildzuordnungsverfahren im Bereich der photogrammetrischen Luftbildmessung zur DHM Erfassung, d.h. für topographisches Gelände. Wie in 3.9 festgestellt wurde, sind eine größere Auswahl von Bildzuordnungsverfahren in der Lage, die wesentlichen Anforderungen an Anwendbarkeit, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Selbstdiagnose zu erfüllen.

Es hat sich insbesondere gezeigt, daß die **rasterorientierten Verfahren** für die Feinzuordnung die genauesten Ergebnisse liefern, wobei kein Unterschied zwischen Korrelationsverfahren und den Verfahren nach der Kleinsten Quadrate Methode festzustellen ist. Einige der **merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren**, die mit Linien oder Regionen arbeiten, sind für übliche Anforderungen an eine DHM Messung nicht genau genug. Ihr zusätzlicher Einsatz kann aber zur Näherungswertbestimmung in Betracht gezogen werden. Die mit linien- oder flächenhaften Merkmalen arbeitenden Verfahren könnten insbesondere bei großmaßstäbigen Anwendungen, z.B. der Berücksichtigung von Gebäuden, durchaus sehr leistungsfähig sein.

Der Test hat nicht bestätigt, daß eine Bildzuordnung über das Geländeobjekt nach der Kleinsten Quadrate Methode vorteilhafter ist als die herkömmliche Bild- zu Bild-Zuordnung. Der Einsatz solcher komplexer Verfahren in der DHM Messung ist bis auf weiteres kritisch zu beurteilen. Die kombinierte Methode verlangt einen hohen Rechenaufwand und bietet zumindest für den üblichen Fall eines Stereobildpaares zunächst keine weitergehenden Vorteile hinsichtlich der Lösung von Vieldeutigkeiten und Verdeckungen an, trotz der allgemeineren Konzeption.

**Hierarchien** in der Pixelauflösung sind ein geeignetes Mittel, um das Problem der Näherungswerte in Griff zu bekommen. Hierarchien in der Kombination verschiedener Verfahren sind eine Alternative, wobei allerdings Anpassungsschwierigkeiten der Verfahren auftreten können.

Eine **automatisierte selektive Auswahl** von Punkten ist möglich durch den Einsatz von Interestoperatoren. Dies kommt der Anforderung nach lokaler Interpretation sehr entgegen und stellt zweifellos eine günstige Eigenschaft dar (Kölbl, 1990; Baltsavias, 1988).

Eine hohe **Zuverlässigkeit** ist bei einer Messung eines Luftbildpaares gegenüber einer Mehrbildkorrelation im Nahbereich nur schwer zu erreichen. Es wurde aber gezeigt, daß auch lokal ein hoher Grad an Zuverlässigkeit durch ausgefeilte Strategien, die auf langer Erfahrung beruhen, erreicht werden kann. In der Regel wird mindestens eine globale Analyse der Messungen hinsichtlich grober Fehler unter Einbeziehung von Nachbarschaftsinformation erforderlich sein.

Der Anforderung nach **Selbstdiagnose** kann von Seiten der Zuordnung Rechnung getragen werden. Mehrere Verfahren sind in der Lage, eigene Fehler zu erkennen und zu eliminieren oder zumindest interne Genauigkeitsschätzungen für die Parallaxenmessungen zu liefern, die dann in einer abschließenden globalen Akzeptanzüberprüfung beurteilt werden.

Die **Automatische DHM Generierung** mit digitaler Bildzuordnung setzt sich in einer Reihe von Eigenschaften deutlich von der konventionellen photogrammetrischen DHM Bestimmung ab. Es ist nicht nur die Automatisierung eines bestehenden Verfahrens, sondern eine neue Leistungsebene. Insbesondere erlauben Möglichkeiten zur Geschwindigkeitssteigerung neue Strategien, nämlich dichte Punkte, Redundanz und höhere Genauigkeit und damit verbunden objektive, reproduzierbare Qualität. Einige dieser Vorzüge sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Zeit- und operatorsunabhängige Meßqualität</li><li>• Qualitätsmaße für jeden Meßpunkt</li><li>• Gleichzeitige Bearbeitung von mehr als zwei Bildern</li><li>• Mögliche Erweiterung zur Linien- und Flächenphotogrammetrie</li><li>• Ableitung von nicht geometrischen Merkmalen</li></ul> |
|---|

**Tabelle 4.2** Allgemeine Leistungsmerkmale der automatischen DHM Erfassung.

Unter diesem Gesichtspunkt sind die Operateursmessungen zwar intelligent und effizient, aber alle anderen Kriterien der Objektivität, Kontrollen usw. sind nicht gegeben. Hier sind jetzt die automatischen Verfahren auf einer völlig neuen **Qualitätsebene**.

Da die automatische Parallaxenmessung gegenüber der klassischen Methode nicht auf das stereoskopische Sehen beschränkt ist, können mehr als zwei Bilder auf einmal bearbeitet werden. Damit kann ein erheblicher Beitrag zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Messung geleistet werden. Dies wird allerdings dadurch eingeschränkt, daß üblicherweise nur mit Stereobildpaaren gearbeitet wird, d.h. daß keine flächendeckende Mehrbildinformation vorliegt. Dies wäre nur eine Aufwandsfrage, wird in der Regel aber nicht gemacht.

Mit der automatischen Messung ist auch die direkte Erfassung von linien- oder flächenhaften Strukturen möglich. Das heißt, es erfolgt eine dramatische Erweiterung der Möglichkeiten gegenüber der operatorsbedingten Punktphotogrammetrie zur Linienphotogrammetrie (Mulawa, 1989; Zielinski, 1992). Dies mag für die Messung der Höhen in natürlichen Gebieten von geringer Bedeutung sein, für die Einbeziehung von künstlichen Bauwerken zur Erzeugung eines realen 3D-DGM ist die Linienphotogrammetrie hingegen ein wesentlicher Ansatzpunkt. Das gleiche gilt für die Erweiterung zur Flächenphotogrammetrie.

Neben der Möglichkeit der morphologischen Beschreibung des Geländes eröffnen sich durch den Einsatz allgemeiner Bildanalyseverfahren die Möglichkeiten, andere Merkmale, wie z.B. Texturmaße, direkt abzuleiten und in ein Geländemodell zu übernehmen.

## 4.4 Realisierung der automatischen DHM Generierung

Um die angesprochenen Anforderungen an automatische Messung, Genauigkeit, Selbstdiagnose, minimale Interaktion und Schnelligkeit in die Realität umzusetzen, bedarf es in erster Linie der methodischen Entwicklung zur bestmöglichen Ausnutzung des Hilfsmittels Digitale Bildzuordnung in dem Prozeß. Gewisse technische Voraussetzungen sind dazu erforderlich, die hier kurz genannt werden. Wesentlich wichtiger ist die konzeptionelle Realisierung der DHM Erfassung.

### 4.4.1 Technische Voraussetzungen für die Automation der DHM Generierung

Die technischen Randbedingungen stehen in dieser Arbeit nicht im Vordergrund, sie sollen aber kurz beleuchtet werden, da die Begrenzungen durch die Hardware die bisherige Entwicklung in großem Maße behindert hat. Solange Bildverarbeitungssoftware auf Rechnern mit 32 KByte Kernspeicher geschrieben werden mußte, waren nach eigener Erfahrung mehr als 80 % aller Anstrengungen darauf ausgerichtet, die Programme so zu organisieren, daß der sehr kleine Speicherplatz optimal ausgenutzt wurde. Das heißt, daß der größte Teil der Arbeit rein organisatorischer Art war und nicht der methodischen Entwicklung gewidmet werden konnte. Man kann auch sagen, daß die Hardware Hilfsmittel noch nicht angemessen genug waren. Dies hat sich nun bereits deutlich geändert. Die drei wesentlichen **Systemtypen** für den Zweck der automatischen DHM Erfassung sind Analytischer Plotter oder Monokomparatoren, ausgerüstet mit Videokameras (Ackermann 1983; Cogan 1984; Helava 1987), „Softcopy“ Photogrammetrische Arbeitsstationen (Cogan, 1988; Konecny, 1988) oder reine „General Purpose“ Rechner.

Grundsätzlich gilt die Forderung nach **hoher Rechnerleistung** und **ausreichender Speicherkapazität** als ökonomische Voraussetzung. Diese Forderungen werden in immer noch steigendem Maße mehr und mehr erfüllt. Moderne Arbeitsstationen arbeiten mit z.B. 150 MByte Kernspeicher. Parallelisierung unter Einsatz von Transputern (Cogan, 1988; Collins, 1987) kann die Geschwindigkeit zusätzlich steigern. Auch die Entwicklung von Speichermedien mit niedrigen Zugriffszeiten schreitet voran. Plattenlaufwerke mit einer Speicherkapazität im Bereich von GByte sind erforderlich, da bereits ein einzelnes digitalisiertes Luftbild mit 25 µm Pixelgröße ca 84 MByte Speicherplatz belegt.

Als Konsequenz der automatischen, nicht überwachten Verfahren erlangt die **Qualitätskontrolle** große Bedeutung. Sollte bei ausgereiften Systemen auch die Kontrolle weitestgehend automatisch sein, so sollte eine Akzeptanzentscheidung dem Bearbeiter überlassen bleiben. Dies ist eine stufenlose Entwicklung. Bis auf weiteres sind auch die Qualitätskontrolle und die Lösung von Problemgebieten doch noch der interaktiven Kontrolle überlassen. Die Systeme müssen dem Operateur jedoch alle Hilfestellung geben, z.B. durch Visualisierung. Punkte sind anzufahren, Gitter-, Bruch- oder Schichtlinien sind im Mono- oder Stereomodus in das Stereomodell zu projizieren, einzuspiegeln bzw. zu überlagern. Herkömmliche analytische Systeme erlauben dies mit bekannt hoher Präzision. Für die „Softcopy“ Systeme, die ohne Photos und voll digital arbeiten, sind daher Betrachtungseinrichtungen vorzusehen. Zur Realisierung dieser Anforderungen gibt es bereits eine Vielzahl von technischen Lösungen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß die technischen Randbedingungen und Komponenten für sich allein bereits gegeben sind, daß es aber an der Kombination aller erforderlichen Teile noch mangelt. Dies ist jedoch erkannt und wird durch die forcierte Entwicklung der „Softcopy“ Photogrammetrischen Arbeitsstationen angegangen, wie überhaupt die automatische DHM Generierung in die Domäne der digitalen Photogrammetrie gehört und die dort entwickelten Hilfsmittel verwenden sollte.

### 4.4.2 Konzeptionelle Realisierungsmöglichkeiten

Für eine methodische Realisierung der eigentlichen automatischen DHM Messung mit digitaler Bildverarbeitung bieten sich drei verschiedene Lösungswege an:

- Erstens eine automatische Massenpunktmessung mit Bildzuordnung unter Einsatz von den in den Kapiteln 2+3 vorgestellten Verfahren. Sie wird unterstützt durch den Operateur, in Form von Angaben über Meßbereiche und möglicherweise interaktiver Messung von Bruch- und Strukturlinien, sofern dies nicht bereits automatisch geht. Dieser Weg lehnt sich am ehesten an die bisherigen konventionellen Verfahren an und verbindet automatische

Messung mit intelligenter Führung. Untersuchungen dazu wurden z.B. schon von (Ackermann, 1986b; Li, M., 1987) durchgeführt.

- Zweitens eine Automation unter Einsatz von Methoden der KI und wissensbasierten Systemen, um eine möglichst hohe Qualität algorithmisch zu erreichen. Diese intelligenten Verfahren würden versuchen, die Intelligenzleistung des Operateurs durch KI Methoden und wissensbasierte Systeme zu erreichen. Zu diesem Ansatz gibt es Ideen, die aber sicherlich von einer operationellen Realisierung noch weit entfernt sind.
- Drittens eine algorithmische Lösung, die im Gegensatz dazu auf hoch redundante Massenpunktmessungen setzt, wobei keine speziellen Vorkehrungen getroffen werden, die Punkte an geomorphologisch interessante Stellen zu setzen. In einer anschließenden statistischen Analyse werden unter Ausnutzung der hohen Redundanz einige Probleme gelöst, die konventionell vom Operateur übernommen werden.

Generell sind die jeweiligen Anforderungen an die Automation eng mit dem Bildmaßstab, dem Objekt und der entsprechenden Aufgabenstellung verbunden sind. Bei **kleinmaßstäbigen Aufnahmen** treten einzelne Häuser oder Bäume nicht als 3D-Störungen in Erscheinung. Von Bruchkanten ist in der Regel kaum mehr zu sprechen, und Strukturlinien treten nur großräumig in Erscheinung und sind somit durch die Massenpunktmessung hinreichend genau erfaßt, da die lokalen Krümmungen durch die hohe Punktdichte genügend genau repräsentiert werden können. Die größten Probleme treten also bei **mittleren und großen Maßstäben** durch 3D-Störungen und markante Strukturlinien des Geländes auf.

Eine hier nicht weiter behandelte Voraussetzung bei der DHM Messung betrifft die Orientierung des Bildpaares aus Aerotriangulation oder mit Paßpunkten. In beiden Fällen ist Automation möglich und auch bereits realisiert. Beispiele sind Arbeiten von (Sinnreich, 1985) zur Inneren Orientierung und von (Li, M. 1988) und (Schenk, 1990) zur Relativen Orientierung. Arbeiten von (Ackermann, 1986a), (Helava, 1987) und (Tsingas, 1991) zeugen von den Entwicklungen in der Automatisierung der Aerotriangulation. Der ganze Bereich ist somit der Automation zugänglich.

#### 4.5 Ein erstes konkretes Konzept zur automatischen DHM Generierung

Unter den genannten Lösungswegen kommt dem Konzept der algorithmischen Massenpunktmessung hohe Bedeutung zu, weil es direkt einsetzbar ist. Allerdings sind die Anforderungen an Schnelligkeit hoch gesteckt.

Im günstigsten Fall, wenn also das Objekt geeignet, die Geländeoberfläche sichtbar ist und keine 3D-Störungen vorliegen, gibt es im Prinzip keine Probleme mit der automatischen DHM Generierung. Probleme treten erst auf bei 3D-Störungen. Diese können jedoch bis zu einem gewissen Grad modelliert, d.h. eliminiert werden, und zwar auf der Basis von Redundanz. Schwieriger wird es, wenn die 3D-Störungen überwiegen. Selbst dann sind jedoch Lösungen denkbar, wobei wichtig ist, daß die 3D-Störungen algorithmisch modellierbar sind. Dasselbe gilt für Bruchkanten. Diese sind im Prinzip meßbar oder rechnerisch abzuleiten (Li, M., 1989). Bruchkanten haben eine objektive geometrische Definition. Im übrigen ist die Problematik entschärft, wenn sehr dicht gemessen wird, da die meisten Bruchkanten ausgerundet sind und erst durch die idealisierende Generalisierung (Modellierung) zu scharfen Bruchkanten gemacht werden. Weitere Probleme sind geschlossene Wald- oder Wasserflächen, wo das DHM auch manuell nicht gemessen werden kann. Prinzipiell wäre eine Abgrenzung dieser Gebiete mit multispektralen Bilddaten möglich. Bis auf weiteres ist es allerdings einfacher, diese Flächen interaktiv auszuschließen.

Das Konzept beruht auf der Einsicht, daß sich die DHM Generierung weitgehend algorithmisch lösen läßt, insbesondere wenn man sehr viele hochredundante Messungen zur Verfügung hat. Zur statistischen Analyse dieser Messungen ist Vorwissen in geeigneter Form einzubringen. Im Prinzip ist in einem zu messenden Gelände von vornherein unbekannt, wo nun genau eine 3D-Störung existiert. Ist aber bekannt, daß es sich bei der Vegetation z.B. um künstliche Olivenplantagen handelt, so kann dies zur Interpretation von Messungen ausgenutzt werden. Eine Vielzahl von Punkten wird sicherlich auf den Bäumen liegen, aber es gibt vielleicht ebenso viele auf der Geländeoberfläche, womit die untere Umhüllende als Geländeoberfläche betrachtet werden kann. Nicht alle Probleme mit 3D-Störungen sind also von vornherein unlösbar, sondern können durch schnelle algorithmische Ansätze angegangen werden.

Betrachten wir nun die wesentlichen Merkmale dieses Konzepts, so ist als erstes die hohe **Punktichte** entscheidend. Die Zahl der Messungen bei den **konventionellen photogrammetrischen Methoden** beträgt z.B. 3000 bis 5000, höchstens 10000 Einzelpunkte in einem Modell. Eine größere Zahl von Punkten ist wirtschaftlich nicht zu vertreten und auch nicht erforderlich, da durch die Intelligenzleistung des Menschen bereits eine weitgehend optimale Punktauswahl getroffen wird, die die morphologische Struktur des Geländes erfaßt und 3D-Störungen umgeht. Aus diesen Meßpunkten werden maximal 10 mal mehr Punkte, also vielleicht 50000 Punkte, zur Repräsentation des Digitalen Höhenmodells abgeleitet, d.h. das DHM-Raster ist dichter als das Sampling. Bei der **automatischen Messung** dagegen kann die Zahl der gemessenen Punkte ohne weiteres um den Faktor 100 höher sein als bei der konventionellen Methode, also z.B. 500000 Punkte umfassen (siehe Tabelle 4.3). Wenn man beim gleichen DHM-Raster bleibt, liegt die Punktzahl somit um den Faktor 10 darüber, d.h. das Gitter ist verdünnt, und wir haben **Redundanz**.

Konventionelle Messung	DHM	Automatische Messung
3 000 - 5 000 Punkte	-----> 30 000 - 50 000 Punkte <-----	300 000 - 500 000 Punkte

**Tabelle 4.3** Typische Punktmengen bei konventioneller und automatischer Erfassung für ein typisches photogrammetrisches Modell.

Die Punktdichte und Redundanz hat Folgen für die **Genauigkeit**. Eine **hohe Punktdichte** führt dazu, daß enge Maschenweiten beim Sampling gewählt werden können, womit eine fast vollständige Anpassung an das Gelände erreicht werden kann. Damit werden die Restpfeilhöhen zwischen der geometrischen Ersatzfläche und der Interpolationsfläche immer kleiner. Allerdings kann die Genauigkeit nicht beliebig gesteigert werden. Wird die Punktdichte weiter erhöht, so kann nicht erwartet werden, daß Textur und Auflösung unabhängige Messungen von Punkten erlauben würden, die nur wenige Pixel voneinander entfernt liegen.

Die **Redundanz** erlaubt eine Filterung der Meßdaten, d.h. innerhalb einer Gittermasche findet eine überbestimmte Anpassung statt. Damit wird die Genauigkeit besser als bei Einzelpunktmessungen, d.h. im Ergebnis werden nicht nur Ausreißertests und theoretische Genauigkeitsangaben möglich, sondern die resultierende Genauigkeit ist deutlich besser als beim konventionellen DHM. Aus diesem Grund kann erwartet werden, daß es für die Bildzuordnung vorteilhafter ist, viele möglicherweise nicht so genaue Punkte schnell zu messen als wenige hochgenaue. Aus diesem Grund ist z.B. die hochgenaue Kleinste Quadrate Lösung nicht unbedingt nötig (Ackermann, 1993).

Die hohe Meßdichte erfordert natürlich **schnelle Verfahren**. Eine realistische Vorgabe geht von ca. 1.5 Stunden für ca. 500000 Punkte aus. Dies ist nicht unbedingt eine prinzipielle, aber eine praktische Voraussetzung. Die Hardware-Entwicklung kommt dem entgegen, reicht aber nicht aus. Auch in den Verfahren muß auf größtmögliche **Effizienz** Wert gelegt werden. So kann durch Einsatz der Epipolarometrie (2.3.1) die Zuordnung erheblich beschleunigt werden. Bild-, Merkmals- und DHM-Pyramiden erlauben eine effiziente Lösung der Näherungswertprobleme (2.6.2).

Was die **Automation** betrifft, muß man zwischen einer Vorbereitungsphase, der automatischen Messung und der Editierung und Qualitätskontrolle unterscheiden (siehe Tabelle 4.4). In der Vorbereitungsphase wird die Orientierung des Stereomodells durchgeführt, es werden Steuerparameter für den Meßprozeß und Bereichsgrenzen für die Messung festgelegt. Diese Arbeiten werden zunächst vom Operateur übernommen. In der automatischen Messung mit digitaler Bildzuordnung ist das DHM integrierter Bestandteil. Dieser Prozeß ist automatisiert und kann im Prinzip im Batch Betrieb ablaufen. In der Phase der Editierung und Qualitätskontrolle wird zunächst wiederum auf den Bearbeiter zurückgegriffen. Dieses Konzept ist natürlich nur ein Rahmen oder eine Leitidee. Es bedeutet nicht, daß nicht noch besondere Maßnahmen möglich sind, um die Strategie zu verbessern oder die Geschwindigkeit zu steigern.

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vorbereitungsphase</b> (Orientierung, Steuerparameter, Meßbereich etc.)</li> <li>• <b>Automatische Messung</b> (DHM in den automatischen Prozeß integriert)</li> <li>• <b>Editierung und Qualitätskontrolle</b></li> </ul> |
|--|

**Tabelle 4.4** Hauptphasen der automatischen DHM Generierung.

## 5 EIN PILOTSYSTEM ZUR AUTOMATISCHEN DHM GENERIERUNG

Auf der Grundlage des im Kapitel 4 skizzierten Konzepts zur automatischen DHM Generierung wurde in den Jahren 1987/1988 vom Verfasser ein konkretes System entwickelt und mit Hilfe einer vorläufigen Programmierung erprobt. Die charakteristischen Merkmale sind digitale Bildzuordnung, hohe Punktdichte, Redundanz und robuste Elimination von 3D-Störungen, wie beschrieben. Der Zweck war, dieses Pilotsystem zu empirischen Untersuchungen und zur Gewinnung von programmtechnischen Erfahrungen einzusetzen, um daraus Spezifikationen für ein zukünftiges, operationelles, voll digitales System abzuleiten.

Ein Programmsystem wurde entworfen und umgesetzt. Die Hardwarevoraussetzungen waren ein Analytischer Plotter PLANICOMP C-100 mit HP1000-A900 Rechner und mit CCD-Kameras zur Digitalisierung kleiner Bildausschnitte, da damals voll digitale Systeme noch nicht spruchreif waren. Von vornherein war also klar, daß keine allzu hohe Geschwindigkeit erreichbar war. An Software bestand Zugang zu 2 Bildzuordnungsverfahren, der LSM-Methode (2.7) und der FBM-Methode (2.8), die rasterorientiert bzw. merkmalsgestützt arbeiten. Diese beiden Methoden boten nach den Erfahrungen des Tests zur Bildzuordnung (Kapitel 3) gute Voraussetzungen für den Einsatz bei der DHM Messung.

In diesem Pilotsystem konnte z.T. auch auf Erfahrungen aus der inzwischen erfolgten Entwicklung des INDUSURF Systems zur automatischen Messung von Industrieoberflächen (Schewe, 1986) zurückgegriffen und einzelne Programmodule konnten übernommen werden.

Das Pilotsystem hatte zur Aufgabe, unter den gegebenen Randbedingungen eine Meßstrategie zur automatischen DHM Erfassung zu realisieren, unter Verwendung der digitalen Bildzuordnung zur Parallaxenmessung und zur Punktauswahl. Es muß aber der Vorläufercharakter dieses Pilotsystems besonders betont werden, das die damaligen Hardware- und Softwaremodule als Elemente für ein digitales Gesamtsystem benützte.

Im Gegensatz zu den rein strategischen, konzeptionellen Überlegungen in Kapitel 4 mußte bei der Realisierung des Systems eine viel konkretere Gliederung und Strukturierung des Programms erfolgen, das an die Arbeitsbedingungen angepaßt war. Dementsprechend unterschied man 4 Hauptphasen, die sich als eine Vorbereitungsphase, die Meßphase, die DHM Generierung und eine Nachbearbeitung definieren ließen (siehe Abbildung 5.1).

Im konkreten Rechenprogramm stellte sich das Problem, in welcher Reihenfolge die Messungen erfolgen sollten und wie Vollständigkeit erreicht werden konnte. Die Messungen mußten gesteuert werden, dazu diente die Vorstellung eines Drahtmodells, welches die Fläche mit einem Gitter überzieht. Die Messungen paßten sich dem Gitter an, mit vielen Freiheiten, wobei Sorge getragen wurde, daß Störungen umgangen werden konnten. Durch diese Methode ließen sich die Meßabstände dem Gelände anpassen.

Mit dem Ziel der vergleichenden Untersuchung wurden 2 Zuordnungsverfahren implementiert. Die angewandten automatischen Meßverfahren waren der LSM und der FBM Algorithmus. Der FBM Algorithmus produzierte eine unregelmäßige Punktverteilung über die Fläche entlang der Gitterstruktur, d.h. mit anderen Worten eine Punktauswahl, die der des Bearbeiters ähnlich war. Um den Aufwand für die LSM Feinmessungen gering zu halten, wurde die Messung zuerst vollständig mit dem FBM Algorithmus ausgeführt. Nach einer Reduktion dieser Messungen auf repräsentative Geländepunkte wurden dann ausgewählte Punkte direkt angefahren und an ihnen durch LSM Messung die Feinzuordnungen ausgeführt. Durch diese Datenreduktion im Objektraum wurden Messung und DHM Generierung miteinander verknüpft. Im Prinzip repräsentierten die Objektkoordinaten das DHM, aber zur Realisierung gehörte in diesem Fall eine Datenstruktur in Form einer Gitterstruktur.

Die Besprechung dieser Module erfolgt in den Abschnitten 5.2-5.5. Hier zunächst einige Anmerkungen zu den Hardwarevoraussetzungen.

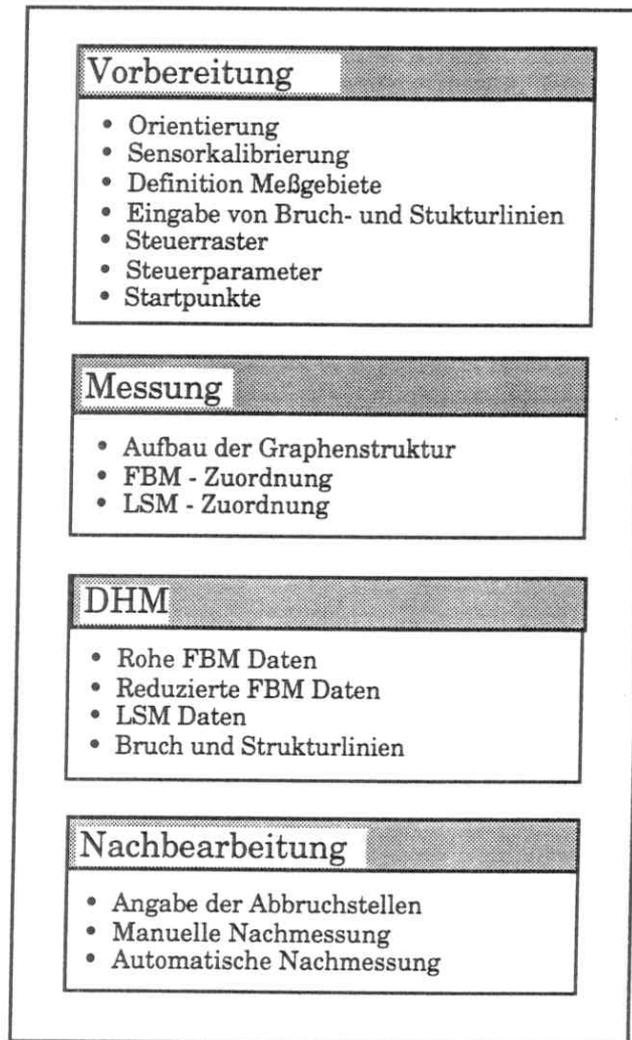


Abbildung 5.1 Übersicht über die Meßstrategie.

## 5.1 Hardware Voraussetzungen

Die Realisierung des Pilotsystems war eng an die Hardware des PLANICOMP C100 mit HP1000-A900 Rechner, ausgerüstet mit CCD-Videokameras, gebunden (siehe Abbildung 5.2), die in (Gülch, 1986) detailliert beschrieben ist. Insofern war es also ein hybrides System, in dem zwar die Zuordnung digital, die Orientierung aber konventionell erfolgte.

Trotz der im Prinzip simplen Strategie sind in der konkreten Umsetzung eine Reihe von **Transformationen** notwendig, um die Geräte- und Sensorbezugssysteme mit den Bildsystemen zu verknüpfen und diese dann durch die Prozesse der Orientierung und Normalisierung hindurch streng zu verfolgen. In Abbildung 5.3 ist eine Übersicht gegeben, in Tabelle 5.1 erfolgt eine Kurzbeschreibung der wesentlichen Koordinatensysteme.

Ausgehend von gegebenen Geländekoordinaten wurden geeignete Bildausschnitte in den Normal- bzw. Epipolarbildern für die Zuordnung ausgewählt und aus zugeordneten Punkten abschließend 3-D Koordinaten berechnet. Durch die Zuordnung in den Normalbildern wurde der Suchraum auf eine Dimension eingeschränkt. Gegenüber der Zuordnung in den Bildern selbst mußte nun ein höherer Aufwand in die Transformationen gesteckt werden. Es war daher sinnvoll, ein einheitliches Schema für die Transformationen auszuarbeiten; um die Implementierung zu erleichtern und die Anwendung zu beschleunigen, da die Transformationen eine herausragende Stelle in dem Meßverfahren einnehmen. Es treten verschiedene zwei- und dreidimensionale Koordinatensysteme auf, die durch Affinitäten, Rotationen, Translationen und Projektionen miteinander zu verknüpfen waren.

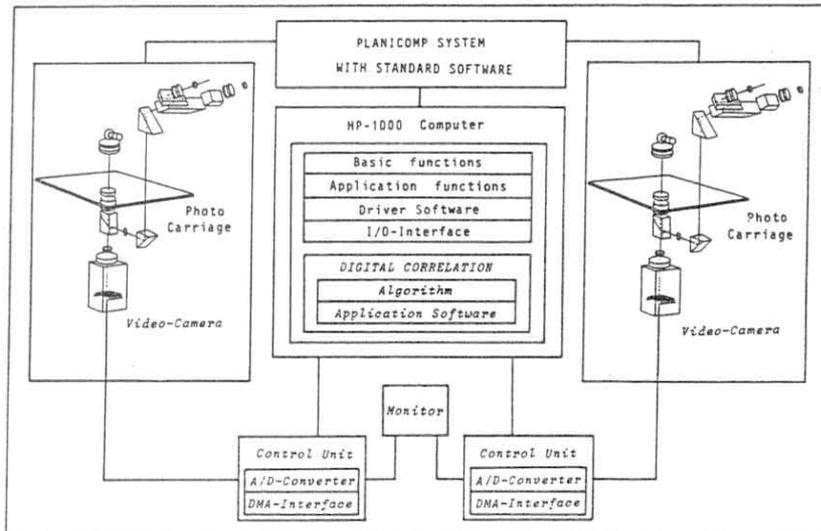


Abbildung 5.2 Planicomp ausgerüstet mit CCD-Videokameras - Prinzipskizze.

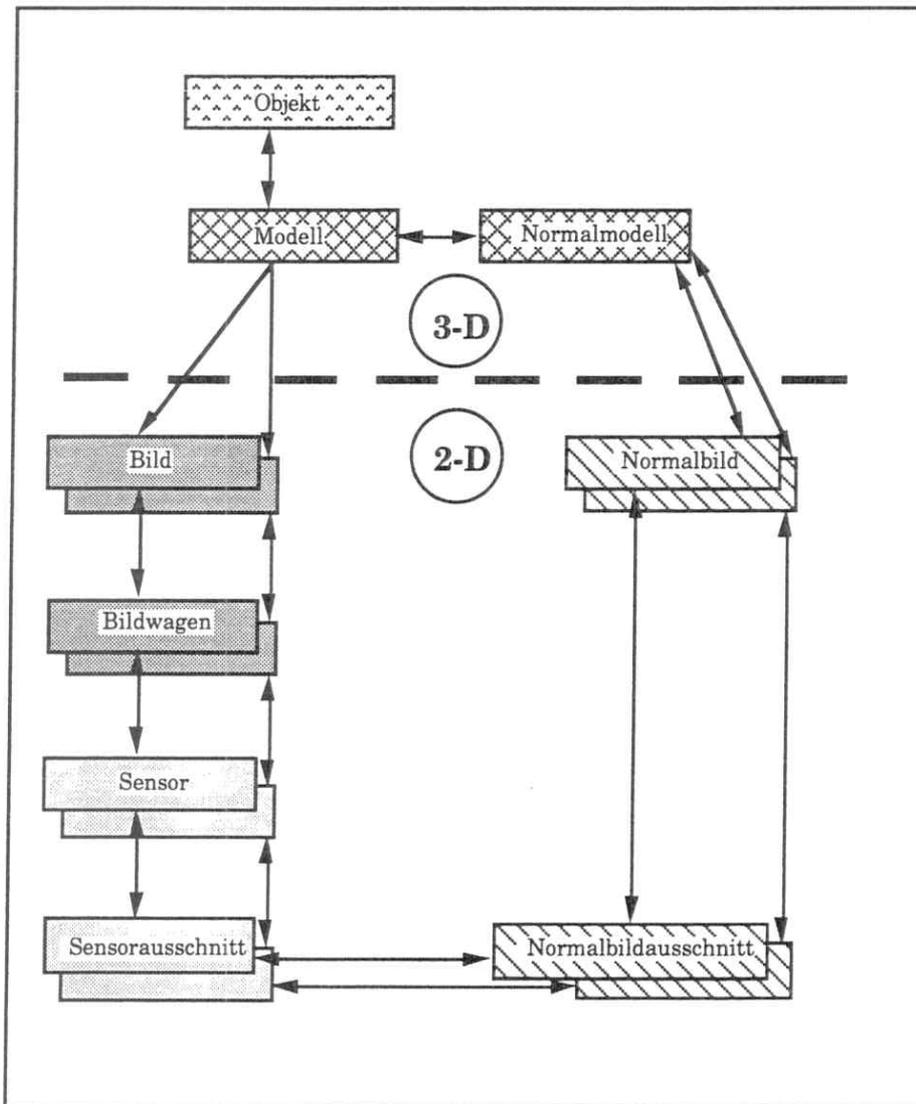


Abbildung 5.3 Die wesentlichen Koordinatensysteme und ihre Beziehungen bei der Oberflächenmessung des Pilotsystems am PLANICOMP-C100.

<b>Bildsysteme</b> $\underline{x}^{b1}, \underline{x}^{b2}$
Die Bildsysteme b1 und b2 haben ihren Ursprung im jeweiligen Projektionszentrum. Die x-y- Ebene ist parallel zur Bildebene ( $z=-c$ ). Die Systeme $\underline{x}^{bi}$ lassen sich aus dem Modellsystem durch Rotation und Translation gewinnen. Die Abbildung auf die Bildebene (Reduktion von drei auf zwei Dimensionen) geschieht durch eine Perspektivabbildung.
<b>Normalbildsysteme</b> $\underline{x}^{p1}, \underline{x}^{p2}$
Die Normalbildsysteme p1 und p2 haben ihren Ursprung im jeweiligen Projektionszentrum. Die x-y-Ebene ist parallel zur Bildebene ( $z=-c$ ) und identisch mit der x-y-Ebene des Normalmodellsystems. Die Systeme $\underline{x}^{pi}$ lassen sich aus dem Normalmodellsystem durch Verschiebung entlang der x-Achse gewinnen. Die Abbildung auf die Bildebene geschieht durch eine Perspektivabbildung.
<b>Bildwagensysteme</b> $\underline{x}^{c1}, \underline{x}^{c2}$
Die Bildwagensysteme c1 und c2 sind maschinenfeste Systeme des Planicomp. Sie hängen mit den Bildsystemen über Affintransformationen zusammen, deren Parameter sich aus der inneren Orientierung ergeben.
<b>Sensorsysteme</b> $\underline{x}^{s1}, \underline{x}^{s2}$
Die Sensorsysteme haben ihren Ursprung in der linken oberen Ecke des Sensors der CCD-Kamera. Die x-Achse zeigt in Zeilenrichtung (horizontal), die y-Achse in Spaltenrichtung (vertikal). Die Sensorsysteme gehen aus den Bildwagensystemen durch Affinabbildung hervor, deren Parameter durch eine Kamerakalibrierung gegeben sind. Gemeinsamer Punkt für die Transformation ist die Meßmarke, die in den beiden Systemen gegeben ist.
<b>Sensorausschnittsysteme</b> $\underline{x}^{t1}, \underline{x}^{t2}$
Die Sensorausschnittsysteme haben ihren Ursprung in der Mitte eines vorgegebenen Ausschnitts. Die Achsen bilden ein kartesisches Rechtssystem. Die Sensorausschnittsysteme gehen aus dem Sensorsystem durch Affintransformation hervor.
<b>Normalbildausschnittsysteme</b> $\underline{x}^{q1}, \underline{x}^{q2}$
Die System q1 und q2 haben ihren Ursprung in der Mitte eines bestimmten Ausschnitts. Sie gehen aus den Normalbildsystemen durch Entzerrungsabbildung hervor. Die Achsen bilden ein kartesisches Rechtssystem.
<b>Modellsystem</b> $\underline{x}^m$
Das Modellsystem ist durch die relative Orientierung im Planicomp gegeben. Der Ursprung liegt i.a. in der Mitte zwischen den beiden Projektionszentren. Die Achsen bilden ein rechtsdrehendes kartesisches Koordinatensystem.
<b>Normalmodellsystem</b> $\underline{x}^n$
Das Normalmodellsystem entspricht dem Modellsystem im photogrammetrischen Normalfall. Sein Ursprung liegt genau zwischen den beiden Projektionszentren. Die x-Achse liegt in der Geraden durch die Projektionszentren. Die z-Achse liegt in der Ebene, die durch die Projektionszentren und den Mittelpunkt zwischen den beiden Bildhauptpunkten im Modellsystem gegeben ist. Die Achsen bilden ein kartesisches Rechtssystem.
<b>Objektsystem</b> $\underline{x}^o$
Das Objektsystem ist mit dem Modellsystem durch die Parameter der absoluten Orientierung verbunden.

**Tabelle 5.1** Beschreibungen der wesentlichen Koordinatensysteme und ihrer Beziehungen in dem Pilotsystem am PLANICOMP-C100.

Verwendet man dazu **homogene Koordinaten**, so lassen sich die verschiedenartigen Transformationen (Translation, Rotation, Affintransformation, Perspektivtransformation) in einem einheitlichen System darstellen.

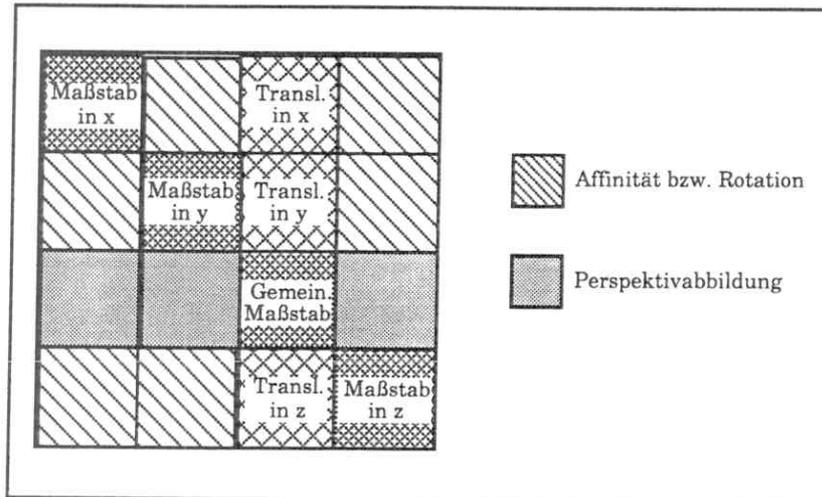
Der Vektor  $\begin{pmatrix} r \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/w \\ y/w \\ z/w \end{pmatrix}$  wird in der Form  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ w \\ z \end{pmatrix}$  dargestellt. (5-1)

(z steht an vierter Stelle, damit Transformationen in einer Ebene mit weniger Aufwand gerechnet werden können, da dabei die z-Koordinate nicht gerechnet wird).

Allgemein sieht eine **Transformationsgleichung** dann wie folgt aus:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ w \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ w \\ z \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

wobei die **Koeffizienten** der Transformationsmatrix folgende Bedeutung haben:



**Abbildung 5.4** Koeffizienten der Transformationsmatrix ( $a_{11}$  bis  $a_{44}$ ).  
 Transl. = Translation; Gemein. Maßstab = gemeinsamer Maßstab

## 5.2 Vorbereitung der Messung

Vor dem Beginn der Messung waren verschiedene vorbereitende Aufgaben durch den Operateur auszuführen, wie Orientierung, Eingabe von Prozeßparametern, Angabe von Meßgebieten etc. (siehe auch Abbildung 5.1). Bei den meisten Arbeiten wurde eine Unterstützung durch Standard-Software, oder durch spezielle Menue-gesteuerte Eingabeprogramme geboten. Dabei konnten durch zahlreiche interne Kontrollmechanismen fehlerhafte Eingabedaten zu einem sehr hohen Grad erkannt werden.

### 5.2.1 Orientierung

Die Orientierung der Bilder im Planicomp erfolgte nach konventioneller Methode durch den Operateur, unterstützt durch die Standardsoftware am Analytischen Plotter PLANICOMP-C100.

### 5.2.2 Sensorkalibrierung

Der geometrische Bezug zwischen PLANICOMP-Bildwagenkoordinatensystemen  $\underline{x}^{c1}$ ,  $\underline{x}^{c2}$  und den Sensorsystemen  $\underline{x}^{s1}$ ,  $\underline{x}^{s2}$  (siehe Tabelle 5.1) von linker und rechter CCD Kamera wurde durch eine Sensorkalibrierung hergestellt. Für den Bezug zwischen den Koordinatensystemen wurde eine Affintransformation angenommen. Die Ermittlung der Transformationsparameter Translation, Maßstab und Rotation erfolgte getrennt für jeden Bildwagen und mit Hilfe eines Gitterkreuzes im Bildträger des PLANICOMP-C100 (ohne Bild). Die Bestimmung der zwei Translationsparameter geschah mit Unterstützung des Operateurs. Die Bestimmung der restlichen Parameter erfolgte automatisch mit

morphologischen Bildverarbeitungsroutinen für die Näherungswertbestimmung und der Kleinsten Quadrate Zuordnung (LSM) für die Feinzuordnung mit einem Muster eines Gitterkreuzes des PLANICOMP.

Eine Sensorkalibrierung mußte üblicherweise nach ca. einer Stunde wiederholt werden, da sich die Kalibrierung des Sensors gegenüber den Bildträgern mit der Temperatur veränderte (Gülch, 1986). Zu diesem Zweck wurden durch den Operateur Kontrollpunkte im Bild ausgesucht, die sich auf der Meßfläche befanden und die eine geeignete Textur aufwiesen. Dies war erforderlich, da die Meßkreuze nun durch das Bild überlagert und somit nicht mehr optimal geeignet waren. An den Kontrollpunkten wurden kleine Bildausschnitte digitalisiert und gespeichert. In regelmäßigen Zeitabständen wurden die Kontrollpunkte angefahren, die Bildausschnitte digitalisiert und mit den Kontrollausschnitten korreliert. Eine eventuelle Verschiebung wurde somit aufgedeckt und die Sensorkalibrierung entsprechend aktualisiert.

### 5.2.3 Digitalisierung der Meßgebiete

Um vor der ersten Messung schon eine gewisse Näherung der Oberfläche zu haben, war es notwendig, einige Informationen einzubringen. Dazu gehörten Begrenzungslinien, die Aussparungen festlegten, oder Hilfslinien wie Bruchkanten und Strukturlinien. Es konnten dazu offene oder geschlossene Polygone verwendet werden, die im Bild oder im Modellraum gemessen wurden (siehe dazu Tabelle 5.2).

Die **Begrenzungslinien** wurden in Form von geschlossenen Polygonen digitalisiert. Dies geschah entweder im linken Bild und somit zweidimensional, oder im Modellraum bzw. auch im Objektraum. Die Polygone wurden automatisch durch Nummern, die gleichzeitig eine Codierung enthielten, gekennzeichnet bzw. zugeordnet. Zusätzlich wurde die Lage des Meßgebiets in Bezug zur Linie festgehalten. Es konnten gleichzeitig mehrere Meßgebiete definiert werden.

Markante **Bruch- und Strukturlinien** wurden nur dreidimensional erfaßt und wurden bei der automatischen Messung berücksichtigt. Es konnten offene oder geschlossene Polygone sein. Diese Linien dienten entweder zur Berechnung von Startpunkten oder als Abbruchstellen bei der Messung. Auch gingen sie in die nachfolgende DHM Berechnung ein.

Für alle Linien galt, daß sie sich nicht schneiden oder berühren durften. Zur Kontrolle wurde am Bildschirm der aktuelle Stand der Digitalisierung dargestellt.

LINIEN	OBJEKTE	POLYGONTYP	ERFASSUNG
Begrenzungslinien	Rand des Meßgebietes Aussparungsflächen	geschlossen geschlossen	2D / 3D
Hilfslinien	Bruchlinien Strukturlinien	geschlossen/offen geschlossen/offen	3D

**Tabelle 5.2** Linientypen und Objekte zur Definition des Meßgebiets.

### 5.2.4 Steuerung der Messung

Die Steuerung der Messung erfolgte, wie erwähnt, auf Basis einer gitterartigen Datenstruktur, d.h. eines Graphen. Diese regelte den Ablauf der Messung und diente zur Sicherstellung der Vollständigkeit. Sie war in einem orthogonalem (X,Y,Z) Geländekoordinatensystem definiert. Der Operateur definierte Scharen von Schnittebenen im Objektsystem, mit Angabe der Richtung im Raum (üblicherweise orthogonal zu den Koordinatenachsen), mit unterer und oberer Grenze und Abstand. Die Schnitte der Ebenen mit der Oberfläche definierten die Profile, entlang denen die sich überlappenden Fenster für die Zuordnung ausgewählt wurden. Diese Profile erzeugten auf der Oberfläche einen Graphen von sich schneidenden Linien. Für spezielle Anwendungen konnten direkt die vier Parameter einer Ebenengleichung eingegeben werden. Es bestand allerdings bei einer Profilmessung die Gefahr, daß bei zu wenigen Querprofilen große Teile eines Längsprofils fehlten, wenn die Bearbeitung von zwei Seiten zu früh unterbrochen wurde. Mehrere parallele Profile konnten nur gemessen werden, wenn eine Querverbindung in Form einer Schnittebene oder einer Hilfslinie vorlag.

### 5.2.5 Auswahl der Prozeßparameter

Ein Eingabeprogramm unterstützte die Bereitstellung aller für die Messung wichtigen Prozeß- oder Steuerparameter. Es handelte sich um organisatorische Parameter, Parameter für die Meßstrategie und Parameter für die Meßmodule. In Tabelle 5.3 sind Beispiele für die drei Kategorien aufgeführt. Für alle Parameter lagen Standardwerte oder die Werte der letzten Projektmessung vor. Die Standardwerte für die Zuordnungsparameter waren aus vielfachen empirischen Messungen bekannt.

EINTEILUNG	BEISPIELE
Organisation	Projektname Ausdruck von Fehlermeldungen Zeitintervall für die Nachkalibrierung Zeitintervall für Datenstruktursicherung
Meßstrategie	Meßmodule Prädiktionsarten für das Fortschreiten Schrittweiten minimal/maximal
Meßmodule	Fenstergröße (LSM 10x10 bis 29x29 Pixel) Fenstergröße (FBM 30x30 bis 40x40 Pixel) Pixelgröße (Makropixel) Anzahl der Iterationen Genauigkeit der Punktübertragung

**Tabelle 5.3** Einteilung der Prozeßparameter und einige Beispiele.

### 5.2.6 Eingabe von Startpunkten

Da das Pilotsystem eine Anfangsnäherung benötigte, mußte der Operateur zumindest einen Startpunkt innerhalb des Meßgebiets im absolut orientierten Modell vorgeben. Der Punkt mußte nicht unbedingt auf einer Schnittebene liegen. Die Genauigkeit der stereoskopischen Einstellung mußte jedoch so hoch sein, daß sie als Näherungswert für die nachfolgende automatische Zuordnung ausreichte. Die Eingabe einer größeren Anzahl von Startpunkten erhöhte die Zuverlässigkeit, d.h. in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit, wirklich flächendeckend aufzunehmen. Teilweise konnten auch digitalisierte Hilfslinienpunkte verwendet werden. Die Schnitte zwischen den Polygonen und den Schnittebenen wurden als Startknotenpunkte verwendet.

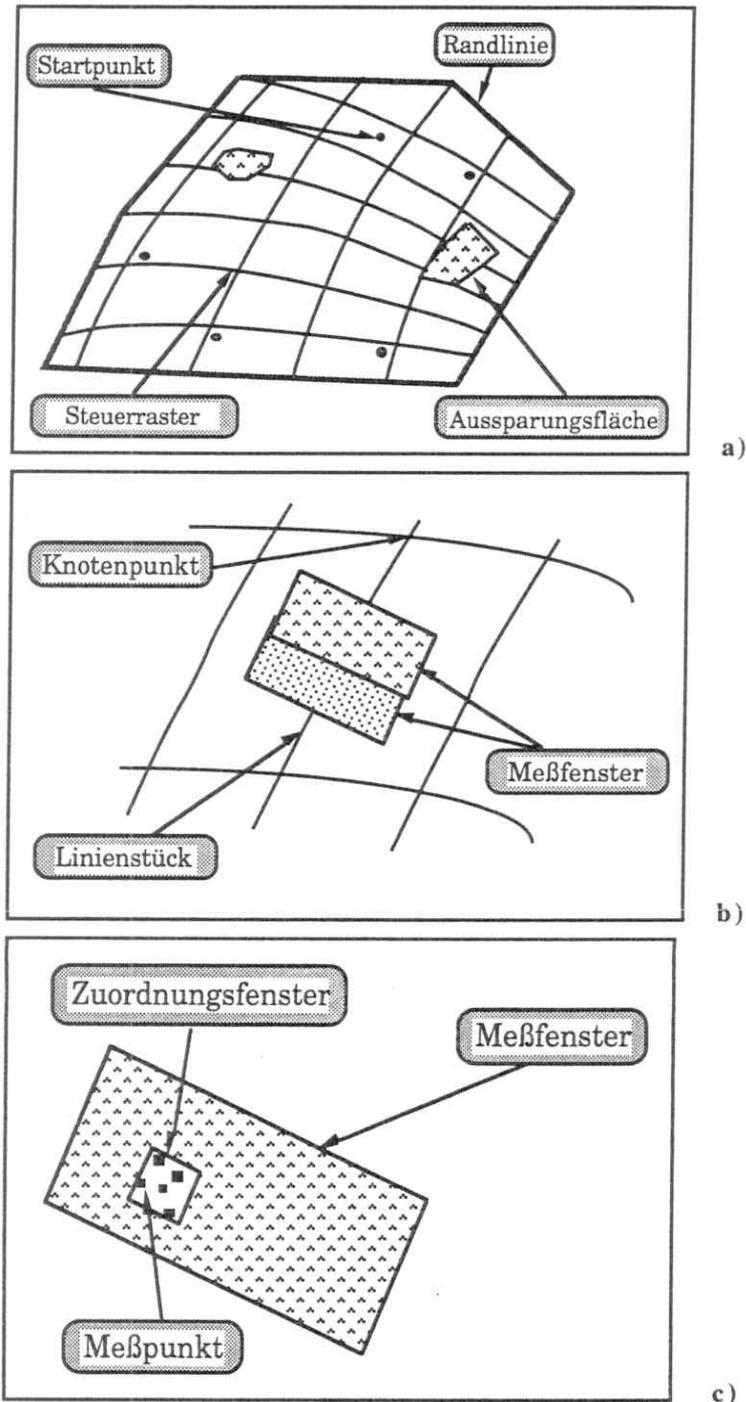
## 5.3 Messung

Der Meßvorgang gliederte sich in zwei Teile, den **Aufbau der Datenstruktur zur Meßsteuerung**, und die **Messung von Massenpunkten** für die DHM Berechnung. Die zugrundeliegende Datenstruktur war dafür speziell ausgewählt. Zur Messung standen verschiedene Meßmodule bereit, die für beide Aufgaben eingesetzt wurden.

### 5.3.1 Datenstruktur

Die Datenstruktur mußte verschiedene Anforderungen erfüllen. Sie mußte es ermöglichen, sowohl gleichmäßig verteilte Punkte in Profil- oder Gitterform als auch unregelmäßig verteilte Punkte darzustellen. Damit wurde eine hohe Flexibilität ermöglicht. Die Möglichkeit zur Einbeziehung von Struktur- und Bruchlinien war notwendig, selbst wenn eine automatische Bestimmung dieser Elemente vorerst nicht realisiert war. Die Datenstruktur sollte im gleichen Zug eine

Steuerung der Messung ermöglichen, die es erlaubte, die Oberfläche flächendeckend zu erfassen, Lücken möglichst klein zu halten und schwierige Gebiete zu markieren und zu umgehen, ohne die Messung bei der ersten Schwierigkeit abzubrechen. Eine Datenstruktur, die alle diese Anforderungen erfüllen konnte, war die eines **Drahtmodells** oder **Graphen**, auf der Grundlage von Linien und Knoten (Abbildung 5.5).



**Abbildung 5.5** Meßgebiete, Steuerraster und Meßpunkte und ihre Beziehungen.

(a) Polygone definieren die Randlinie und Aussparungsflächen. Das Steuerraster liegt gitterförmig über dem Meßgebiet. Startpunkte werden durch den Operateur vorgegeben. In (b) wird gezeigt wie sich ein Meßfenster entlang einem Linienstück von einem Knotenpunkt zum nächsten fortbewegt. Im Meßfenster (c) werden Zuordnungsfenster definiert, in denen unregelmäßig verteilte Meßpunkte liegen.

Linien und Knoten waren definiert durch den Schnitt von vorgegebenen Ebenen mit der Oberfläche. Polygone definierten die Randlinie und Aussparungsflächen (Abbildung 5.5a).

Der **Aufbau der Datenstruktur** erfolgte on-line, ausgehend von einem gegebenen Startpunkt auf der Oberfläche, da die Orientierungsdaten der Bilder bekannt waren. Die Startknoten wurden aus den vorgegebenen Startpunkten bestimmt (Abbildung 5.5a). Das Stellerraster lag gitterförmig über dem Meßgebiet. Von den Startknoten aus breitete sich die Graphenstruktur entlang dem Stellerraster flächenartig nach allen Richtungen aus. Die Oberflächenmessung erfolgte an Knotenpunkten und entlang der Linien.

Die Messung bzw. das Fortschalten der Meßfenster startete von einem Knotenpunkt entlang einer Linie (Abbildung 5.5b). Im Meßfenster wurden Zuordnungsfenster definiert, in denen unregelmäßig verteilte Meßpunkte liegen (Abbildung 5.5c). Wurde der Endpunkt einer Linie erreicht, wurde dieser als neuer Knoten eingeführt. Anschließend wurde an dem ältesten noch offenen Knotenpunkt die nächste noch fehlende Linie gemessen bis alle Linien abgearbeitet waren. Dann fuhr die Messung an dem nunmehr ältesten Knotenpunkt fort.

Weitere Details hierzu sind in (Schewe, 1986) zu finden. Der wesentliche Punkt dabei war, daß die Messung nicht abgebrochen wurde, sobald z.B. texturschwache Gebiete auftraten. Der Abbruchpunkt wurde markiert und anschließend an dem nächsten noch nicht bearbeiteten Knoten die Messung entlang aller offenen Linien fortgesetzt.

Die gewählte Datenstruktur selbst ist im Detail ebenfalls in (Schewe, 1986) beschrieben. Hier folgen zusammenfassend die wesentlichen Merkmale.

Das Grundelement der Datenstruktur war die Linie, eigentlich ein endliches Stück einer Linie. Die Parameter der Linie waren Start- und Endpunkt, ein Verbindung zur nächsten Linie der Ebene und eine Beschreibung. Alle Angaben waren in Form von Zeigern realisiert (Tabelle 5.4).

Knotenpunkte waren im voraus nicht bekannt und wurden im Lauf der Messung erzeugt, wenn verschiedenen Bedingungen erfüllt waren. Jeder Knoten gehörte zu einem bestimmten Knotentyp. Fünf Klassen von Knoten, nämlich Isolierter Punkt, Endpunkt, Bruchpunkt, Randpunkt und Gitterpunkt waren für diese Anwendung von Bedeutung (siehe Tabelle 5.5). Die Liste der Knotenpunkte (siehe Tabelle 5.4) enthielt für jeden Knotenpunkt die X, Y, Z Koordinaten, die Komponenten des Normalenvektors an diesem Punkt und ein Liste von Zeigern zu den Ebenen, zu denen dieser Knoten gehörte.

Liste(Linien)	= { Zeiger(Startknoten), Zeiger(Endknoten), Zeiger(nächste Linie), Zeiger(Beschreibung) }
Liste(Knoten)	= { X,Y,Z, cos $\alpha$ , cos $\beta$ , cos $\tau$ , { Zeiger(Ebene) } }
Liste(Ebenen)	= { Beschreibung, Zeiger(erste Linie), Ebenentyp }

**Tabelle 5.4** Interne Verknüpfung der drei Elemente der Datenstruktur: Linien, Knoten, Ebenen.

X,Y,Z: Objektkoordinaten  
 cos  $\alpha$ , cos  $\beta$ , cos  $\tau$ : Komponenten des Normalenvektors

KNOTENTYP	BESCHREIBUNG
0	<b>Isolierter Punkt</b> (Nicht verbunden mit einer Ebene)
1	<b>Endpunkt</b> (Ende einer Linie insbesondere an Abbruchstellen)
2	<b>Bruchpunkt</b> (Bruchkanten, an denen eine Linie in zwei Linien aufgesplittet wird)
3	<b>Randpunkt</b> (Schnitt einer Ebene mit der Randlinie, wenn diese miteinbezogen wird)
4	<b>Gitterpunkt</b> (Schnittpunkt zweier Ebenen)

**Tabelle 5.5** Knotenpunkttypen und ihre Beschreibung.

Die Liste der Ebenen enthielt zwei Typen von Ebenen. Die Ebenen, die durch die Digitalisierung der Randlinie vorgegeben waren und die Ebenen, die der Bearbeiter für die Messung vorgab. Jede Ebene in der Liste besaß eine Beschreibung (siehe Tabelle 5.4), einen Zeiger zur ersten Linie dieser Ebene und eine Angabe über den Typ der Ebene. Mit dem Zeiger zur ersten Linie und mit den Zeigern in der Linienliste zur jeweils nächsten Linie wurde eine Profilmessung ermöglicht.

Der **Aufbau der Graphenstruktur** bei der Messung erfolgte in **drei Schritten**.

In einem **ersten Schritt** wurde der neue Punkt aus den zwei vorhergehenden gemessenen Punkten prädictiert, d.h. die Koordinaten und die Oberflächenneigung wurden prädictiert. Entlang der Ebene bzw. Linie wurde dabei ein Polynom erster, zweiter oder dritter Ordnung verwendet, je nach Anzahl der verfügbaren Punkte. Die Prädiktion der Neigung quer zur Ebene war eine lineare Extrapolation.

Der prädictierte Punkt wurde in einem **zweiten Schritt** auf die Sensorbilder transformiert und das Fenster ausgewählt bzw. der Bildwagen weiterbewegt und eine neue Abtastung vorgenommen. Die Schrittweite war vorgegeben, wurde aber automatisch in Abhängigkeit von der Oberflächenkrümmung gesteuert. Das bedeutet, daß bei starker Krümmung eine kleinere Schrittweite bei der Auswahl der Fenster angewendet wurde.

Im **dritten Schritt** erfolgte dann die Zuordnung mit der Rücktransformation auf einen Oberflächenpunkt und eine Oberflächennormale. Es erfolgte eine Zuordnung vom rechten zum linken Bild sowie eine Zuordnung vom linken zum rechten Bild. Aus den beiden erhaltenen Modellpunkten ergab sich der tatsächliche Flächenpunkt (siehe Abbildung 5.6). Wenn die beiden zugeordneten Modellpunkte zu weit auseinanderlagen (bzw. die Näherung und der "gemessene" Punkt), mußte mit dem "gemessenen" Punkt als Näherung der Prozeß wiederholt werden. Der "gemessene" Punkt **P** errechnete sich aus den beiden zugeordneten Punkten **A** und **B** wie folgt (siehe Abbildung 5.6): Aus der Zuordnung ergeben sich die Flächenneigungen in **A** und **B** bzw. die Tangenten an die Schnittlinie zwischen Oberfläche und Kernebene (Geraden **a**, **b**). Die Gerade **g** ist die Schnittgerade zwischen Schnittebene und Kernebene.

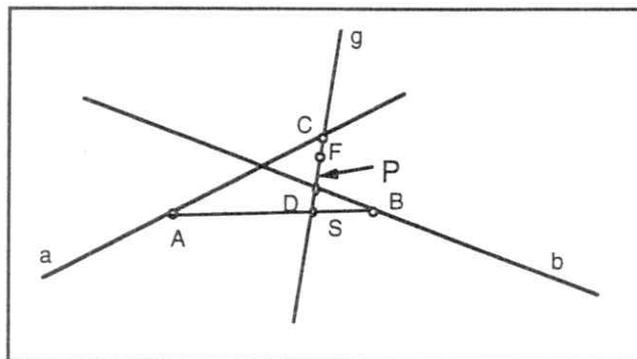
Der Punkt **P** berechnete sich aus dem Hilfspunkt **F** nach folgenden Formeln:

$$F = \frac{C |BS| + D |AS|}{|BS| + |AS|} \quad (5-3)$$

$$P = \frac{S+F}{2} \quad (5-4)$$

wobei: **C** =Schnittpunkt (a,b), **D** =Schnittpunkt (b,g), **S**=Schnittpunkt ((AB),g)

Konnte ein Punkt nicht gemessen werden, so wurde durch Vergrößern des Fensters ein neuer Versuch unternommen. War auch dies erfolglos, so wurde die Schrittweite verkleinert. Blieb auch dies erfolglos, so wurde das Liniestück abgebrochen und an einer anderen offenen Stelle des Graphen die Messung fortgesetzt. Dieser Ablauf war nicht streng fixiert, sondern konnte vom Operateur durch Parameterwahl weitgehend gesteuert werden.



**Abbildung 5.6** Gemessener Punkt P aus linker und rechter Zuordnung.  
Punkte A und B sind die Ergebnisse der Zuordnung (links-rechts bzw. rechts-links)

### 5.3.2 Meßmodule

In dem Pilotsystem waren Meßmodule auf verschiedenen Stufen realisiert. Die Stufen umfaßten den Operateur und 2 automatische Verfahren zur Bildzuordnung, das rasterorientierte LSM Verfahren (2.7) und das merkmalsgestützte FBM Verfahren (2.8). Diese Stufen (siehe Tabelle 5.6) waren gewählt, um das Problem der Näherungswertbestimmung zu lösen, da mit der gegebenen Hardware keine hierarchischen Lösungen (z.B. Pyramiden) zu realisieren waren.

Die Messung erfolgte von grob nach fein. Auf der obersten Stufe (Meßmodul 4) bereitete der Operateur die Messung vor. Durch Einlegen der Bilder und Herstellung der Orientierung wurde bereits eine Grobzuordnung vorgenommen. Durch die manuelle Vorgabe eines Startpunktes oder mehrerer Startpunkte auf der Oberfläche war die Aufgabe des Operateurs vorerst beendet und die automatischen Meßmodule 2 bis 0 übernahmen den Prozeß. Dabei wurden die FBM (2.8) und die LSM Methode (2.7) auf unterschiedliche Fenstergrößen angewendet. Dem Operateur blieb immer die Möglichkeit, über das Meßmodul 3 in die Messung einzugreifen oder über dieses Modul die Messung an Stellen durchzuführen, an denen die automatische Methode versagt hatte. Die Schrittweiten zwischen den Modulen waren durch den jeweiligen Konvergenzbereich vorgegeben. Eine höhere Einfangbereich für die FBM Messung war nicht möglich, da die Fenstergröße durch die Sensorgröße der CCD-Videokameras beschränkt wurde. Die Genauigkeitsangaben in Tabelle 5.6 sind auf das Bild bezogen und für die Zuordnungsverfahren aus empirischen Messungen abgeleitet. Theoretisch wären sogar weitaus bessere Werte möglich.

Modul		Pixelgröße [µm]	Fenstergröße		Einfangbereich [mm]	Genauigkeit [mm]
Nr	Beschreibung		[pel]	[mm]		
4	Operateur			230.00	230.00	5.000
3	Operateur			20.00	20.00	0.500
2	FBM	100	40	4.00	1.20	0.120
1	FBM	20	40	0.80	0.24	0.020
0	LSM	20	16	0.32	0.04	0.002

**Tabelle 5.6** Meßmodule und ihre Merkmale.

Fenstergrößen und Einfangbereiche sind Maximalangaben. Genauigkeitsangaben für die Operateursmessung sind die erforderlichen, und nicht die absolut möglichen.

### 5.4 DHM Generierung

Die Generierung des DHM war konzeptionell eng mit der Messung der Massenpunkte verbunden und setzte den erfolgreichen Aufbau der Graphenstruktur voraus. Die Graphenstruktur steuerte das Fortschreiten der Meß- und Zuordnungsfenster für die Massenpunktberechnung, die sich in drei Schritte gliederte, eine grobe Messung mit der FBM Methode, eine Filterung der damit erhaltenen Punkte im Objektraum und eine abschließende Feinzuordnung an den gefilterten Punkten mit der LSM Methode (siehe Tabelle 5.7).

Stufe	Methode	Ergebnis	Verwendung
1	FBM-pixel/subpixel	Gemessene FBM Punkte	Näherungswerte
2	Datenreduktion im Objektraum	Reduzierte FBM Punkte	Näherungswerte DHM-Berechnung (off-line)
3	LSM (hier off-line)	Gemessene LSM Punkte	DHM-Berechnung (off-line)

**Tabelle 5.7** Massenpunktmessung zur DHM Generierung und zur Bestimmung von Näherungswerten für die Zuordnung.

In jedem von der Meßstrategie bereitgestellten Meßfenster wurden, wie bereits in Abbildung 5.5c dargestellt, Zuordnungsfenster ausgewählt (maximal von der Größe der Meßfenster). In einem Zuordnungsfenster erfolgte die Bildzuordnung zuerst nach der FBM Methode.

Das Ergebnis waren **rohe FBM-Daten**, die im Objektkoordinatensystem vorlagen. Es konnten dabei für ein typisches Modell ( $9 \times 18 \text{ cm}^2$ ) zwischen 50000 und 500000 Punkte auftreten. Dies bedeutete, daß die Oberfläche im Durchschnitt von 3 bis 30 Punkten je  $\text{mm}^2$  im Bild beschrieben wurde.

In einem nächsten Schritt wurde diese hohe Punktzahl durch **Filterung** reduziert. Die **Datenreduktion** im Objektraum ging davon aus, daß ein zugeordneter Punkt nur der korrekte Geländepunkt, eine 3D-Störung oder eine fehlerhafte Zuordnung sein konnte (siehe Tabelle 5.8). Die Datenreduktion mittels robuster Filterung sollte Rauschen und 3D-Störungen beseitigen. Von vornherein wurde davon ausgegangen, daß mit diesem Ansatz nur kleinere oder vereinzelt Störungen beseitigt werden konnten. Zur Vorbereitung wurde im Objektraum ein Gitter mit vorgegebener Gitterweite über die Oberfläche gelegt. Diese Gitterweite war dabei üblicherweise kleiner als bei der manuellen Messung, da sehr viele Messungen zur Verfügung standen. Die gemessenen Punkte innerhalb einer Gittermasche wurden hier auf einen repräsentativen Punkt reduziert. Dies geschah durch eine Medianfilterung der Höhenkoordinaten, wenn das Geländeelement als eben betrachtet wurde, und durch die Anpassung einer geneigten Ebene im Raum nach der L1-Norm (Hahn, 1988), wenn das Geländeelement als geneigt angesehen wurde. Die Lösung mit der geneigten Ebene wies die gleichen robusten Eigenschaften hinsichtlich Ausreißern auf wie die Medianfilterung (Hahn, 1985).

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Geländepunkt und korrekt zugeordnet</li><li>• 3D Störung, die nicht zum Geländemodell gehört</li><li>• Virtueller Punkt als Resultat einer fehlerhaften Zuordnung</li></ul> |
|---|

**Tabelle 5.8** Potentielle Eigenschaften eines zugeordneten Punktes.

Die Geländeelementgröße, der Bildmaßstab und die Auflösung in der Höhe waren entscheidend für die Wahl der Filterung und der entsprechenden Parameter. Der entscheidende Punkt dabei war, daß die Filterparameter weitgehend automatisch aus den Daten bestimmt wurden. Ein Ansatz zur Bestimmung der optimalen Geländeelementgröße aus repräsentativen Profilen ist in Kapitel 6 beschrieben. Es hätten hier auch Erfahrungen aus der DHM Berechnung z.B. über Variationsanalyse etc. eingesetzt werden können. Als Nebenprodukt der Datenreduktion erhielt man Aussagen über die interne Genauigkeit der rohen und der reduzierten Meßdaten.

Die so reduzierten Daten dienten als Näherungswerte für eine abschließende Zuordnung nach der **LSM Methode**. Das bedeutete, daß diese Punkte nacheinander im Objektraum angefahren, über die oben beschriebenen Transformationen entsprechende Bildausschnitte digitalisiert und abschließend die Feinzuordnung und die Rücktransformation in den Objektraum durchgeführt wurden.

Die 3D-Objektpunkte von FBM und/oder LSM Messung gingen dann in die DHM Berechnung ein. Bei eingeschränkten Genauigkeitsanforderungen sollten bereits die Ergebnisse der FBM Zuordnung bzw. der reduzierten FBM-Daten ausreichen, zumal bei der FBM Methode eine Subpixelschätzung zugeschaltet werden konnte.

Die allgemeine Aufgabe war, aus den zur Verfügung stehenden gemessenen Punkten und der evtl. vorhandenen Zusatzinformation (Begrenzungslinien, Bruchkanten und Strukturlinien) eine regelmäßige Gitterstruktur bzw. ein **DHM** abzuleiten. Dies hätte z.B. mit Finiten Elementen realisiert werden können. Im Gegensatz zur konventionellen DHM Generierung konnten nun auch Qualitätsaussagen durch interne Genauigkeitsabschätzungen bei der Datenreduktion bzw. bei der LSM Messung miteingehen.

In dem **Pilotprogramm** wurde eine einfachere Version verwendet und auf das zur Verfügung stehende SCOP-Programm (Köstli, 1986) zurückgegriffen (siehe Tabelle 5.9). In diesem DHM-Programm wird aus beliebig verteilten Punkten ein Gitter nach dem Prinzip der Kollokation interpoliert. Dieses Programm war ursprünglich auf konventionelle Datenerfassung ausgerichtet und macht normalerweise eine Verdichtung, ist somit auf eine geringe

Massenpunktzahl ausgelegt. Durch die Filterung der rohen FBM-Punkte wurden bei der automatischen Messung aus der Gruppe von Punkten in einer Geländemasche jeweils ein repräsentativer Punkt ausgewählt. Aus diesen repräsentativen Geländepunkten wurde ein regelmäßiges Gitter mit dem SCOP-Programm interpoliert.

Method	Eingangsdaten	Verarbeitung	Ergebnis
(a)	Massenpunkte (FBM, LSM) Bruchkanten, Strukturlinien	Finite Elemente	DHM
(b)	Massenpunkte (FBM, LSM) Bruchkanten, Strukturlinien	Filterung von FBM Punkten im Objektraum --> repräsentative Geländepunkte SCOP-Interpolation	DHM

**Tabelle 5.9** DHM Berechnung aus zugeordneten Punkten, Bruchkanten und Strukturlinien. (a) Generelle Lösung, (b) Realisierung im Pilotsystem.

### 5.5 Nachbearbeitung

An Versagerstellen, die von der automatischen Messung markiert werden, konnte die Messung durch den Operateur wieder aufgenommen werden. Dies geschah vorzugsweise, nachdem alle Liniestücke automatisch angegangen worden waren, war aber auch während der Messung entlang einer Linie möglich. Dem Operateur blieb überlassen, ob er alle fehlenden Stücke des Graphen manuell bearbeitete, oder ob er nur einzelne Punkte manuell vorgab und dann die automatische Messung einsetzte. Die zweite Methode war vorzuziehen, da die Operateursmessung auf zwei Freiheitsgrade eingeschränkt war. Der Operateur wurde durch die Meßstrategie gezwungen, auf dem Profil der Schnittebene zu messen, konnte also eigentlich nur die Datenstruktur aufbauen.

Eine automatische Messung konnte jederzeit abgebrochen und zu einem späteren Zeitpunkt auch wieder fortgesetzt werden. Dies ermöglichte es, auch andere Steuerparameter auszuwählen, sofern sich nach den ersten Ergebnissen herausstellte, daß die ausgewählten Parameter ungünstig waren. Eine Änderung des Steuerrasters war zu diesem Zeitpunkt allerdings nicht mehr möglich.

Neben dem DHM lagen als Ergebnis der Messung ein Ausdruck der eingegebenen Steuerdaten, der Daten der Kalibrierung und aller Nachkalibrierungen, sowie der Fehler- und Informationsmeldungen vor. Hinzu kam eine Statistik über Zuordnungsausfälle sowie über aufgetretene Fehlerklassen.

#### Fazit

Mit diesem Pilotsystem war es möglich, empirische Prinzipuntersuchungen durchzuführen mit dem Ziel, daraus Spezifikationen für ein praktisch einsetzbares System abzuleiten. Eine Realisierung der direkten Verknüpfung der Messung mit der DHM Generierung war in diesem Pilotsystem auf Grund von Hardwarebeschränkungen nicht möglich. Auch die Näherungswertbestimmung konnte nicht in so eleganter Weise wie mit automatischen hierarchischen Lösungen erfolgen. Das war aber auch nicht der Sinn des Systems. Diese Einschränkungen sind mit der heute zur Verfügung stehenden Hard- und Software bedeutungslos geworden.

Inwieweit die hohen Erwartungen an die Qualität der Messungen und eines daraus abgeleiteten DHM's bei realem Bildmaterial erfüllt werden, mußte durch eine umfassende empirische Untersuchung überprüft werden. In Kapitel 6 wird die empirische Überprüfung mit ihren Ergebnissen vorgestellt und diskutiert und daran anschließend eine Liste von Spezifikationen für ein praktisch einsetzbares System zur automatischen DHM Generierung aufgestellt.

## 6 PRINZIPERPROBUNG DES ENTWICKELTEN DHM PILOTSYSTEMS

Das in Kapitel 5 entwickelte Pilotsystem wurde empirisch erprobt, und zwar im Hinblick auf operationelle Leistung und Wirksamkeit der digitalen Bildzuordnung für die DHM Generierung. Insbesondere sollten Informationen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit automatisch erfaßter DHM Daten gewonnen werden. Dabei lassen sich 2 Aspekte, nämlich die **Qualität der Messung** mit automatischer Zuordnung und die **Qualität des erzeugten DHM** unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse mit manuellen Messungen bzw. mit dem manuell erfaßten DHM verglichen. Zum Zwecke des Vergleichs wurden zwei verschiedene Zuordnungsverfahren eingesetzt, die LSM- und die FBM-Methode.

Weiterhin war zu untersuchen, wie die **hohe Punktdichte** und **Redundanz** für die **Eliminierung von 3D-Störungen** genutzt werden konnte, also inwieweit die beschriebene Filterung der Zuordnungen auf repräsentative Geländepunkte funktioniert. Darüber hinaus war festzustellen, ob interne Qualitätsaussagen aus der hohen Redundanz abgeleitet werden können und wie diese mit extern ermittelten absoluten Vergleichswerten übereinstimmen.

Diese Ziele der empirischen Überprüfung des Pilotsystems sind in Abschnitt 6.1 weiter ausgeführt. Das Testdatenmaterial (siehe 6.2) wurde entsprechend den Zielen ausgewählt und basierte ausschließlich auf realem Bildmaterial. Die gewählten Testgebiete waren umfangreich genug, so daß allgemein gültige Aussagen über das Konzept erwartet werden konnten. Das Testdesign (siehe 6.3) wurde so angelegt, daß Antworten auf die in den Untersuchungszielen aufgeworfenen Fragen gefunden werden konnten. Die Ergebnisse werden zuerst beispielhaft für ein einzelnes Teilprojekt besprochen und danach im Gesamtüberblick tabellarisch zusammengestellt (siehe 6.4). Teile dieser Ergebnisse sind in (Hahn, 1988, 1989) zu finden. Die eigentliche Analyse mit einer Beurteilung der erreichten Resultate hinsichtlich der geplanten Ziele erfolgt in Abschnitt 6.5. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Erfahrungen folgt in Abschnitt 6.6, woraus eine Liste von Spezifikationen für ein praktisch anwendbaren Systems abgeleitet wird.

### 6.1 Ziele der Prinzipierprobung

Die empirischen Untersuchungen waren im wesentlichen auf die **Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekte** der automatischen Messung bzw. der Bildzuordnung mit der FBM- und der LSM-Methode und der generierten DHM ausgerichtet.

Die Analyse der Messungen stützte sich auf einen Vergleich der automatischen Messungen untereinander (LSM<->FBM) und mit manuellen Messungen. Die **Genauigkeitsangaben sind immer empirische Schätzungen der Differenzen** zwischen zwei verschiedenen Arten von Messungen, die Komponenten wurden also nicht getrennt, sofern nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird. Es bedurfte zusätzlicher Aussagen über die Qualität der manuellen Messung, um absolute Werte für die Genauigkeit der automatischen Messung selbst abzuleiten. Dazu wurden zwei unabhängige manuelle Meßserien durchgeführt.

Die Analyse der automatisch abgeleiteten digitalen Höhenmodelle, also eines FBM-DHM's aus den FBM Messungen und eines LSM-DHM's aus den LSM Messungen, wurde wiederum im Vergleich mit manuell ermittelten Sollwerten durchgeführt, in diesem Fall also einem aus den manuellen Messungen abgeleiteten DHM.

Bei der Analyse der Messungen und der Digitalen Höhenmodelle standen wie gesagt Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Vordergrund. Hinsichtlich Genauigkeit war also direkt die Genauigkeit der automatischen Messungen und der digitalen Höhenmodelle festzustellen. Bezüglich der Messungen war zu unterscheiden die Genauigkeit von FBM-Daten, LSM-Daten und der durch Filterung reduzierten FBM-Daten. In den gemessenen oder **rohen FBM Daten** war ein höherer Anteil von Ausreißern zu erwarten, wobei Ausreißer Punkte sind, die das Gelände nicht korrekt repräsentieren, oder Punkte, die auf Grund grob falscher Korrelation erhalten wurden. Die Genauigkeit der **reduzierten FBM Daten** war von Interesse, da diese als Näherungswerte für die Feinzuordnung und als Eingangsdaten für eine separate DHM Berechnung dienten, dem FBM-DHM. Die Genauigkeit der gemessenen **LSM Daten** war von Bedeutung für die Beurteilung des daraus abgeleiteten DHM's, des LSM-DHM (siehe auch Tabelle 6.1). Um Angaben über die

Möglichkeiten zu einer Selbstdiagnose zu erhalten, wurde darüber hinaus die Qualität der internen Genauigkeitsschätzungen während des Reduktionsprozesses untersucht.

Hinsichtlich der **Zuverlässigkeit** war in erster Linie die Vollständigkeit der Abdeckung des Geländes von Interesse sowie die Möglichkeit, fehlerhafte Messungen zu eliminieren und gewisse 3D-Störungen zu erkennen und zu umgehen (siehe Tabelle 6.1).

GENAUIGKEIT	ZUVERLÄSSIGKEIT
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemessene FBM-Daten</li> <li>• Reduzierte FBM-Daten</li> <li>• Gemessene LSM-Daten</li> <li>• FBM-DHM aus reduzierten Daten</li> <li>• LSM-DHM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständigkeit</li> <li>• Elimination falscher Zuordnungen</li> <li>• Erkennung von 3D-Störungen</li> </ul>

**Tabelle 6.1** Detailuntersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der automatischen Messungen und der abgeleiteten Digitalen Höhenmodelle.

Die Wahl der Pixelgröße und die Wahl der Geländeelementgröße (Gittermasche) sind weitere unbekannte Faktoren, deren Einfluß auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit untersucht wurden. Bei der FBM-Messung wurden zusätzlich 2 verschiedene Methoden zur Punktauswahl gesondert untersucht. Die Testgebiete waren so ausgewählt, daß auch Aussagen über den Einfluß der Lage eines Meßfensters im Stereomodell und der Richtung der Textur in Bezug auf die Epipolarrichtung erwartet werden konnten.

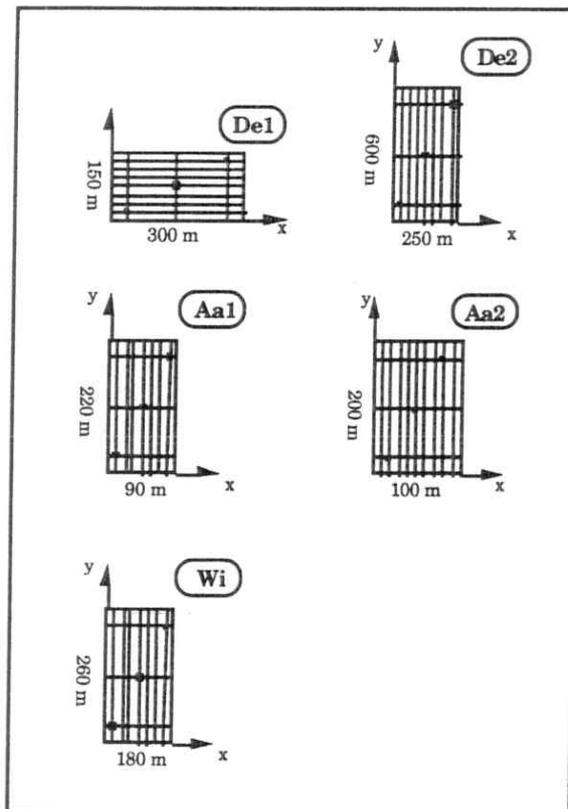
Neben den oben genannten Zielen sollten auch vorläufige Informationen über die Wirtschaftlichkeit des Pilotsystems, d.h. insbesondere die Anwendbarkeit, die Geschwindigkeit und den Automationsgrad gewonnen werden, jedoch vor dem Hintergrund des definitiven Vorläufercharakters des Pilotsystems mit den erwähnten einschränkenden Randbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Hardware.

## 6.2 Testdatenmaterial

Für die Untersuchung wurden drei verschiedene Geländetypen aus 3 verschiedenen Bildpaaren ausgewählt. Die drei Gebiete „Desert“, „Agricultural Area“ und „Wilderness“ sind in Tabelle 6.2 zusammenfassend charakterisiert (hier werden im folgenden die eingeführten englischen Namen der Testgebiete verwendet). Im Stereomodell „Desert“ wurden zwei Testgebiete De1 und De2 ausgewählt, um den Einfluß der Lage des Gebietes im Modell zu erfassen. Der Einfluß der Texturrichtung auf die Genauigkeit wurde aus den zwei Testgebieten Aa1 und Aa2 im Modell „Agricultural Area“ untersucht.

„Gebietsname“ und Projektname	Beschreibung	Bildmaßstab (Flughöhe)	Gebietsgröße	
			[m m <sup>2</sup> ]	[pel]
„Desert“ De1 De2	Wüstengebiet, Kleinformen Ausschnitt im Modellzentrum Ausschnitt am Modellrand	1 : 15 000 (2 300 m)	17 x 40 10 x 20	850 x 2000 500 x 1000
„Agricultural Area“ Aa1 Aa2	gleichförmiges, sanftes Gelände Ackerfurchen quer zu Epipolarlinien Ackerfurchen parallel zu Epipolarlinien	1 : 8 000 (1 230 m)	11 x 28 13 x 25	550 x 1400 650 x 1250
„Wilderness“ Wi	Steiles, rauhes Gelände, Felsen	(1 : 10 000) (1 530 m)	18 x 26	900 x 1300

**Tabelle 6.2** Beschreibung der Gebiete zur empirischen Untersuchung mit Bildmaßstab, Flughöhe und Gebietsgröße im Bild (Die Angabe der Pixelzahlen gilt für die höchste Auflösung).



**Abbildung 6.1** Skizzen der Stellerraster und Lage der Startpunkte aller Teilprojekte.

Profile und Querprofile innerhalb des Meßgebiets. Startpunkte sind als schwarze Rechtecke markiert. Die Größenangaben sind auf das Gelände bezogen. Wi: 7 Längsprofile + 3 Querprofile

De1: 7 Längsprofile + 3 Querprofile De2: 7 Längsprofile + 3 Querprofile

Aa1: 7 Längsprofile + 3 Querprofile Aa2: 9 Längsprofile + 3 Querprofile

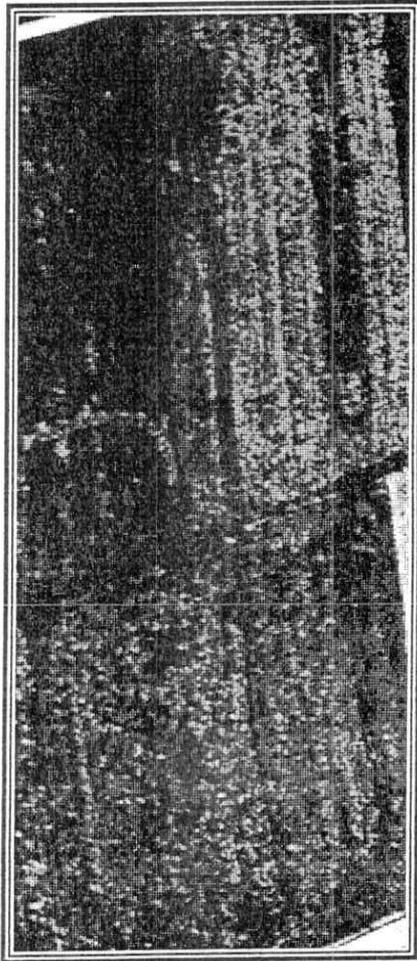
Die gewählten Stellerraster und Startpunkte sind für alle Projekte in Abbildung 6.1 angegeben. Abbildung 6.2 zeigt verkleinerte Ausdrücke der Originalbildinformation für die Projekte De1, Aa1, Wi. Anzumerken ist, daß die Bildqualität von Stereomodell „Wilderness“ nicht besonders gut war, was sich in den folgenden Ergebnissen zeigen wird.

### 6.3 Testdesign

Das Testdesign umfaßte insgesamt 8 verschiedene Untersuchungsschritte, insbesondere die automatische Messung mit der FBM- und der LSM-Methode und die Ableitung zweier Höhenmodelle daraus sowie die manuelle Messung und das manuelle DHM und ein abschließender Vergleich der digitalen Höhenmodelle. Die 8 Schritte sind in Tabelle 6.3 aufgeführt und wurden auf jedes der oben angesprochenen Projekte angewandt. Die verschiedenen Schritte in dieser Tabelle werden im folgenden weiter erläutert.

1	Messung der FBM-Daten
2	Reduktion der FBM-Daten mit Genauigkeitsanalyse
3	Ableitung des FBM-DHM
4	Messung der LSM-Daten
5	Ableitung des LSM-DHM
6	Manuelle Messung
7	Ableitung des manuellen Vergleichs-DHM (MAN-DHM)
8	Vergleich von FBM- und LSM-DHM mit dem manuellen DHM

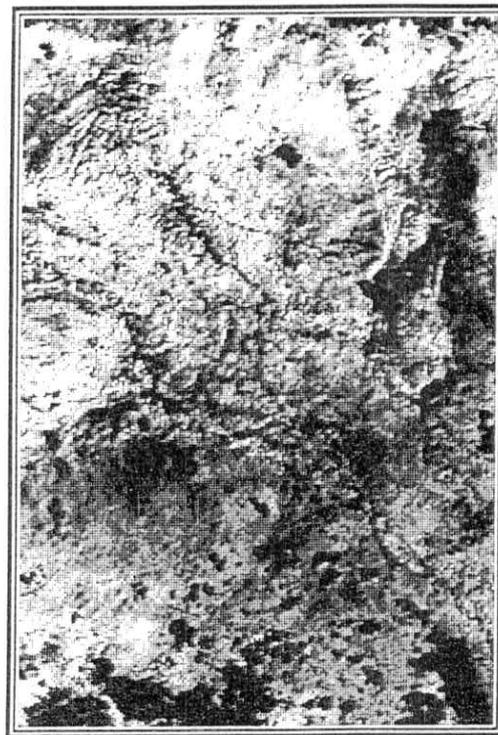
**Tabelle 6.3** Die acht Untersuchungsschritte der empirischen Überprüfung, die auf alle Projekte angewandt wurden.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 6.2 Grauwertbilder der Projekte (a) Aa1, (b) De1, (c) Wi.

### 6.3.1 Messung der FBM-Daten

Die gesamte Fläche eines Projektes wurde nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren mit dem FBM-Algorithmus in drei unterschiedlichen Pixelgrößen (20µm, 40µm und 60µm) gemessen. Für die Messungen mit 20µm Pixelgröße wurden zwei verschiedene Versionen der Auswahl von Punkten bei den rohen FBM Daten ausgegeben. In Version 'w' sind die ausgewählten Punkte die **Fenstermittten**. In Version 'p' sind die ausgewählten Punkte die gradientengewichteten Schwerpunkte innerhalb des Fensters des FBM Algorithmus, d.h. für diese Punkte wurde eine **Subpixel-schätzung** durchgeführt. Für die Teilprojekte De2 und Aa2 wurde nur die Version 20p (20µm Pixelgröße und FBM-Typ 'p') eingesetzt.

Um Aussagen über die Genauigkeit zu erhalten, wurde eine feste Zahl (meist 500) von nach dem Zufallsprinzip ausgewählten Punkten nach X,Y Koordinaten angefahren und die Höhe manuell gemessen. Aus den so erhaltenen Höhendifferenzen (manuell minus automatisch) wurde die Median Absolut Differenz (MAD) berechnet und daraus die **robuste Standardabweichung**  $\sigma(\text{MAD})$  geschätzt

$$\sigma(\text{MAD}) \approx 1.5 \times \text{MAD} \quad (6-1)$$

(siehe Ableitung in 3.3.3), um damit grobe Ausreißer in den Differenzen zu eliminieren.

Aus den akzeptierten Differenzen, d.h. also ohne Ausreißer, wurde als Maß für die Genauigkeit der Bias (6-2), der Mittelwert der Differenzen, und die Standardabweichung (6-3), hier als RMS bezeichnet, berechnet.

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad \text{mit } d_i = \text{Differenz}_i (\text{ohne Ausreißer}), N = \text{Zahl der Differenzen} \quad (6-2)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - \text{Bias})^2}{N-1}} \quad \text{mit } d_i = \text{Differenz}_i (\text{ohne Ausreißer}), N = \text{Zahl der Differenzen} \quad (6-3)$$

Zu beachten ist, daß zwei verschiedene Schwellwerte für die Definition von Ausreißern angewandt wurden. Ein **interner Schwellwert T** wurde für die Analyse der automatisch gemessenen Daten eingesetzt und berechnete sich nach

$$T_{\text{max,min}} = \text{median} \{x_i\} \pm 3 \sigma(\text{MAD}) \quad (6-4)$$

Er entspricht dem Schwellwert „N“ in 3.3.3. Werte außerhalb des Intervalls  $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$  wurden als Ausreißer betrachtet. Dieser Schwellwert basiert auf der robust geschätzten empirischen Genauigkeit, womit die Zahl der Ausreißer ein Maß dafür gibt, inwieweit die Differenzen einer Normalverteilung folgen bzw. wie homogen die Daten sind.

Ein **externer Schwellwert S** bezog sich auf die Standardabweichung der **manuell** gemessenen Daten und wurde nach

$$S_{\text{max,min}} = \pm 3 \sigma(\text{Manuell}) \quad (6-5)$$

berechnet. Der Medianwert, die robuste Standardabweichung und die Zahl der Ausreißer wurden zur Selbstdiagnose bei der Reduktion benützt und für die Vergleiche zwischen verschiedenen Meßreihen oder digitalen Höhenmodellen herangezogen. Der externe Schwellwert diente zur Klassifizierung von Ausreißern auf der Grundlage der erreichten manuellen Genauigkeit.

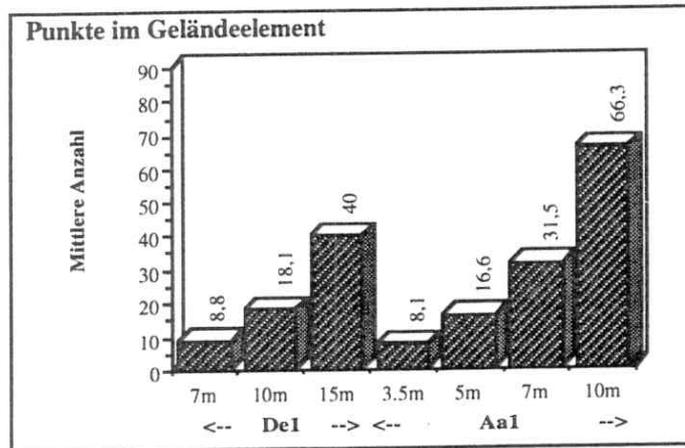
### 6.3.2 Reduktion der FBM-Daten mit interner Genauigkeitsanalyse

Wie beschrieben wurden die gemessenen FBM-Punkte durch robuste Filterung auf repräsentative Punkte reduziert. Dazu erfolgte im Objektraum eine Unterteilung des Gebietes in ein Gitter mit bestimmter Maschenweite. Diese Größe, auch **Geländeelementgröße** (oder engl. „groundel size“) genannt, wurde vorab festgelegt. Die Wahl der Größe eines Geländeelements ist von entscheidender Bedeutung für den Filterungs- bzw. den Datenreduktionsprozeß. Ist das Geländeelement zu klein, ist der Effekt der Filterung zu gering. Ist es zu groß, werden Kleinstrukturen ausgeglättet. Hier gilt es einen Kompromiß zu finden, der die Daten reduziert, die Information aber weitgehend erhält. Vorab wurden repräsentative Geländeprofile mit hoher Punktdichte daraufhin untersucht, inwieweit ein interpoliertes Profil mit einer minimalen Punktzahl das reale Profil hinreichend genau darstellt. Aus der daraus resultierenden Punktdichte wurde eine optimale Geländeelementgröße für den Datenreduktionsprozeß abgeleitet. Die Beurteilung der Profile erfolgte mit Hilfe von **Autoregressiven Modellen** (AR-Modelle) nach Lindenberger (Lindenberger, 1986). Der Test wurde mit repräsentativen Profilen aus Projekt De1 und Aa1 durchgeführt.

In zwei Projekten (De1-20p und Aa1-20p) wurde der Einfluß von verschiedenen Geländeelementgrößen (zwischen  $3.5 \times 3.5 \text{ m}^2$  und  $10 \times 10 \text{ m}^2$ ) auf die Genauigkeit analysiert. Abbildung 6.3 zeigt die durchschnittliche **Anzahl von Punkten je Geländeelement** für unterschiedliche Elementgrößen (Seitenlängen). Die mittlere Anzahl variiert zwischen 8 und 66 Punkten.

Die Seitenlängen aufeinanderfolgender Geländeelementgrößen unterscheiden sich ungefähr um den Faktor  $\sqrt{2}$ . Ihr Bezug zu der Größe der in den beiden Projekten gewählten Zuordnungsfenster (Seitenlänge ZF) ist ebenfalls angegeben. Im Projekt De1 ist das Zuordnungsfenster ungefähr  $10 \times 10 \text{ m}^2$  groß, in Aa1 nur ungefähr  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . Da pro Geländeelement (Gittermasche) nur 1 repräsentativer Punkt ausgewählt werden sollte, ist die **Redundanz** sehr hoch.

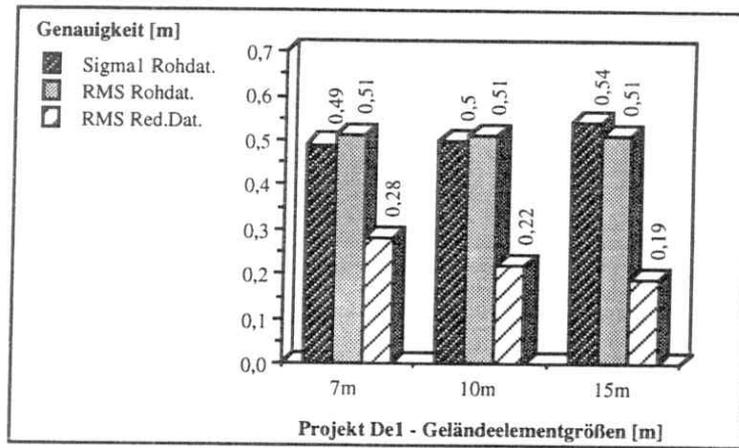
Die Abhängigkeit der **Genauigkeit** von der Geländeelementgröße in den beiden Projekten (De1-20p und Aa1-20p) wurde durch Vergleichsmessungen überprüft. In Abbildung 6.4 ist zu erkennen, daß bei einer Vergrößerung der Geländeelementgröße die Genauigkeit der mit der FBM-Methode ( $20 \mu\text{m}$ , Typ „p“) ermittelten Rohdaten leicht abnahm, d.h. größere Werte von (RMS Rohdat.) auftraten, wohingegen die Genauigkeit der reduzierten Daten (RMS Red.Dat.) durch die hohe Redundanz zunahm, bei dem Teilprojekt Aa1 sogar um ca. den Faktor 2.



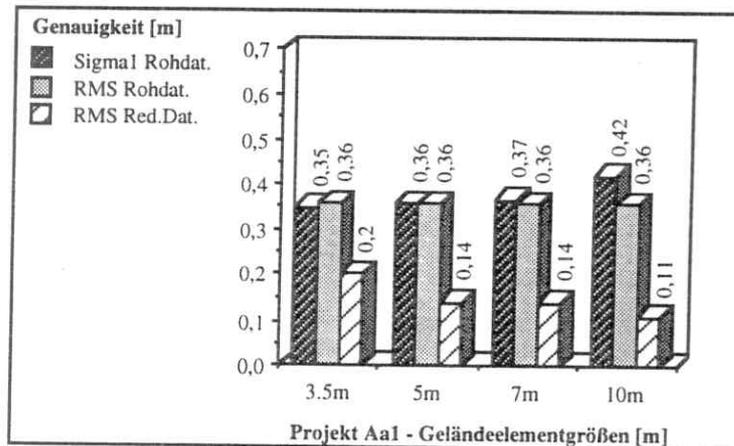
**Abbildung 6.3** Mittlere Anzahl von Punkten im Geländeelement für die Projekte De1-20p und Aa1-20p in Abhängigkeit von der Geländeelementgröße (hier sind die Seitenlängen eines Elementes angegeben). Die Verhältnisse der Seitenlängen der Geländeelemente zu denen der Zuordnungsfenster sind unten aufgeführt.

De1	Verhältnis zu ZF	Aa1	Verhältnis zu ZF
7 m	$\approx ZF / \sqrt{2}$	3.5 m	$\approx ZF / \sqrt{2}$
10 m	$\approx ZF$	5 m	$\approx ZF$
15 m	$\approx ZF \times \sqrt{2}$	7 m	$\approx ZF \times \sqrt{2}$
		10 m	$\approx ZF \times 2$

(ZF ist die Seitenlänge des Zuordnungsfensters)



(a)



(b)

**Abbildung 6.4** Einflüsse unterschiedlich gewählter Geländeelementgrößen auf die Genauigkeit von Roh- und reduzierten Daten der FBM-Messung für (a) Projekt De1-20p und (b) Projekt Aa1-20p.

- $\sigma_1$ : robuste Standardabweichung (interne Schätzung)
- RMS Rohdat.: Standardabweichung (ohne Ausreißer) der Rohdaten
- RMS Red. Dat.: Standardabweichung (ohne Ausreißer) der reduzierten Daten also der repräsentativen Geländepunkte
- AR-Modell Vorschlag: Geländeelementgröße für De1: 15 m und für Aa1: 7 m

Der Vorschlag für die optimale Geländeelementgröße aus der **Autoregressiven Modell (AR-Modell) Analyse** betrug 15 m für das Projekt De1, bzw. 7 m für das Projekt Aa1 (bei Pixelgröße 20  $\mu$ m). Kleinere Geländeelementgrößen als der AR-Modell Vorschlag resultierten in einer geringeren Genauigkeit der reduzierten Daten. Größere Elementgrößen wurden nicht betrachtet, da der zu erwartende Generalisierungseffekt zu groß ist. Mit Hilfe der AR-Methode ist man also in der Lage, diesen wichtigen Parameter mittels weniger repräsentativer Profile zu bestimmen. Die manuelle Definition dieser Profile ist sicherlich ein akzeptabler Aufwand auch für eine Produktionsphase.

Dabei ist ein interessanter **Bezug dieser optimalen Geländeelementgröße zur Zuordnungsfenstergröße** festzustellen. In beiden Projekten (De1 und Aa1) war die vorgeschlagene Geländeelementgröße oder Gittermasche mit (15 m bzw. 7 m) ungefähr um den Faktor  $\sqrt{2}$  größer als die Größe des Zuordnungsfensters, jeweils bezogen auf die Seitenlänge (siehe Abbildung 6.3). Somit war also eine praktisch anwendbare **Faustformel** zur Wahl einer geeigneten Geländeelementgröße gegeben.

Der Datenreduktionsprozess gab durch die **Redundanz** hervorragendes statistisches Material für eine interne Genauigkeitsschätzung unabhängig von manuellen Messungen. Dies ist von entscheidender Bedeutung für die Automation, da üblicherweise keine Vergleichsmessungen zur Verfügung stehen. Aus allen **Punkthöhen innerhalb eines Geländeelements** wurde die Medianabsolutdifferenz (MAD) bestimmt und daraus die **robuste Standardabweichung**  $\sigma_1$  analog zu  $\sigma(\text{MAD})$  (6-1) berechnet. Die robuste Standardabweichung  $\sigma_1$  ergab ein Maß für

die Höhengenaugigkeit innerhalb eines Geländeelements. Dieser Wert über alle Geländeelemente gemittelt ergab die mittlere geschätzte Genauigkeit der rohen Daten in allen Geländeelementen vor der Reduktion.

In Abbildung 6.4 (oben) ist die sehr gute Übereinstimmung der internen Genauigkeitsschätzungen mit der robusten Standardabweichung (Sigma1 Rohdat.) und den externen, aus manuellen Vergleichsmessungen ermittelten Werten (RMS Rohdat.) zu sehen. Da bezüglich der rohen FBM Daten die Genauigkeit der manuellen Messung um ein vielfaches höher lag, war die aus den Differenzen ermittelte Genauigkeit (RMS Rohdat.) praktisch die Genauigkeit der rohen FBM Messungen. Somit konnte die Standardabweichung  $\sigma_1$  angewandt werden, die sich ja auf Messungen und nicht auf Differenzen bezog.

Für eine Abschätzung der Genauigkeit der reduzierten Daten, d.h. der nach der Ausdünnung in jedem Geländeelement verbleibenden repräsentativen Punkte, mußte der Effekt der Filterung miteinbezogen werden. Wenn  $\sigma_1$  die geschätzte Standardabweichung der einzelnen Höhen war, konnte die Genauigkeit der bei der Reduktion ausgewählten Punkte durch  $\sigma = \sigma_1/\sqrt{n}$  angenähert werden, wobei n die mittlere Anzahl von Punkten in einem Geländeelement darstellte. Wie ein Vergleich der Werte von „RMS Red.Dat“ und „Interne Schätzung  $\sigma$ “ in Tabelle 6.4 zeigt, war dieser Wert zu optimistisch, so daß ein empirisch ermittelter **Korrekturfaktor F** eingeführt wurde und somit

$$\sigma_2 = F \cdot \sigma = F \cdot \sigma_1/\sqrt{n} \quad \text{mit } F \approx 2 \quad (6-6)$$

als Schätzwert für die Genauigkeit der reduzierten Daten verwendet wurde. Dieses interne Maß konnte zur Selbstdiagnose verwendet werden und wurde in der Untersuchung mit den Werten verglichen, die aus dem Vergleich mit der manuellen Messung abgeleitet worden waren.

Projekt	Gelände- elementgröße [m]	Mittlere Punktzahl im Geländeelement	RMS Red. Dat. [m]	Interne Schätzung $\sigma$ [m]	Faktor F = (RMS/ $\sigma$ )
De1	7.0	8.81	0.28	0.17	1.65
	10.0	18.13	0.22	0.12	1.83
	15.0	39.99	0.19	0.09	2.11
Aa1	3.5	8.05	0.20	0.12	1.66
	5.0	16.57	0.14	0.09	1.55
	7.0	31.54	0.14	0.07	2.00
	10.0	66.27	0.11	0.05	2.20

**Tabelle 6.4** Empirische Ermittlung des Korrekturfaktors F für die interne Schätzung  $\sigma_2 = F \cdot \sigma$  der Genauigkeit der reduzierten Daten ( $\sigma = \sigma_1/\sqrt{n}$ ).

Angegeben ist das Verhältnis der Genauigkeit der reduzierten Daten (RMS Werte) und ihrer internen Schätzung für die Projekte Aa1 und De1 in Abhängigkeit von der Geländeelementgröße. In erster Näherung wird F zu F=2 gewählt.

### 6.3.3 Ableitung des FBM-DHM und externe Genauigkeitsanalyse der reduzierten FBM-Daten

Das Ergebnis der Datenreduktion war eine gefilterte Teilmenge der ursprünglichen Meßwerte, d.h nur noch 1 repräsentativer Punkt je Geländeelement. Um die Genauigkeit dieses gefilterten Datensatzes zu ermitteln kontrollierte man 500 zufällig ausgewählte Punkte durch manuelle Messungen. Bei weniger als 500 verbleibenden Punkten wurden alle Punkte verwendet. Aus den Höhendifferenzen (manuell-automatisch) wurden mit Hilfe der robusten Standardabweichung und einer Elimination der Ausreißer Genauigkeitsangaben (Bias, RMS) abgeleitet (6.3.1). Die reduzierten FBM-Daten dienten als Eingabewerte für die Berechnung des FBM-DHM's die mit dem SCOP-Programm erfolgte. Eine nähere Programmbeschreibung kann der Literatur entnommen werden (Kraus, 1982; Köstli, 1986).

### 6.3.4 Messung der LSM-Daten, Genauigkeitsanalyse und Ableitung des LSM-DHM

Als Näherungswerte für die Feinzuordnung nach der Kleinsten Quadrate Methode (LSM) verwendete man die reduzierten FBM-Daten. Schwach zugeordnete Punkte, die die DHM Berechnungen hätten nachteilig beeinflussen können, wurden durch die Anwendung von Schwellwerten für die ermittelten Qualitätsmaße bei der LSM Messung eliminiert. Gemessene Höhen aus der Feinzuordnung wurden ebenfalls manuell kontrolliert und die Höhendifferenzen analysiert. Ausreißer waren dadurch eliminiert und somit bei der Berechnung der Genauigkeitsangaben (Bias, RMS) nicht im Spiel. Auch hier konnte die Zahl der Differenzen kleiner sein als 500. Alle nicht eliminierten Meßwerte gingen direkt in die Berechnung des LSM-DHM's ein, die ebenfalls mit dem SCOP Programm durchgeführt wurde. Für diese Berechnung blieben allerdings die intern ermittelten Genauigkeitsschätzungen der Parallaxenmessung bei der LSM-Methode für einzelne Punkte unberücksichtigt, obwohl dies prinzipiell möglich gewesen wäre.

### 6.3.5 Manuelle DHM Erfassung

Aus den oben beschriebenen Schritten hatte man Geländedaten einschließlich der Genauigkeitsangaben für die gemessenen Punkte aus dem stichprobenartigen Vergleich mit manuellen Messungen erhalten. Um die abgeleiteten Digitalen Höhenmodelle hinsichtlich der Genauigkeit beurteilen zu können, wurde ein weiteres DHM manuell gemessen. Dieses DHM wurde nach einer klassischen Methode erfaßt und wies eine unterschiedliche Orientierung auf. Bruchkanten und Strukturlinien wurden, soweit morphologisch von Bedeutung, explizit erfaßt.

### 6.3.6 Genauigkeit der manuell ermittelten Vergleichsdaten

Auf der Grundlage der manuellen Messungen beruht die Analyse der Genauigkeit der automatischen Messung. Zur Beurteilung der absoluten Genauigkeit werden also Angaben über die Vergleichsmessungen benötigt. Dazu gehören die Meßgenauigkeit selbst sowie die Genauigkeit der manuellen Höhenmodelle.

Der mittlere Beobachtungsfehler aus den **Differenzen von Mehrfachmessungen** gab Aufschlüsse über die interne Qualität der manuellen Messung (siehe Tabelle 6.5), die hoch war und unter dem üblicherweise angenommenen Wert von 0.1 %chg für die stereoskopische Punktmessung lag. Zu beachten ist, daß hier **keine Elimination von Ausreißern** bei der Berechnung dieser Werte stattgefunden hatte.

Projekt	Beobachtungsgenauigkeit aus 500 Messungen	
	[m]	[0.1%chg]
De1	0.13	0.57
Aal	0.09	0.73
Wi	0.14	0.92

**Tabelle 6.5** Interne Genauigkeit  $\sigma$ (manuell) einer manuellen Messung aus Mehrfachmessungen.

Für die Analyse der DHM Genauigkeit wurden **zwei unabhängige Messungen** durch zwei erfahrene Operateure für jedes Projekt durchgeführt. Die Messungen beinhalteten die Erfassung von Massenpunkten, Strukturlinien, Bruchkanten und markanten Einzelpunkten. Der Vergleich der abgeleiteten DHM ist in Tabelle 6.6 aufgeführt und in den Abbildungen 6.5 und 6.6 anschaulich dargestellt. Aus berechneten **Höhendifferenzen** zwischen interpolierten DHM-Gitterpunkten wurden Bias und RMS Werte berechnet (siehe 6.3.1).

Aus dem **RMS Wert der Differenzen** ließ sich die Genauigkeit eines **einzelnen DHM's** zu **0.05-0.06 %chg** errechnen. Sie ist damit sehr hoch, da üblicherweise nur Werte von 0.1-0.2 %chg in der Praxis erreicht werden. Die Genauigkeit eines einzelnen DHM's aus dem Gebiet Wi 'Wilderness' mit seinen großen Höhendifferenzen liegt um 0.1 %chg. Die Unterschiede in der Genauigkeit zwischen den Teilprojekten wird besonders deutlich in Abbildung 6.6.

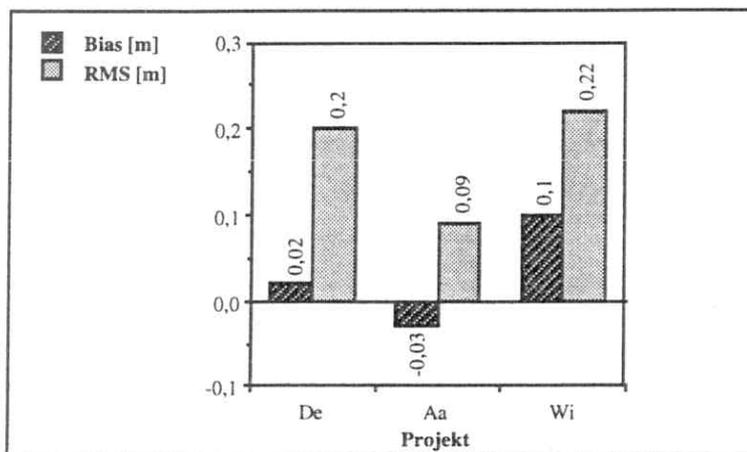
Eine größere systematische Abweichung (Bias) ist beim Projekt Wi zu beobachten. Offensichtlich setzen die zwei Operateure in diesem stark bewegten Gelände die Meßmarke unterschiedlich auf das Gelände auf.

Projekt	Punktzahl	MAN-DHM Genauigkeit			Ausreißer internes Maß [%]
		Bias [m]	RMS der Differenzen [m]	[0.1 %hg]	
De1	6 000	0.02	0.20	0.87	1.8
Aa1	2 200	-0.03	0.09	0.73	2.4
Wi	5 200	0.10	0.22	1.44	2.1

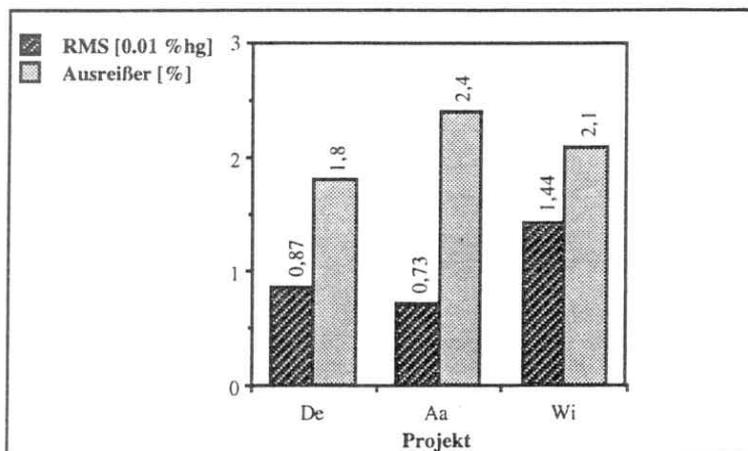
**Tabelle 6.6** Genauigkeit (RMS) und Zuverlässigkeit der manuellen DHM abgeleitet aus manuellen **Doppelmessungen**. Die Schwellwerte für Ausreißer wurden dabei nach (6-4) mit Hilfe der robusten Standardabweichung berechnet.

RMS: Standardabweichung der Differenzen ohne Ausreißer

hg: Flughöhe



**Abbildung 6.5** Bias und Standardabweichung ohne Ausreißer (RMS) in m der Vergleichs-DHM's für die drei Hauptprojekte De, Aa, Wi, abgeleitet aus manuellen Doppelmessungen



**Abbildung 6.6** Standardabweichung ohne Ausreißer (RMS) in 0.1%hg und Zahl der Ausreißer der Vergleichs-DHM's in % für die drei Hauptprojekte De, Aa, Wi, abgeleitet aus manuellen Doppelmessungen.

Die **Genauigkeit des manuellen DHM's**, ausgedrückt im RMS Wert der Differenzen, wurde ohne Ausreißer berechnet und läßt sich somit nicht direkt mit der **Meßgenauigkeit** in Beziehung setzen, bei deren Bestimmung mögliche Ausreißer nicht eliminiert wurden. Anhand der Werte in Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 kann man allerdings davon ausgehen, daß die Genauigkeit eines **einzelnen DHM** im Bereich der Meßgenauigkeit liegt.

Als Maß für die **Zuverlässigkeit** des manuellen DHM's wurden alle Höhendifferenzen zwischen den 2 unabhängigen Messungen, die betragsmäßig größer waren als dreimal die robuste Standardabweichung, als Ausreißer betrachtet. Die Zahl der Ausreißer war mit 2-3 % relativ hoch, was auf Abweichungen von einer Normalverteilung der Differenzen zweier Höhenmodelle schließen läßt. Dies läßt sich durch den Einfluß von teilweise nicht erfaßten oder unterschiedlich erfaßten morphologischen Strukturen bei den beiden unabhängigen Messungen auf die interpolierten Gitterhöhen erklären. Allerdings ist auch zu beachten, daß bei der hohen Genauigkeit die davon abgeleiteten Schwellwerte zur Eliminierung von Ausreißern sehr streng waren.

### 6.3.7 Vergleiche der automatisch gemessenen Höhenmodelle mit dem manuellen DHM

Die Ableitung und die Vergleiche der digitalen Höhenmodelle erfolgten mit dem SCOP Programm. Die Differenzen zwischen den aus manuellen und automatischen Messungen abgeleiteten DHM ergaben Aufschlüsse über die Repräsentanz der automatisch ermittelten Ergebnisse (LSM-DHM, FBM-DHM) in Bezug zum erfaßten Gelände. Zu beachten ist, daß sowohl die rein geometrische Genauigkeit als auch Effekte des mathematischen Modells, das der DHM Interpolation zugrunde liegt, miteingingen. Ein DHM diente als Referenz und das andere wurde auf die Gitterstruktur des ersten interpoliert und daraus Höhendifferenzen an den Gitterpunkten berechnet.

## 6.4 Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen

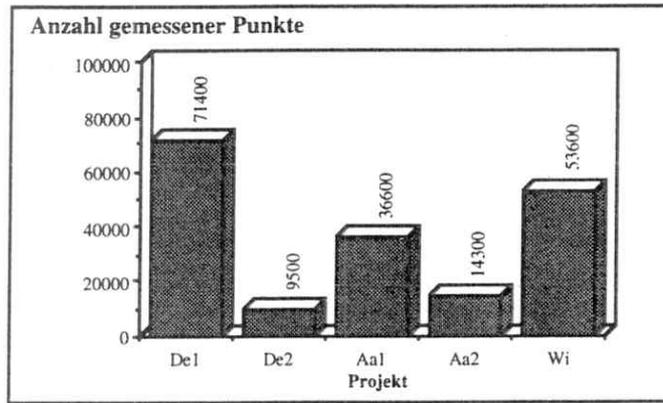
Nach Maßgaben aus dem Testdesign wurden jetzt die Vergleiche an Hand von 5 Projekten durchgeführt. Die Vergleichsuntersuchungen konzentrierten sich zunächst auf statistische Angaben über die automatische Messung. So sind in 6.4.1 die Punktzahlen aufgeführt. Hauptsächlich aber lag das Interesse am Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsvergleich der beiden automatischen Zuordnungsmethoden untereinander und im Vergleich der daraus abgeleiteten Höhenmodelle mit dem manuell erfaßten DHM. Eine detaillierte Beschreibung aller Einzelergebnisse eines Teilprojekts soll hier unterbleiben, es werden aber in einem Teilprojekt, stellvertretend für alle anderen, die untersuchten Fragen beispielhaft durchgesprochen (6.4.2), und daran anschließend wird eine tabellarische Übersicht über die zahlenmäßigen Ergebnisse aller Teilprojekte gegeben. Die Kommentierung dieser Tabellen erfolgt dann in Abschnitt 6.5.

### 6.4.1 Anzahl automatisch gemessener Punkte

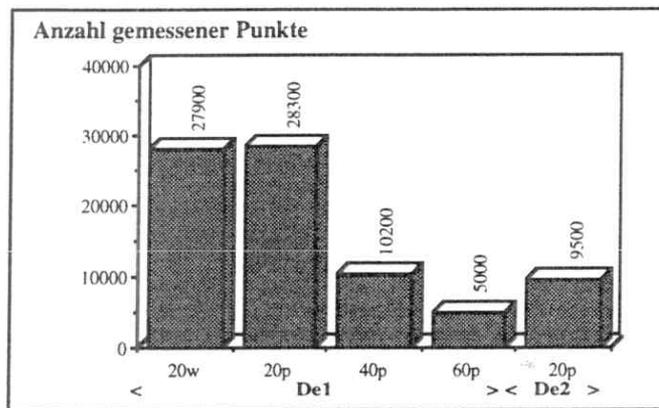
Insgesamt werden 14 Einzelfälle in den fünf betrachteten Einzelprojekten analysiert. Die Einzelfälle ergaben sich aus dem Einsatz unterschiedlicher Pixelgrößen und Punkttypen für die FBM Messung. Insgesamt wurden ca. 185000 Punkte mit dem FBM Algorithmus zugeordnet (siehe Übersicht in Abbildung 6.7).

Manuell wurden davon ca. 30000 Punkte kontrolliert. Die Punktzahlen waren in jedem Fall viel größer als bei einer konventionellen photogrammetrischen DHM Erfassung (siehe 4.5), wobei ja noch zu beachten ist, daß diese Testgebiete nur einen Teil des jeweiligen Stereomodells abdeckten.

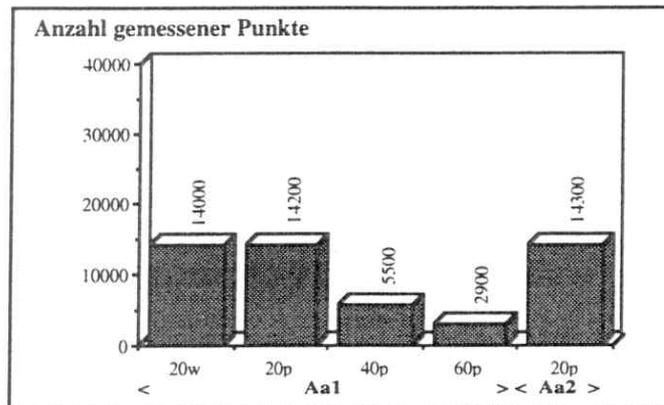
Aus Abbildung 6.8 ist die Zahl der Punktmessungen in allen 14 Einzelfällen zu ersehen. Eine Vergrößerung der Pixelgröße auf 40  $\mu\text{m}$  bzw. 60  $\mu\text{m}$  resultierte in einer Verminderung der Punktmenge. In Tabelle 6.7 werden die Reduktionsverhältnisse der Punktmengen von 20  $\mu\text{m}$  Pixelgröße auf andere Pixelgrößen mit den Verhältnissen von Pixelgrößen (Seitenlänge) und Pixelflächen verglichen. Die mittlere Reduktion der Punktmenge bei Vergrößerung der Pixelgröße von 20  $\mu\text{m}$  auf 40  $\mu\text{m}$  bzw. von 40  $\mu\text{m}$  auf 60  $\mu\text{m}$  lag zwischen den linearen Verhältnissen der Pixelgrößen und der Pixelflächen.



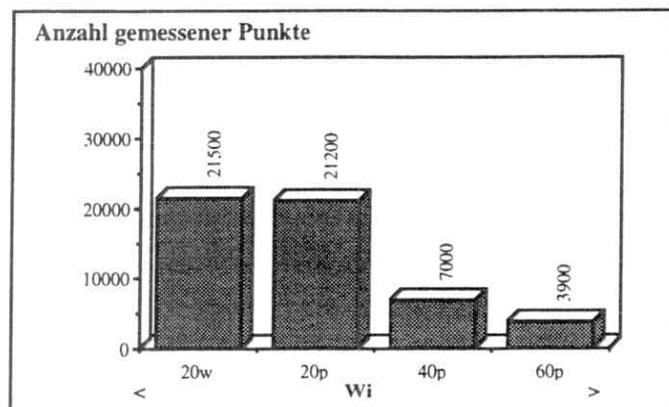
**Abbildung 6.7** Anzahl automatisch gemessener Punkte für die Projekte De1, De2, Aa1, Aa2 und Wi im Überblick.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 6.8** Anzahl gemessener Punkte für (a) Projekte De1, De2, (b) Projekte Aa1, Aa2, (c) Projekt Wi in Abhängigkeit von Pixelgröße und FBM Typ.

Pixelgröße [µm]	Verhältnisse		Punktmengen - Reduktionsverhältnisse			
	Seite	Fläche	De1	Aa1	Wi	Mittelwert
20	1	1	1	1	1	1
40	2	4	2.8	2.6	3.0	2.8
60	3	9	5.7	4.9	5.4	5.3

**Tabelle 6.7** Reduktionsverhältnis der Punktmengen bezogen auf Projekte mit 20 µm Pixelgröße. Im Vergleich dazu die Verhältnisse der Pixelseiten und -flächen.

Der Flächenfaktor beschreibt das Verhältnis der Pixelflächen bei quadratischen Pixelseiten.

Durch die merkmalsgestützte Zuordnung nach der FBM-Methode wurde eine Datenreduktion von der Zahl der Pixel, die ein Geländeelement repräsentieren, auf einen zugeordneten Punkt durchgeführt. Der Reduktionsfaktor bei der FBM Messung, d.h. die Zahl der Pixel im Verhältnis zur Zahl der zugeordneten Punkte der Rohmessungen, ist aus Tabelle 6.8 ersichtlich. Der mittlere Reduktionsfaktor lag bei 56. Dies bedeutete, daß im Durchschnitt in jedem zwischen 7x7 Pixel und 8x8 Pixel großen Geländeelement ein Punkt zugeordnet wurde.

Dies ist eine sehr wichtige Feststellung, daß bereits bei der Zuordnung mit sehr hoher Redundanz gearbeitet wird.

Projekt	Pixelzahl (Pi)	Punktanzahl bei roher FBM-Messung (Pu)	Punktanzahl bei roher FBM-Messung in [% Pi]	Reduktionsfaktor (Pi)/(Pu)
De1 - 20 p	1 700 000	28 300	1.7	60
De2 - 20 p	500 000	9 500	1.9	53
Aa1 - 20 p	770 000	14 200	1.8	54
Aa2 - 20 p	812 500	14 300	1.8	57
Wi - 20 p	1 170 000	21 200	1.8	55

**Tabelle 6.8** Reduktion der Pixelanzahl zur Zahl der gemessenen Punkte bei der rohen FBM Messung, angegeben für alle Teilprojekte '-20p'.

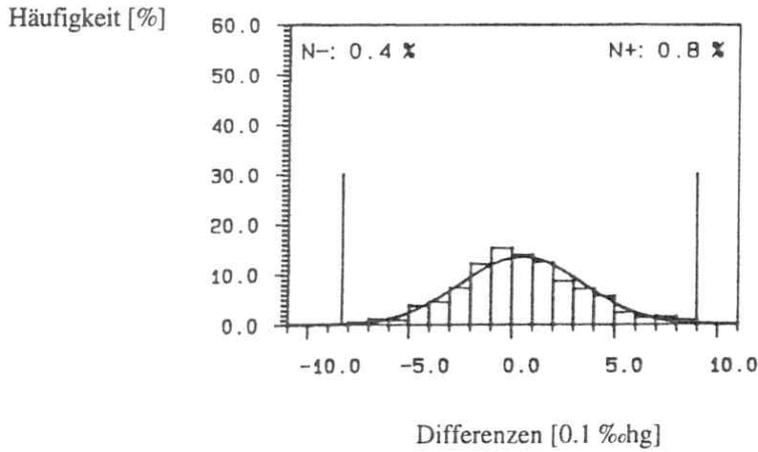
#### 6.4.2 Ergebnisse eines Teilprojekts - Methodische Zusammenstellung

Im folgenden werden einzelne Schritte der Berechnungen illustriert, die für die verschiedenen Projekte mit den jeweiligen Parametervariationen durchgeführt wurden. Als Beispiel dient das Projekt Aa1 'Agricultural Area', gemessen mit FBM und LSM Algorithmus mit 20 µm Pixelgröße und FBM-Typ 'p'.

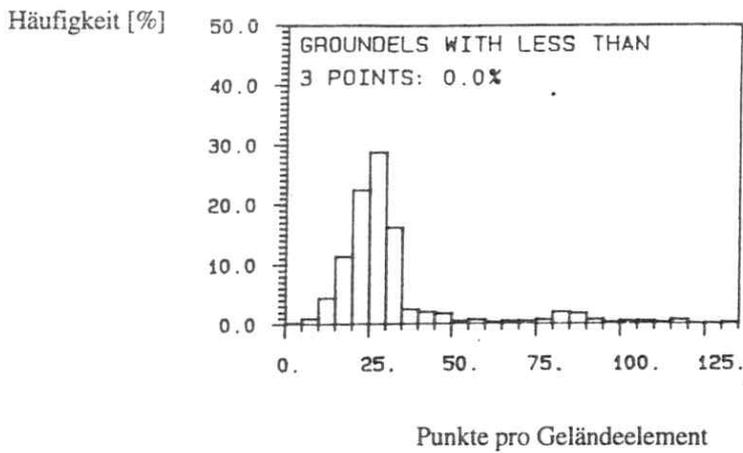
Die Verteilung der Genauigkeit (RMS) der gemessenen Rohdaten nach der FBM Methode (500 manuelle Vergleichsmessungen) ist in Abbildung 6.9 aufgeführt. Die Häufigkeitsverteilung der Differenzen (manuell-automatisch) ist gegenüber den Differenzen, die in Einheiten von 0.1 ‰ der Flughöhe angegeben sind, aufgetragen. Überlagert man eine Normalverteilung, so sieht man die gute Annäherung. Rechnet man sich die mittlere Genauigkeit **einer** Messung aus den Differenzen aus, so erhält man ungefähr 0.2 ‰<sub>chg</sub>, womit die Genauigkeit **einer** automatischen Messung damit doch um mindestens den Faktor 2-3 schlechter war als die einer manuellen Messung (0.07 ‰<sub>chg</sub>) in diesem Gebiet (Tabelle 6.5). Allerdings war die Zahl der Ausreißer ('N-'=0.4 ‰ und 'N+'=0.8 ‰) ungefähr um den Faktor 3 höher als bei der Normalverteilung, wo 0.3 ‰ erwartet wird. Die Schwellwerte T<sub>max,min</sub> (6-4) sind im Histogramm markiert.

Bei einer getesteten Geländeelementgröße (Gittermasche) von 7x7 m<sup>2</sup> enthielten ca. 30 ‰ aller Geländeelemente zwischen 25 und 30 Meßpunkte (Abbildung 6.10). Kein Geländeelement enthielt weniger als 3 Punkte, also war meist hohe Redundanz gegeben.

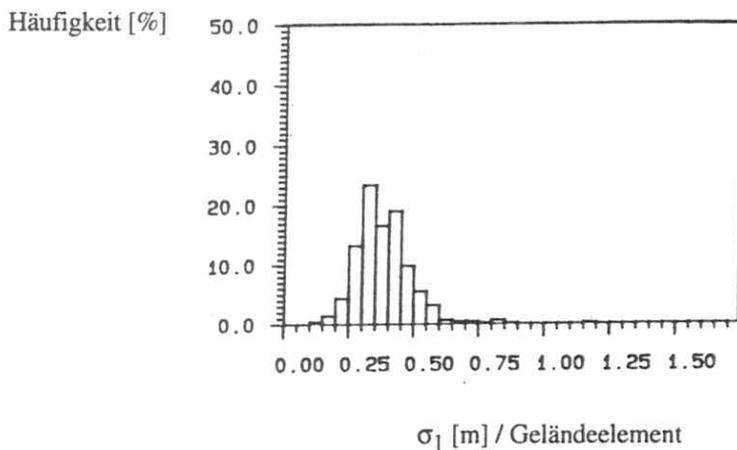
Im Gegensatz zur absoluten Kontrolle zeigte die interne Schätzung der Genauigkeit (6.3.2) eine Verteilung, wie sie in Abbildung 6.11 zu sehen ist.



**Abbildung 6.9** Genauigkeit der gemessenen FBM Rohdaten  
Bias = 0.05 %chg      RMS = 0.29 %chg



**Abbildung 6.10** Verteilung der Punktzahl pro Grundelement  
Geländeelementgröße 7x7 m<sup>2</sup>

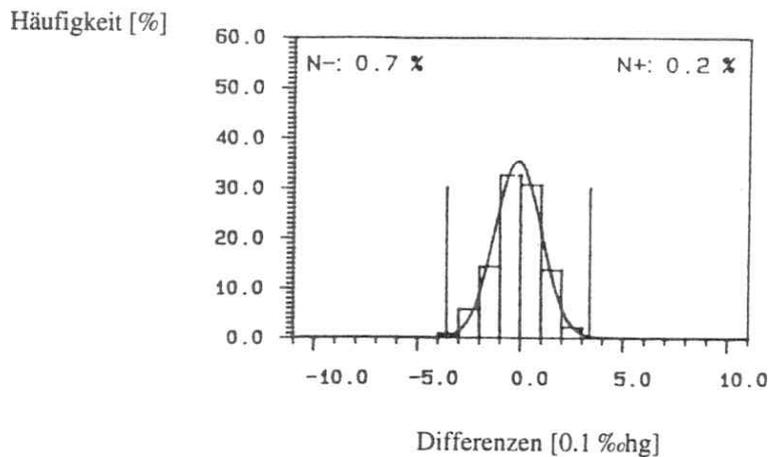


**Abbildung 6.11** Verteilung der intern geschätzten Standardabweichung ( $\sigma_1$ ) pro Geländeelement

In mehr als 3/4 aller Geländeelemente lag die intern geschätzte Genauigkeit  $\sigma_1$  im Bereich von 0.25-0.50 m. Einzelne Gittermaschen lieferten jedoch Schätzungen mit Werten von über 1.0 m. Der Mittelwert über alle Schätzungen (0.37 m) stimmte in diesem Fall hervorragend mit dem Wert (0.36 m) aus der manuellen Kontrolle überein.

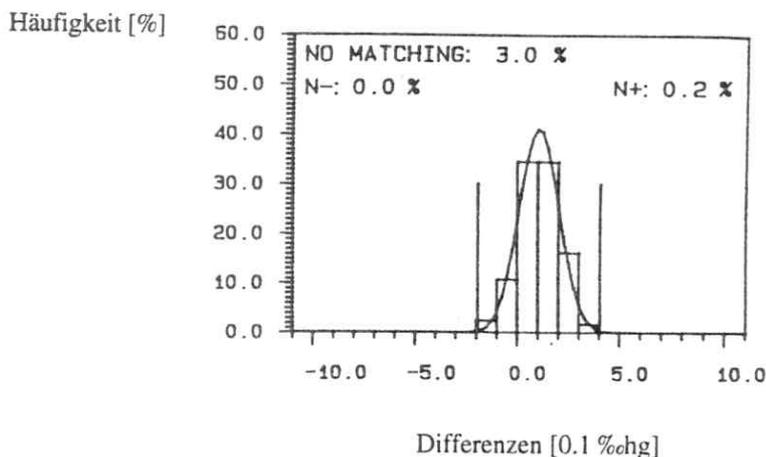
Betrachtet man die reduzierten FBM-Daten, so erhält man für diesen Fall die Differenzen, deren Häufigkeit in Abbildung 6.12 dargestellt ist. Durch Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 6.9, der Verteilung der Differenzen der Rohdaten, läßt sich sehr deutlich die Genauigkeitssteigerung durch die Filterung ablesen. Der RMS-Wert der Differenzen lag nun bei 0.114 ‰ohg und war damit um ca. den Faktor 2.5 besser als der RMS-Wert der Differenzen bei den FBM-Rohmessungen (0.29 ‰ohg).

Die reduzierten FBM-Daten, also die repräsentativen Geländepunkte, dienten als Näherungspositionen für die Feinzuordnung (LSM), die mit Hilfe der Abbildung 6.13 zu beurteilen ist. Es ist eine geringe Genauigkeitssteigerung der LSM-Daten (RMS=0.098 ‰ohg) gegenüber den reduzierten FBM-Daten (RMS=0.114 ‰ohg) zu erkennen.



**Abbildung 6.12** Genauigkeit der reduzierten FBM Daten

Bias = -0.01 ‰ohg      RMS = 0.11 ‰ohg



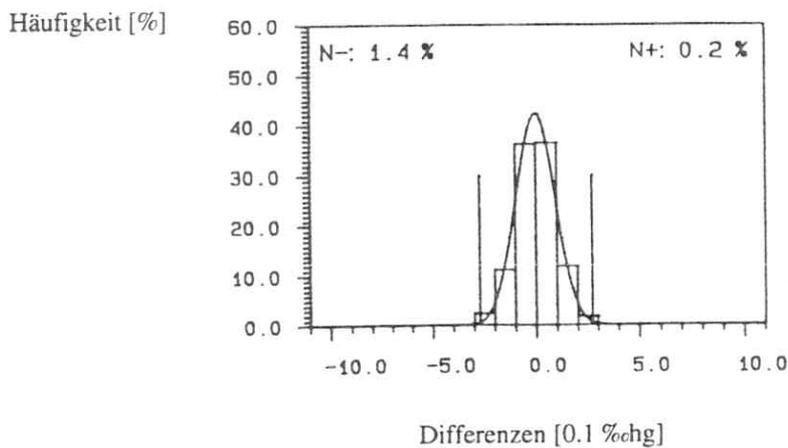
**Abbildung 6.13** Genauigkeit der gemessenen LSM Daten

Bias = 0.1 ‰ohg      RMS = 0.098 ‰ohg

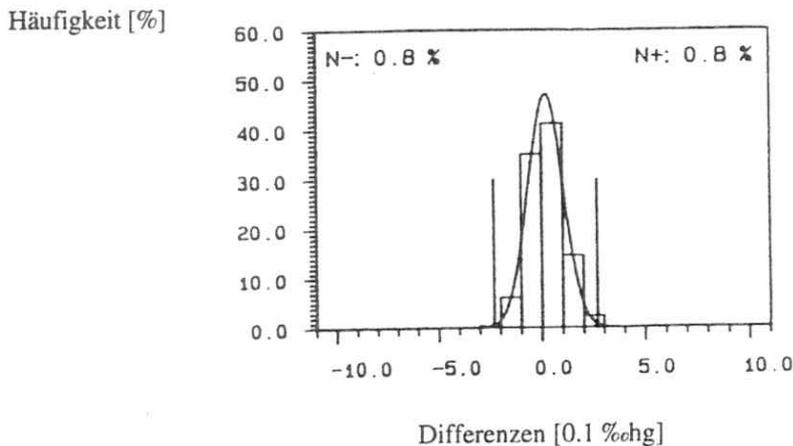
Zu beachten ist, daß die gewählten Fenstergröße für die Selektion von geeigneten Punkten nach der FBM Methode mit (3x5 Pixel) deutlich kleiner war als die Fenstergröße für die Feinzuordnung. D.h. bei ausgewählten Punkten konnten in dem größeren Fenster der LSM Zuordnung 3D-Störungen, wie einzelne Bäume oder Häuser, oder Bildstörungen, wie Staub und Kratzer, auftreten, die die Feinzuordnung verschlechtern oder unmöglich machten. Dies zeigte sich auch im

Bias Wert der mit 0.1 ‰ sehr hoch war. In diesem Beispiel wurden, wie im Histogramm vermerkt, 3 % oder 12 von 400 Punkten nicht zugeordnet. Dies beruhte auch z.T. auf den niedrigen Schwellwerten, die auf die bei der Feinzuordnung ermittelten Qualitätsmaße angesetzt werden, um Ausreißer und schwache Zuordnungen zu eliminieren.

Zur abschließenden Beurteilung der Genauigkeit der digitalen Höhenmodelle sind in Abbildungen 6.14 und 6.15 die Histogramme der Höhendifferenzen an Gitterpunkten des manuell und der automatisch erfaßten Höhenmodelle aufgetragen. Überraschend hierbei war die nahezu gleiche Qualität der automatisch gemessenen Höhenmodelle. Die RMS-Werte der Differenzen lagen bei 0.089 ‰ für das FBM-DHM und bei 0.081 ‰ für das LSM-DHM. Damit **bestätigt sich die Philosophie**, wonach viele weniger genaue Punkte praktisch zum selben Ergebnis führen wie wenige hochgenaue Punkte. **Die Genauigkeit ist absolut gesehen sehr hoch.** Berechnete sich die Genauigkeit eines manuellen DHM's nach 6.3.6 in diesem Projekt zu  $\approx 0.05$  ‰, so lag die **absolute Genauigkeit** (ohne den Einfluß der manuellen Messung) des automatischen **FBM-DHM bei 0.07 ‰** und die des **LSM-DHM bei 0.06 ‰**, ein höchst beachtenswertes Resultat.



**Abbildung 6.14** Genauigkeit des FBM-DHM im Vergleich zur manuellen Messung  
Bias = 0.0 ‰      RMS = 0.089 ‰



**Abbildung 6.15** Genauigkeit des LSM-DHM im Vergleich zur manuellen Messung  
Bias = 0.01 ‰      RMS = 0.081 ‰

### 6.4.3 Zahlenmäßige Ergebnisse aller Projekte im Überblick

Nach dem im obigen Abschnitt beschriebenen Muster wurden alle in den folgenden Tabellen 6.9 bis 6.11 ausführlich zusammengestellten Ergebnisse ermittelt. Die weitere Kommentierung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.5.

Tabelle 6.9 enthält die Qualitätsmaße für die rohen FBM-Daten, die reduzierten FBM-Daten und die interne Schätzung der Genauigkeit bei der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte.

Projekt	Fall	FBM-Punkte	FBM - ROHDATEN Differenzen manuell-automatisch n = 500 Vergleiche				FBM - RED. DATEN Differenzen manuell- automatisch			Interne Schätzung der Genauigkeit			
			Bias [m]	RMS [m]	N- [%]	N+ [%]	Bias [m]	RMS [m]	RMS [0.1%ohg]	Geländeel.		Roh. $\sigma_1$ [m]	Red. $\sigma_2$ [m]
										GE [m]	Pkte		
De1	20 w	27 900	-0.03	0.49	1.2	1.6	-0.01	0.20	0.87	15	39.4	0.59	0.19
	20p	28 300	-0.07	0.51	0.4	2.0	-0.01	0.19	0.83	15	40.0	0.54	0.17
	40 p	10 200	-0.31	0.71	2.2	1.8	-0.33	0.29	1.26	30	51.9	0.79	0.22
	60 p	5 000	-0.36	1.07	2.2	2.4	-0.47	0.38	1.65	45	56.6	1.10	0.29
De2	20 p	9 500	-0.41	0.52	1.2	1.4	-0.44	0.18	0.78	15	44.4	0.53	0.16
Aa1	20 w	14 000	0.08	0.40	0.4	1.2	0.08	0.15	1.22	7	31.2	0.44	0.16
	20 p	14 200	0.06	0.36	0.4	0.8	-0.02	0.14	1.14	7	31.5	0.37	0.13
	40 p	5 500	0.12	0.50	1.4	1.0	0.11	0.14	1.14	15	52.3	0.59	0.16
	60 p	2 900	0.09	0.68	1.6	1.4	0.00	0.17	1.38	22	54.1	0.86	0.23
Aa2	20 p	14 300	0.20	0.57	0.8	3.0	0.23	0.22	1.79	7	31.0	0.57	0.20
Wi	20 w	21 500	-0.16	0.37	3.0	1.6	-0.08	0.23	1.50	8	27.9	0.29	0.11
	20 p	21 200	-0.11	0.31	4.2	2.6	-0.02	0.23	1.50	8	27.4	0.27	0.10
	40 p	7 000	-0.26	0.44	4.4	2.0	-0.11	0.29	1.90	16	34.2	0.43	0.15
	60 p	3 900	-0.22	0.60	3.0	2.6	-0.11	0.38	2.48	24	39.5	0.65	0.21
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

**Tabelle 6.9** Gesamtübersicht über die mit der FBM Methode gemessenen FBM-Rohdaten, die reduzierten FBM-Daten und die internen Schätzergebnisse.

Spalten	1	Projekt
	2	Teilprojekt, mit Pixelgröße in $\mu\text{m}$ und FBM-Typ ('p' oder 'w')
	3	Zahl der gemessenen FBM-Daten (Rohmessungen)
	4	Bias aus Differenzen manuell-automatisch der Rohdaten
	5	RMS aus Differenzen manuell-automatisch der Rohdaten
	6,7	Ausreißer unter (N-) und über (N+) den Schwellwerten (6-4)
	8	Bias aus Differenzen manuell-automatisch der red.Daten
	9,10	RMS aus Differenzen manuell-automatisch der reduzierten Daten (hg=Flughöhe)
	11	Gewählte Geländeelementgröße (GE)
	12	Mittlere Anzahl von Punkten je Geländeelement
	13	Interne Schätzung $\sigma_1$ für die Standardabweichung der Rohdaten
	14	Interne Schätzung $\sigma_2$ für die Standardabweichung der red. Daten

Tabelle 6.10 gibt die Qualitätsmaße der LSM Messung. Zum direkten Vergleich der Genauigkeit sind noch einmal die RMS Werte für die reduzierten FBM-Daten aufgetragen. Tabelle 6.11 enthält schließlich die Qualitätsmaße für die automatisch generierten digitalen Höhenmodelle, das FBM-DHM und das LSM-DHM.

Alle Angaben sind wie bereits oben ausgeführt auf Differenzen zu manuellen Messungen bezogen.

### 6.5 Detailanalyse und Diskussion

In einer Detailanalyse werden die in den Tabellen 6.9-6.11 aufgelisteten Ergebnisse anschaulich dargestellt und kommentiert. Aussagen zu der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von automatischen Messungen und abgeleiteten Höhenmodellen wurden im wesentlichen aus den Teilprojekten De1, Aa1 und Wi (Tabelle 6.2) mit FBM-Typ 'p' (Subpixel Schätzung) getroffen. Sofern erforderlich werden auch andere Fälle herangezogen. Weiterhin wurden untersucht die Einflüsse der Lage im Stereomodell und der Haupttexturrichtung.

Die Erfahrungen aus der Prinzipuntersuchung des Pilotsystems gehen abschließend in Spezifikationen für ein operationell einsetzbares, voll digitales System ein (6.6).

Projekt		LSM - Daten Differenzen manuell-automatisch			FBM Red. Dat.
		Bias	RMS	RMS	RMS
		[m]	[m]	[0.1%chg]	[0.1%chg]
De1	20 w	0.00	0.16	0.70	0.87
	20 p	0.10	0.17	0.74	0.83
	40 p	-0.25	0.21	0.91	1.26
	60 p	-0.21	0.31	1.35	1.65
De2	20 p	-0.29	0.16	0.70	0.78
Aa1	20 w	-0.01	0.11	0.89	1.22
	20 p	0.13	0.12	0.98	1.14
	40 p	0.13	0.11	0.89	1.14
	60 p	0.13	0.12	0.98	1.38
Aa2	20 p	0.20	0.21	1.71	1.79
Wi	20 w	-0.06	0.17	1.11	1.50
	20 p	-0.10	0.18	1.18	1.50
	40 p	-0.07	0.24	1.57	1.90
	60 p	-0.01	0.30	1.96	2.48
1	2	3	4	5	6

**Tabelle 6.10** Gesamtübersicht über die mit der LSM Methode gemessenen LSM-Daten, und zum Vergleich der Genauigkeit die RMS Werte der reduzierte FBM Daten.

- Spalten 1 Projekt  
 2 Teilprojekt, mit Pixelgröße in µm und FBM-Typ ('p' oder 'w')  
 3 Bias aus Differenzen manuell-automatisch der LSM-Daten  
 4,5 RMS aus Differenzen manuell-automatisch der LSM-Daten  
 6 RMS aus Differenzen manuell-automatisch der reduzierten FBM-Daten

Projekt	FBM-DHM						LSM-DHM						
	Differenzen manuell-automatisch						Differenzen manuell-automatisch						
	Bias	RMS	RMS	M-	M+	M	Bias	RMS	RMS	M-	M+	M	
	[m]	[m]	[0.1%chg]	[%]	[%]	[%]	[m]	[m]	[0.1%chg]	[%]	[%]	[%]	
De1	20 w	-0.18	0.23	1.00	1.1	1.7	2.8	-0.08	0.22	0.96	1.7	1.9	3.6
	20 p	-0.20	0.22	0.96	1.1	1.3	2.4	-0.12	0.22	0.96	1.4	1.4	2.8
	40 p	-0.33	0.33	1.44	-	-	-	-0.25	0.39	1.70	-	-	-
	60 p	-0.49	0.45	1.96	-	-	-	-0.22	0.47	2.04	-	-	-
De2	20 p	-0.42	0.14	0.61	1.4	0.1	1.5	-0.29	0.14	0.61	2.0	0.3	2.3
Aa1	20 w	0.07	0.10	0.81	1.2	0.6	1.8	-0.01	0.10	0.81	1.0	1.1	2.1
	20 p	0.00	0.11	0.89	3.0	1.2	4.2	0.02	0.10	0.81	1.3	1.3	2.6
	40 p	0.03	0.12	0.98	-	-	-	0.04	0.10	0.81	-	-	-
	60 p	-0.03	0.17	1.38	-	-	-	0.09	0.17	1.38	-	-	-
Aa2	20 p	0.06	0.20	1.63	10.	9.	19.	0.02	0.20	1.63	10.	11.	21.
Wi	20 w	-0.02	0.30	1.96	6.3	4.3	10.6	0.01	0.25	1.63	5.7	3.5	9.2
	20 p	0.08	0.27	1.76	5.3	3.7	9.0	-0.03	0.25	1.63	4.8	3.6	8.4
	40 p	-0.04	0.41	2.68	-	-	-	-0.06	0.34	2.22	-	-	-
	60 p	-0.03	0.58	3.79	-	-	-	-0.03	0.50	3.27	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

**Tabelle 6.11** Gesamtübersicht über die Ergebnisse der Vergleiche des FBM-DHM und des LSM-DHM mit dem manuell gemessenen DHM.

- Spalten
- 1 Projekt
  - 2 Teilprojekt, mit Pixelgröße in[µm und FBM-Typ ('p' oder 'w')
  - 3 Bias aus Differenzen manuell-automatisch des FBM-DHM
  - 4,5 RMS aus Differenzen manuell-automatisch des FBM-DHM
  - 6-8 FBM-DHM Ausreißer unter (M-) und über (M+) den Schwellwerten (6-5). M = (M-) + (M+)
  - 9 Bias aus Differenzen manuell-automatisch des LSM-DHM
  - 10,11 RMS aus Differenzen manuell-automatisch des LSM-DHM
  - 12-14 LSM-DHM Ausreißer unter (M-) und über (M+) den Schwellwerten (6-5). M = (M-) + (M+)

### 6.5.1 Analyse der erreichten Genauigkeit

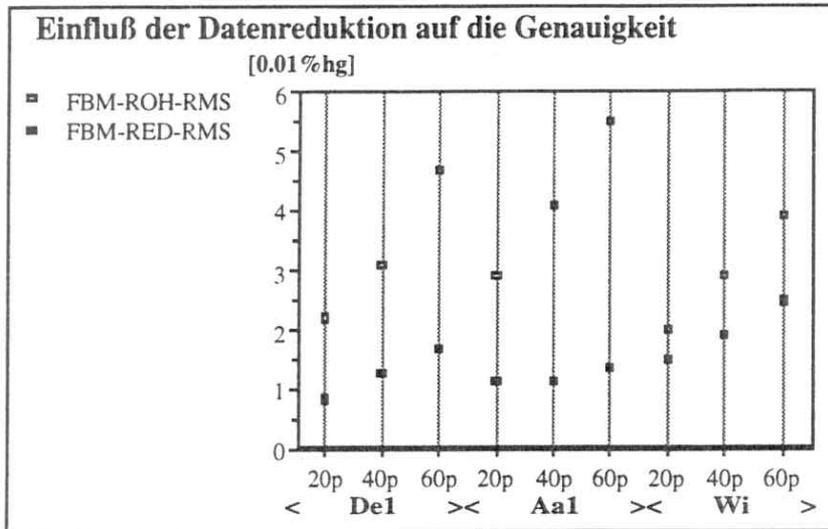
#### Einfluß der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte auf die Genauigkeit

Die Genauigkeit der rohen und reduzierten FBM-Daten spiegelt sich in den angegebenen Standardabweichungen ohne Ausreißer (RMS) für die Höhendifferenzen zu manuellen Messungen wider (Spalten 5, 9 und 10 in Tabelle 6.9).

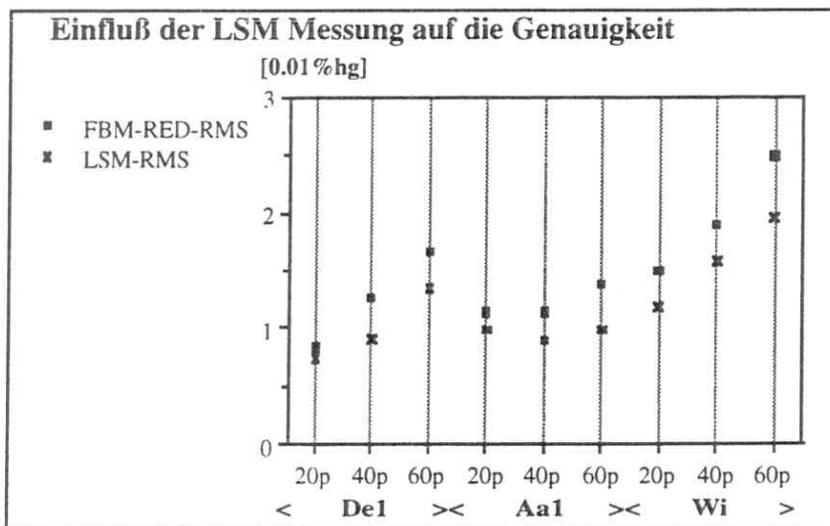
Teilweise steigerte die Reduktion auf repräsentative Geländepunkte (6.3.2) die Genauigkeit der FBM-Daten um bis zu einem Faktor 4. Dies ist aus Abbildung 6.16 ersichtlich, in der die RMS Werte der rohen FBM-Daten (FBM-ROH-RMS) und der reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS) für die Teilprojekte De1, Aa1 und Wi in 0.1 %chg angegeben sind.

#### Einfluß der LSM Messung auf die Genauigkeit

Die Anwendung der LSM Methode im Anschluß an die FBM Messung und die Reduktion auf repräsentative Geländepunkte brachte nur bis zu einem gewissen Grad eine Verbesserung, siehe dazu in Abbildung 6.17 die (FBM-RED-RMS) Werte im Vergleich zu den (LSM-RMS) Werten der LSM Messung. Die Steigerung der Genauigkeit lag zwischen 10 % und maximal 40 %. D.h. die wesentliche Genauigkeitssteigerung bei dem Pilotsystem erfolgte durch die Reduktion der rohen FBM Messungen auf repräsentative Geländepunkte. Es war weiterhin zu beobachten, daß das Verhältnis von (LSM-RMS) zu (FBM-RED-RMS) praktisch unabhängig von der Pixelgröße war.



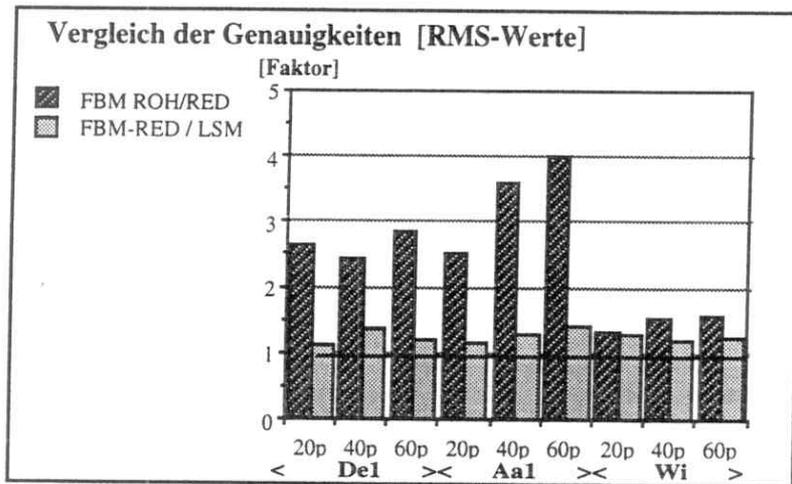
**Abbildung 6.16** Einfluß der Reduktion der rohen FBM Messungen auf repräsentative Geländepunkte auf die Genauigkeit (RMS-Werte). Vergleiche dazu die RMS-Werte der rohen FBM Messungen (FBM-ROH-RMS) mit denen der reduzierten FBM Messungen (FBM-RED-RMS) in allen Projekten.  
hg: Flughöhe [0.01%hg] = [0.1%chg]



**Abbildung 6.17** Einfluß der LSM Messungen auf die Genauigkeit (RMS). Vergleiche dazu die RMS-Werte der reduzierten FBM Messungen (FBM-RED-RMS) mit denen der LSM Messungen (LSM-RMS) in allen Projekten.  
hg: Flughöhe [0.01%hg] = [0.1%chg]

Dies wird auch sehr deutlich im direkten Vergleich der Genauigkeiten zwischen rohen und reduzierten FBM-Daten in den Projekten De1 und Aa1 einerseits und den reduzierten FBM-Daten und den LSM-Daten andererseits. Dies ist in Abbildung 6.18 dargestellt, dabei bedeutet der Faktor 1 keine Veränderung bzw. das Genauigkeitsverhältnis 1:1 der RMS Werte.

In den Projekten De1 und Aa1 war das Verhältnis (FBM ROH/RED) zwischen 2.5 und 4. LSM brachte eine weitere geringe Genauigkeitssteigerung um maximal 40 %. Im Projekt Wi lag die größte Genauigkeitssteigerung noch in der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte, jedoch nur mit einem Faktor 1.5. Da dieses Gelände stark bewegt ist und auch schlechte Bildqualität aufweist, waren die ausgewählten Punkte teilweise zwar repräsentativ für die Messungen, aber der Bezug zum Gelände war gestört. Auch in diesem Projekt brachte eine nachfolgende LSM Messung nochmals eine leichte Steigerung der Genauigkeit.



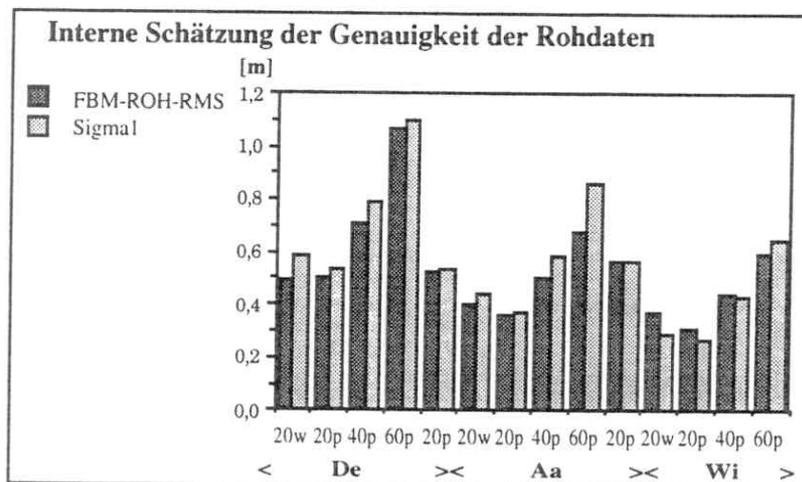
**Abbildung 6.18** Verhältnisse der Genauigkeiten (RMS-Werte) von FBM rohen und reduzierten Messungen (FBM ROH/RED) und von FBM reduzierten Messungen und LSM Messungen (FBM RED/LSM). Faktor 1 ist markiert und bedeutet keine Veränderung, also ein Verhältnis 1:1.

**Interne Schätzungen der Genauigkeit bei der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte**

Die Genauigkeiten der rohen und der reduzierten FBM Messungen konnten durch die intern geschätzte Genauigkeit bei der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte sehr gut approximiert werden. Die robuste Standardabweichung  $\sigma_1$  (6.3.2) ist, wie in Abbildung 6.19 ersichtlich, vortrefflich zur Schätzung der Genauigkeit der rohen FBM-Meßdaten geeignet. Die Werte von  $\sigma_1$  wichen in alle Projekten nur wenig von dem extern ermittelten Maß (FBM-ROH-RMS) aus den Differenzen zu manuellen Messungen ab.

Für die Schätzung der Genauigkeit der reduzierten FBM-Daten (RMS-Werte) eignete sich das Maß  $\sigma_2$  (6-6) sehr gut bei den Projekten De1 und Aa1, es war allerdings im Projekt „Wilderness“ noch um den Faktor 2 zu optimistisch. Vergleiche dazu in Abbildung 6.20 jeweils die Werte (Sigma2) mit den Werten (FBM-ROH-RMS). Da der Korrekturfaktor  $F=2$  nur aus stichprobenartigen Messungen in den Projekten De1 und Aa1 ermittelt wurde, hätte eine Erweiterung der Stichprobe auf das Projekt Wi sicherlich zu einem noch repräsentativeren Faktor  $F$  geführt.

Unabhängig davon stehen hiermit zwei durchaus geeignete Maße zur **automatischen, datengesteuerten Schätzung der Genauigkeit** der rohen und reduzierten Meßdaten zur Verfügung. Dies ist ein sehr wichtiger Aspekt hinsichtlich der automatischen Erkennung von Ausreißern.



**Abbildung 6.19** Interne Schätzung der Genauigkeit der FBM Roh-Messungen (FBM-ROH-RMS) durch  $\sigma_1$ .

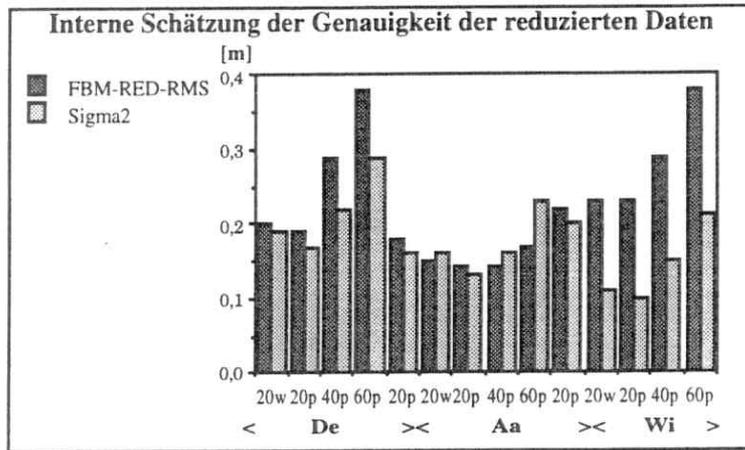
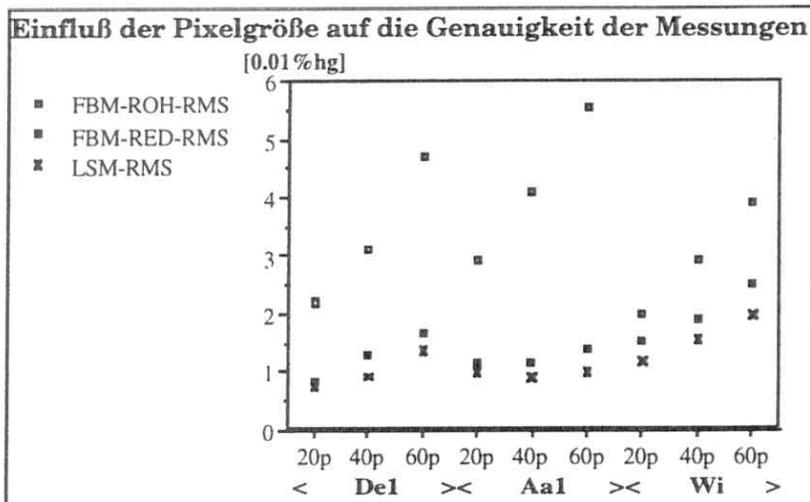


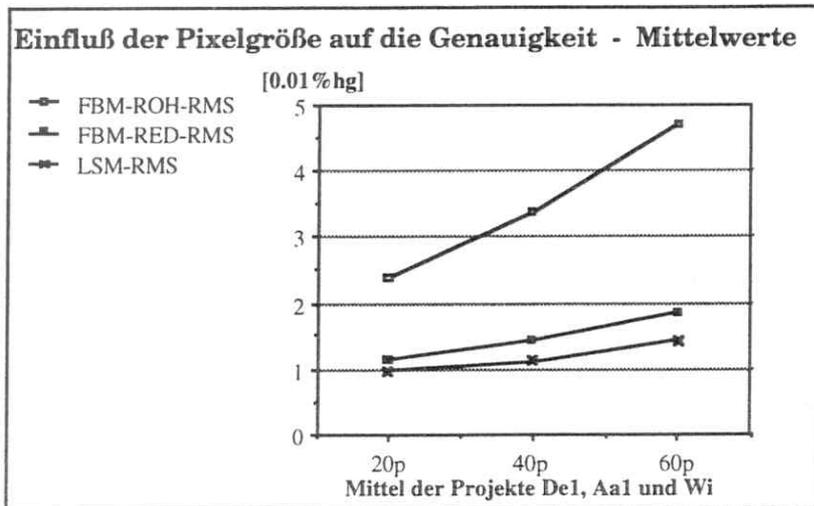
Abbildung 6.20 Interne Schätzung der Genauigkeit der reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS) durch  $\sigma_2$ .

### Einfluß der Pixelgröße auf die Genauigkeit

In jedem Projekt wurden Untersuchungen mit mehreren Pixelgrößen von  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  über  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  bis  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  angestellt. In Abbildung 6.21a ist zu sehen, wie die Genauigkeit der Differenzen der automatischen Messungen zu den manuellen Messungen (RMS-Wert) mit der Pixelgröße abnahm.



(a)



(b)

Abbildung 6.21 Einfluß der Pixelgröße auf die Genauigkeit. (a) für die Projekte De1, Aa1 und Wi getrennt und (b) für die Mittelwerte der jeweiligen Pixelgröße über diese Projekte. (hg: Flughöhe)

Es war in allen Projekten ein deutlicher Anstieg der RMS-Werte (hier in 0.01 %hg = 0.1 %chg) mit zunehmender Pixelgröße zu beobachten, und zwar insbesondere bei den rohen FBM Messungen (FBM-ROH-RMS), aber auch in den reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS) und bei der LSM Messung (LSM-ROH-RMS).

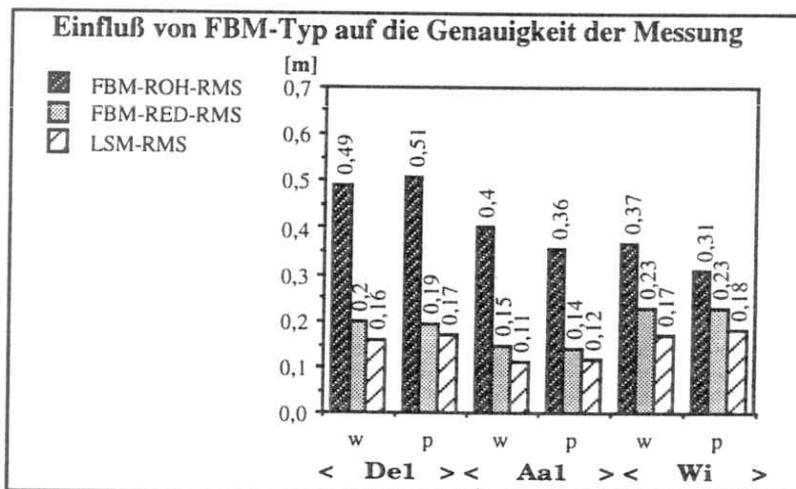
Bildete man das Mittel der RMS-Werte über alle Projekte einer Pixelgröße, so stellte man auch hier fest, daß die RMS-Werte mit zunehmender Pixelgröße anstiegen, wie in Abbildung 6.21b ersichtlich wird. Um einen solchen Vergleich zu ermöglichen, wurden die RMS Werte nicht in m sondern in 0.01 %hg=0.1 %chg angegeben.

**Einfluß der Wahl des FBM-Typ 'w' oder 'p' auf die Meßgenauigkeit**

Wurde anstelle eines optimalen Punktes (FBM-Typ 'p') nur die Fenstermitte (FBM-Typ 'w') bei der FBM Messung gewählt, so waren keine signifikanten Unterschiede in den Genauigkeiten der rohen Meßdaten festzustellen (vergleiche die jeweiligen w/p Paare in Abbildung 6.22. Zusätzlich sind die Genauigkeiten der reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS) angegeben. Die Genauigkeit der LSM Messungen (LSM-RMS) ist zum Vergleich aufgeführt. Es war keine signifikante Abhängigkeit der Genauigkeit von der Wahl des zugeordneten Punktes ('w' oder 'p') bei der FBM Methode festzustellen, selbst nicht bei bewegtem Gelände wie im Projekt Wi. Die Fenstergröße von 3x5 Pixel für den Interestoperator ist sehr klein, so daß keine größeren Veränderungen in der Punktlage und damit auch in der Höhe erwartet werden konnten.

Will man also hohe Genauigkeit in den **Messungen** erhalten, so bedeutet dies, daß keine Subpixelschätzung erforderlich ist, sofern die Messung mit einer Feinzuordnung (z.B. LSM) abgeschlossen wird, da die Ergebnisse mit FBM-Typ 'w' ausreichend genau sind, um als Näherungswerte zu dienen.

In anderen Fällen sollte für höchste Meßpräzision mit FBM Messungen allein eine Subpixelschätzung durchgeführt werden, wobei aber größere Fenster eingesetzt werden müssen, um auf das hohe Genauigkeitsniveau einer LSM Messung zu kommen, dies wurde hier nicht weiter ausgeführt. Anstelle dieses Vorschlags bleibt als weitere, hier verfolgte Alternative die Reduktion der rohen FBM Messungen (nur Typ 'w') auf repräsentative Geländepunkte, womit ebenfalls, wie gesehen, das Genauigkeitsniveau der LSM Messung erreicht werden kann.



**Abbildung 6.22** Einfluß von FBM-Typ (w=Fenstermitte, p= Optimaler Punkt) auf die Genauigkeit (RMS-Werte) der rohen FBM-Daten (FBM-ROH-RMS) und der reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS). Die Ergebnisse der anschließenden LSM Messung (LSM-RMS) sind hier nur zum Vergleich aufgeführt.

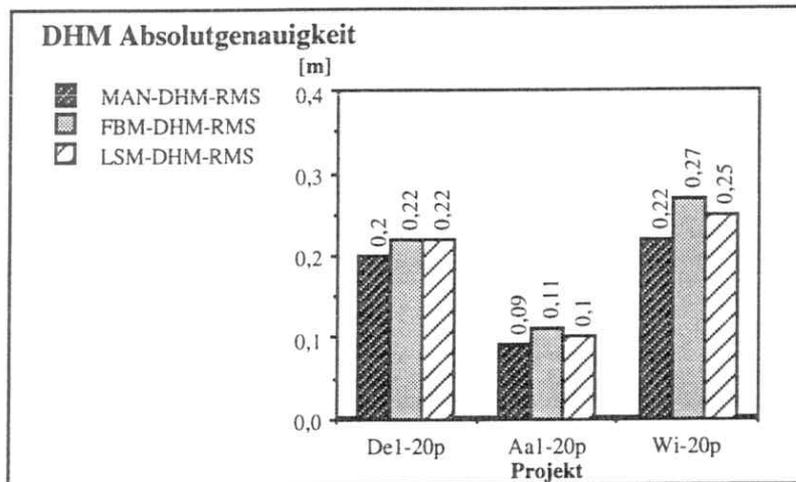
**Genauigkeit der Digitalen Höhenmodelle**

Vergleicht man die Genauigkeit des manuell gemessenen DHM (MAN-DHM-RMS) mit den RMS Werten der automatischen FBM-DHM (FBM-DHM-RMS) und LSM-DHM (LSM-DHM-RMS) so war klar festzustellen, daß beide automatischen Prozeduren in der Lage waren, digitale Höhenmodelle mit der gleichen Genauigkeit wie Operateure zu produzieren. Vergleiche dazu die RMS-Werte in Abbildung 6.23a in m und in Abbildung 6.23b in 0.01 %hg. Zu

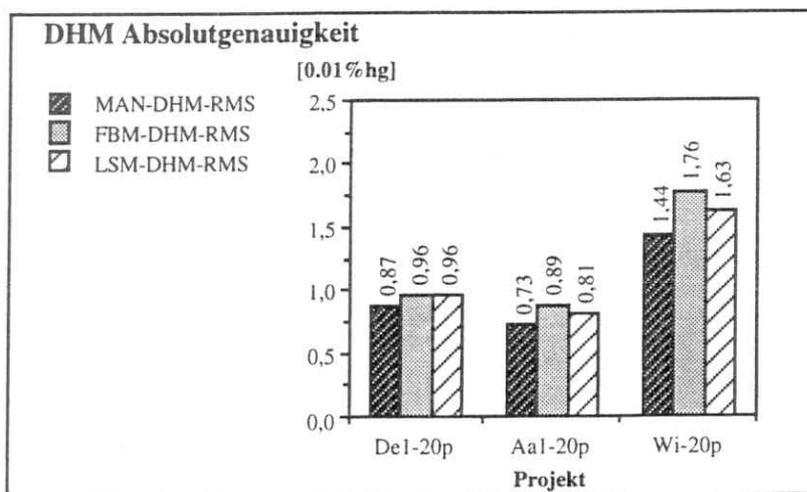
bemerken ist außerdem, daß zumindest für die Projekte „Desert“ und „Agricultural Area“ die RMS Werte deutlich besser waren als 0.1 ‰hg. Für das Projekt „Wilderness“ wird dieser Wert nahezu erreicht.

Die obigen Werte bezogen sich also immer noch auf die Differenzen zu manuellen Messungen. Wurde nun die Genauigkeit eines manuellen DHM (abgeleitet aus Tabelle 6.6) aus diesen Werten herausgerechnet, so ergaben sich als absolute Genauigkeit für ein automatisches DHM Werte zwischen 0.073 ‰hg und 0.144 ‰hg für ein FBM-DHM und zwischen 0.062 ‰hg und 0.127 ‰hg für ein LSM-DHM. Dies sind hochgenaue Ergebnisse, die voll mit manuellen Höhenmodellen konkurrieren können, wo üblicherweise Werte zwischen 0.13 ‰hg und 0.2 ‰hg erwartet werden (Ackermann, 1993). Somit war die essentielle Idee des Konzeptes, die Interpretation des Operateurs durch hochreduzante automatische Messungen zu ersetzen, in den untersuchten Projekten betreffend der Genauigkeit schon äußerst erfolgreich.

Vergleicht man nun abschließend für die drei Projekte De1, Aa1 und Wi und jeweils nur für den Fall 20 µm und FBM-Typ 'p' die Genauigkeiten der Digitalen Höhenmodelle mit denen der Messungen, aus denen sie abgeleitet wurden, so waren, wie in Abbildung 6.24 zu ersehen, zumindest die LSM Messungen bis auf zwei Ausnahmen (Aa1-20p, -40p) doch deutlich besser als die daraus abgeleiteten LSM Höhenmodelle. D.h. das Verhältnis der RMS Werte (LSM/LSM-DHM) lag dabei deutlich unter 1.0. Wohingegen die Genauigkeiten der reduzierten FBM Messungen eher im Bereich der Genauigkeiten der FBM Höhenmodelle lagen, d.h. das Verhältnis der RMS Werte (FBM RED/DHM) war näher bei 1.0.



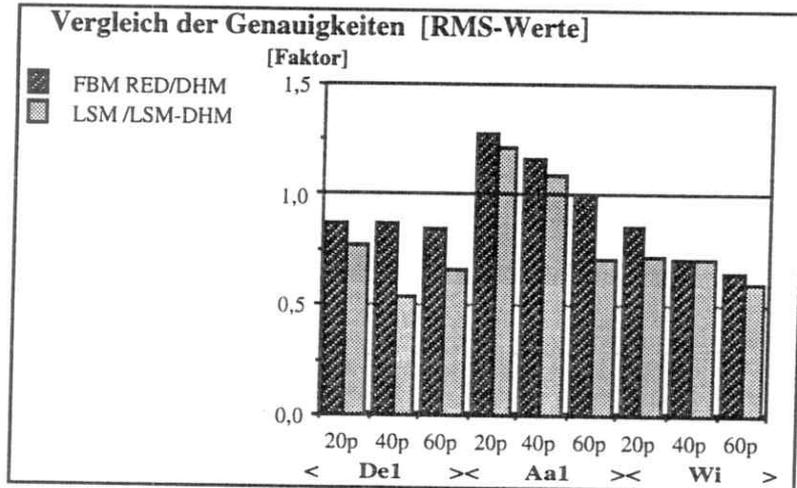
(a)



(b)

**Abbildung 6.23** DHM Absolutgenauigkeiten (RMS-Werte von Differenzen!) für die drei Projekte De1-, Aa1- und Wi-20p (a) in m und (b) in 0.1 ‰hg. Die RMS Werte für das manuelle DHM (MAN-DHM-RMS) sind aus manuellen Doppelmessungen abgeleitet. Die RMS Werte für das FBM-DHM (FBM-DHM-RMS) und das LSM-DHM (LSM-DHM-RMS) sind aus den Differenzen zu einem manuellen DHM abgeleitet.

Insgesamt gesehen war nur ein Unterschied bis maximal ca. 10 % zwischen FBM-DHM und LSM-DHM festzustellen. Dies bedeutet, daß die Geländerepräsentation eindeutig über die Meßgenauigkeit dominiert und auch bereits das FBM-DHM für viele Anwendungen geeignet ist, sofern der Reduktionsprozeß der rohen FBM Messungen auf repräsentative Geländepunkte so beibehalten wird, also die reduzierten FBM-Daten in die FBM-DHM Berechnung eingehen. Diese Aussage war bereits aus den Vergleichen der Messungen (Abbildung 6.18) zu erwarten.



**Abbildung 6.24** Verhältnisse der Genauigkeiten (RMS-Werte) einerseits von reduzierten FBM Daten und FBM DHM (FBM RED/DHM) und andererseits von LSM Messungen und dem daraus abgeleiteten DHM (LSM /LSM-DHM) für die Projekte De1, Aa1 und Wi, für unterschiedliche Pixelgrößen, 20 µm, 40 µm, 60 µm und für FBM-Typ 'p' (optimaler Punkt).

### 6.5.2 Analyse der erreichten Zuverlässigkeit

Als Kriterium für die **Zuverlässigkeit** und **Anwendbarkeit** des Pilotsystems und des Konzeptes wurden erstens die Vollständigkeit der Abdeckung der Oberfläche und zweitens Ausfälle in den Zuordnungen betrachtet. Von Interesse hinsichtlich der Messung selbst war auch die Zahl der Ausreißer, die im Vergleich mit manuellen Messungen stichprobenhaft ermittelt wurde. Lagen wenige Ausreißer vor, so deutete dies auf eine hohe Zuverlässigkeit der Messung hin. Das eigentliche Qualitätsurteil war letztlich im Vergleich der abgeleiteten Höhenmodelle mit dem manuellen DHM zu erhalten. Auch hier wurde als Maß für Zuverlässigkeit die Zahl der Ausreißer betrachtet. Von untergeordnetem Interesse waren schließlich die Einflüsse der Pixelgröße sowie des FBM-Typs auf die Zuverlässigkeit.

#### Ausfälle, Vollständigkeit

Die Zahl der Ausfälle (in %) bei der FBM und LSM Messung, sowie ihre möglichen Ursachen, wie z.B. Kontrastarmut oder 3D-Störungen, sind in Tabelle 6.12 zusammengefaßt. Die möglichen Ursachen wurden durch den Operateur angegeben, der den Gang der automatischen Messungen verfolgt hatte.

Im Mittel ergaben sich bei der FBM Messung Ausfälle von ca. 0.4 % und bei der LSM Messung von ca. 2.0 %, also durchaus noch vorerst akzeptable Werte. Im wesentlichen beruhen sie auf schwacher Textur bzw. kontrastarmen Stellen im Bild. Hinsichtlich der Vollständigkeit der Abdeckung ist ein sehr gutes Ergebnis festzustellen. Allein im Gebiet Wi treten vereinzelte inselartige Lücken auf, ansonsten sind alle Projektgebiete **komplett erfaßt** worden.

#### Ausreißer in den rohen FBM Messungen

Die Zahl der Ausreißer (N+, N-) in den Differenzen der rohen FBM Messungen zu den manuellen Messungen wurde aus dem Vergleich einer zufällig festgelegten Teilmenge von ca. 500 Differenzen mit den Schwellwerten  $T_{max,min}$  (6.3.1) ermittelt. Die Werte für N+ (Ausreißer  $> T_{max}$ ) und N- (Ausreißer  $< T_{min}$ ) sind in den Spalten 6,7 der Tabelle 6.9 aufgeführt. In Abbildung 6.25 sind diese Werte graphisch dargestellt. Die Zahl der Ausreißer lag mit  $\approx 2\%$  in der

Summe aus N- und N+ relativ hoch, deutlich ist aber die größere, nicht mehr akzeptable Zahl von Ausreißern beim Projekt Wi zu sehen, die in der Summe ≈9 % erreichte. Eine systematische Bevorzugung von N- oder N+ ist nicht zu erkennen.

Projekt		Ausfälle in [%]		Mögliche Ursachen	Vollständigkeit
		FBM	LSM		
De1	20 w	0.2		kontrastschwache Stellen, texturschwache Stellen (weißer Wüstensand, dunkle Flächen)	komplett
	20 p	0.2	5.6		komplett
	40 p	0.0	0.6		komplett
	60 p	0.0	0.0		komplett
De2	20 p	0.2	9.5	kontrastschwache Stellen, texturschwache Stellen (weißer Wüstensand, dunkle Flächen)	komplett
Aa1	20 w	0.7			komplett
	20 p	0.1	6.7		komplett
	40 p	0.0	1.1		komplett
	60 p	0.0	0.0		komplett
Aa2	20 p	1.6	7.6		komplett
Wi	20 w	1.8		Baumkronen, Baumschatten, überhängende Stellen, schwache Textur schlechte Näherungswerte für LSM	≈5-10 größere Lücken
	20 p	1.0	2.4		≈5 größere Lücken
	40 p	0.0	0.9		komplett
	60 p	0.0	0.0		komplett
Mittel		0.4	2.0		

Tabelle 6.12 Zahl und Ursachen von Zuordnungsausfällen bei der FBM- und LSM-Messung.

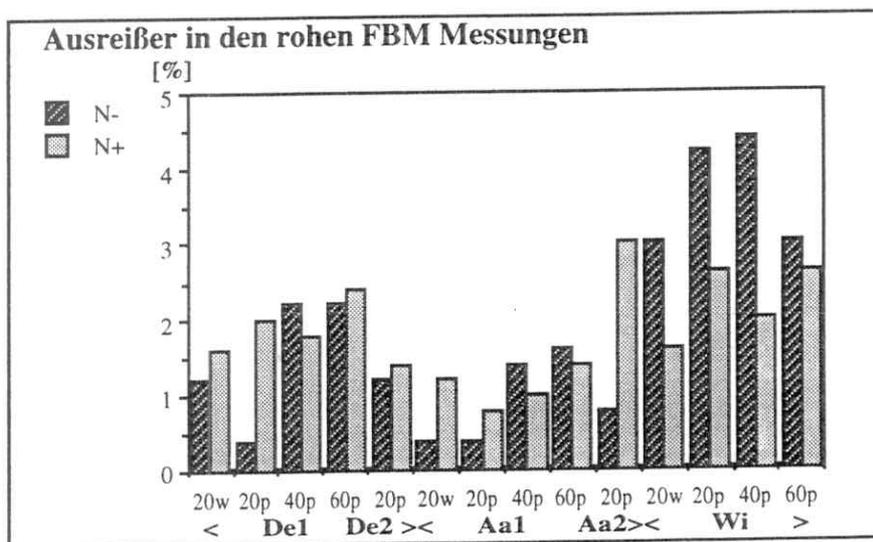
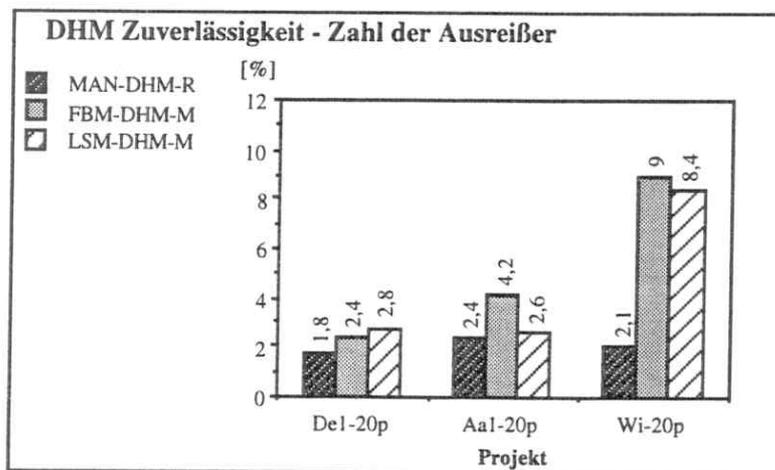


Abbildung 6.25 Zahl der Ausreißer in den Differenzen der rohen FBM Messungen zu manuellen Messungen in %. N- gibt die Zahl der Ausreißer unter dem unteren Schwellwert  $T_{min}$  (siehe 6.3.1) und N+ die Zahl der Ausreißer über dem oberen Schwellwert  $T_{max}$  an.

### Ausreißer in den Digitalen Höhenmodellen

Die Prozentzahl der Ausreißer in den Differenzen zwischen automatischer und manueller Messung für die Höhenmodelle sind in Tabelle 6.11 gegeben. Zu beachten ist, daß hier zur Berechnung der Schwellwerte  $S_{\max, \min}$  nach Formel (6-5) die Genauigkeit der manuellen Messungen herangezogen wurde. Nur die Werte für die kleinste Pixelgröße von 20  $\mu\text{m}$  sind aufgeführt (Korrelationsausfälle wurden bereits vorher beseitigt).

In Abbildung 6.26 sind für die Teilprojekte De1-, Aa1-, Wi-20p die Zahl der Ausreißer für FBM-DHM (FBM-DHM-M) und für das LSM-DHM (LSM-DHM-M) im Vergleich zu den für die manuelle Messung ermittelten Werte (MAN-DHM-R aus Tabelle 6.6) aufgeführt. Es war zumindest bei den Projekten De1 und Aa1 und dem LSM-DHM kein Unterschied zu manuell ermittelten Höhenmodellen festzustellen. Der Prozentsatz der Ausreißer war mit 2 % - 4 % akzeptabel, in Anbetracht der niedrigen Schwellwerte auf Grund der hohen manuellen Meßgenauigkeit. Bei dem Projekt 'Wilderness' fällt jedoch der extrem hohe, nicht akzeptable Prozentsatz von bis zu 10 % Ausreißern auf, der durch die Abweichungen des stark bewegten Geländes von dem angenommenen Modell der geneigten Ebene zu erklären ist.



**Abbildung 6.26** DHM Zuverlässigkeit angegeben in der Zahl der Ausreißer in %. Ausreißer sind aufgeführt für die Differenzen der manuellen Höhenmodelle (MAN-DHM-R), für die Differenzen des FBM-DHM zu einem manuellen DHM (FBM-DHM-M) und für die Differenzen des LSM-DHM zu einem manuellen DHM (LSM-DHM-M).

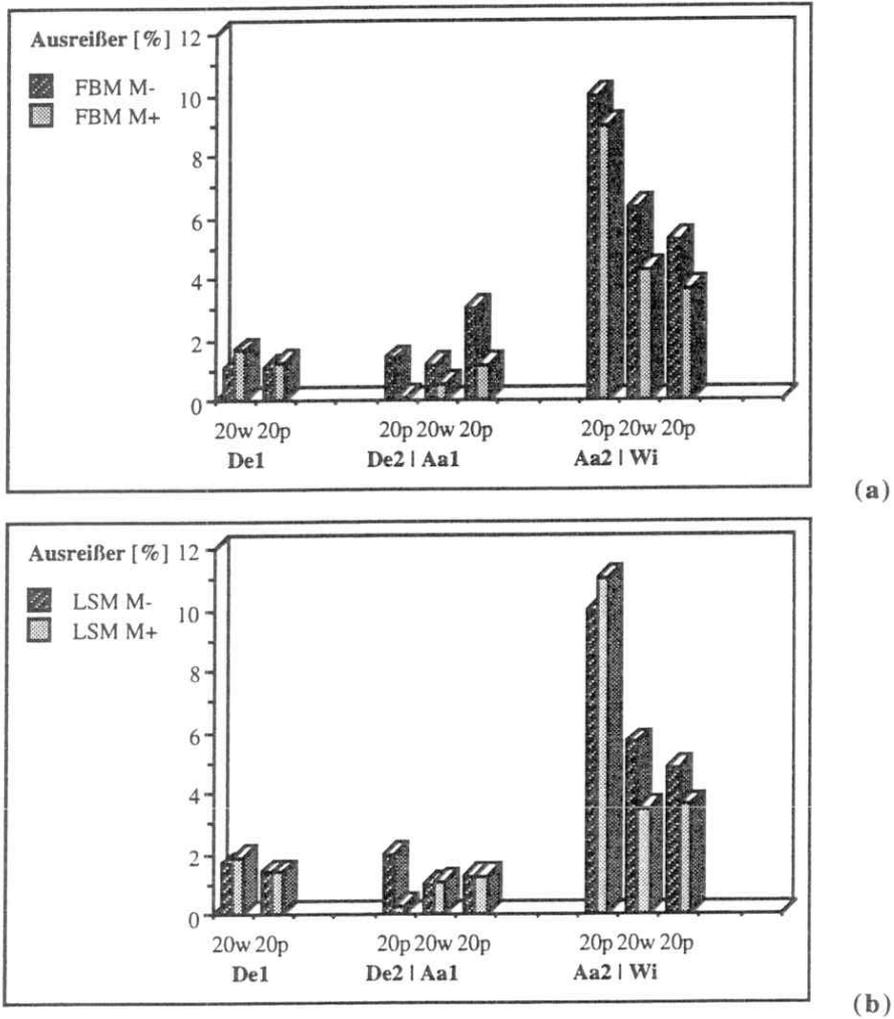
Die Schwellwerte für das MAN-DHM wurden intern ermittelt (siehe 6.3.6).

Betrachtet man die Zahl der Ausreißer getrennt nach Vorzeichen, wie in Abbildung 6.27 ersichtlich, so war bei einigen Projekten ein etwas höherer Anteil von Ausreißern (FBM M-) unterhalb des unteren Schwellwertes  $S_{\min}$  (6-5) festzustellen. Von einer Systematik kann dabei allerdings noch nicht gesprochen werden. Die Zahl der Ausreißer im Teilprojekt Aa2 ist extrem hoch, dies wird im folgenden unter 6.5.4 behandelt, da hier offensichtlich die Texturrichtung eine wesentliche Rolle spielt.

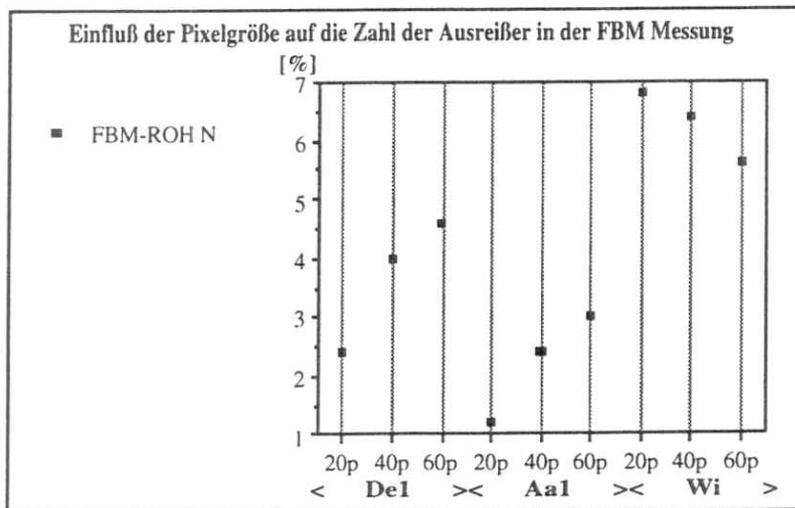
### Einfluß der Pixelgröße auf die Zahl der Ausreißer in der Messung

Der Einfluß der Pixelgröße auf die Zahl der Ausreißer in der Messung wurde nur für die Messung der FBM-Rohdaten untersucht. Die Zahl der Ausreißer ( $N = N^- + N^+$ ) wurde durch Vergleich der Differenzen der FBM-Messungen und manuellen Messungen zu den intern ermittelten Schwellwerten  $T_{\max, \min}$  (6.3.1) errechnet.

In Abbildung 6.28 sind die Ergebnisse für alle Projekte aufgeführt. In den Projekten 'De1' und 'Aa1' stieg die Zahl der Ausreißer deutlich mit der Pixelgröße an, mit größeren (FBM-ROH N) Werten. Im Projekt 'Wi' war der umgekehrte Effekt zu beobachten, wobei zusätzlich die Anzahl sehr hoch war. Inwieweit hier die Unterschiede zwischen den Teilprojekten im Geländetyp oder in der Meßgenauigkeit eine Rolle spielen, ist nicht zu klären. Da jedoch die Zahl der Ausreißer in den kleinen Pixelgrößen auch mit niedrigeren Schwellwerten (6.5.1), auf Grund der höheren Genauigkeit, ermittelt wurden als in großen Pixelgrößen, war also die Zahl der großen Ausreißer um so kleiner, je kleiner die Pixelgröße war.



**Abbildung 6.27** Ausreißer in den Differenzen der automatischen Höhenmodelle zu einem manuellen DHM in %. (a) für FBM-DHM und (b) für LSM-DHM. Die FBM M-, M+ Werte und die LSM M-,M+ Werte sind für jedes Teilprojekt mit 20 µm Pixelgröße angegeben. M- gibt die Zahl der Ausreißer unter dem unteren Schwellwert  $S_{min}$  (siehe 6.3.1) und M+ die Zahl der Ausreißer über dem oberen Schwellwert  $S_{max}$  an, die beide auf der manuellen Genauigkeit  $\sigma(\text{manuell})$  beruhen.



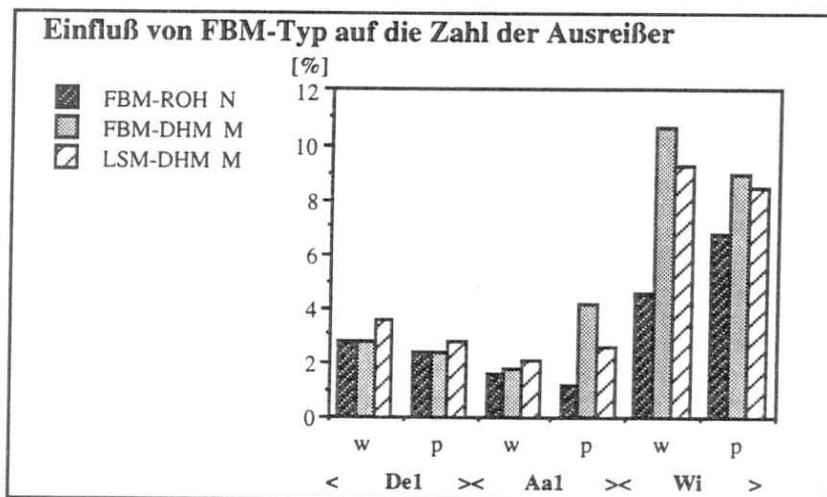
**Abbildung 6.28** Einfluß der Pixelgröße auf die Zahl der Ausreißer (FBM-ROH N) in den Differenzen der FBM Messung zur manuellen Messung. Die Werte sind für alle Projekte aufgeführt.

### Einfluß der Wahl des FBM-Typ 'w' (Fenstermitte) oder 'p' (optimaler Punkt) auf die Zahl der Ausreißer

Wurde anstelle eines optimalen Punktes (FBM-Typ 'p') nur die Fenstermitte (FBM-Typ 'w') bei der FBM Messung gewählt, so waren keine größeren Unterschiede in der Zahl der Ausreißer in den Differenzen festzustellen (vergleiche die jeweiligen w/p Paare in Abbildung 6.29). Die Zahl der Ausreißer in dem LSM-DHM (LSM-DHM M) sind nur zum Vergleich aufgeführt.

Auffallend ist, daß gegenüber der rohen FBM Messung (FBM-ROH N) die Zahl der Ausreißer bei dem FBM-DHM (FBM-DHM M) in einigen Fällen deutlich höher lag, was durch die niedrigeren Schwellwerte bei der Ermittlung der Ausreißer in den Höhenmodellen zu erklären war.

Ein Einfluß des FBM-Typs auf die Zahl der Ausreißer war nicht festzustellen.



**Abbildung 6.29** Einfluß von FBM-Typ 'w' (Fenstermitte) oder 'p' (optimaler Punkt) auf die Zahl der Ausreißer in den Differenzen zu manuellen Messungen für die FBM-Messungen (FBM-ROH N), für das FBM-DHM (FBM-DHM M) und für das LSM-DHM (LSM-DHM M).

### 6.5.3 Einflüsse der Lage im Stereomodell

Die Einflüsse der Lage des Projekts im Stereomodell zeigten sich in den Ergebnissen für das Teilprojekt De1-20p im Modellzentrum und für das Teilprojekt De2-20p am Modellrand. Die **Genauigkeiten** der Höhenmodelle ausgedrückt in RMS-Werten unterschieden sich nur sehr wenig, wie in Abbildung 6.30a zu sehen ist. Wider Erwarten zeigte das Projekt De2, am Rande des Modells gelegen, zudem das eher bessere Ergebnis, d.h. für eine erwartete Verschlechterung des Ergebnisses durch Lage in Nähe des Modellrandes gab es keinerlei Hinweise.

Der Einfluß der Lage im Stereomodell auf die **Zuverlässigkeit** (ausgedrückt in der Zahl der Ausreißer) war vernachlässigbar, nur bei dem FBM-DHM (FBM-DHM M) traten geringe Unterschiede zwischen den beiden Teilprojekten auf (siehe Abbildung 6.30b). Insgesamt ist also für den untersuchten Fall keine Abhängigkeit der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von der Lage im Stereomodell festzustellen.

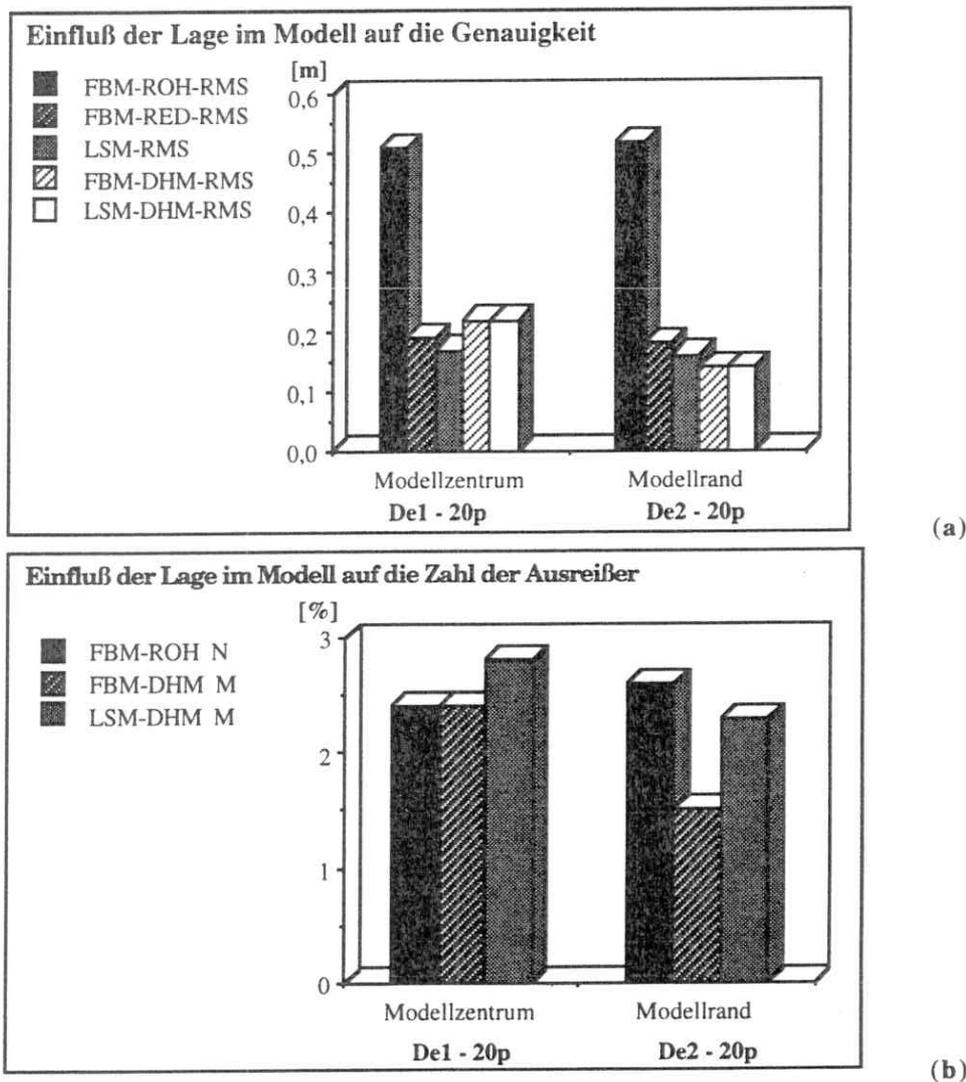
### 6.5.4 Einflüsse der Texturrichtung

Als ein Sonderfall der DHM Erfassung wurde untersucht, welche Bedeutung die Hauptrichtung der Textur auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit hat. Es wurden wiederum die Ergebnisse der Differenzen zu manuellen Messungen betrachtet. Das Projekt Aa2, bei dem die Ackerfurchen parallel zur x-Achse ( $\approx$  parallel zu den Kernlinien) verlaufen, zeigte ein deutlich schlechteres Ergebnis bezüglich der **Genauigkeit** in allen ermittelten Qualitätsmaßen (Abbildung 6.31), und zwar bis zum Faktor 2. Dies galt sowohl für die Messungen als auch für die Digitalen Höhenmodelle.

Auch im Hinblick auf die **Zuverlässigkeit** (Abbildung 6.32) zeigte das Projekt Aa2 gegenüber Projekt Aa1 (Ackerfurchen parallel zur y-Achse, also  $\approx$  orthogonal zu den Kernlinien) das deutlich schlechtere Ergebnis.

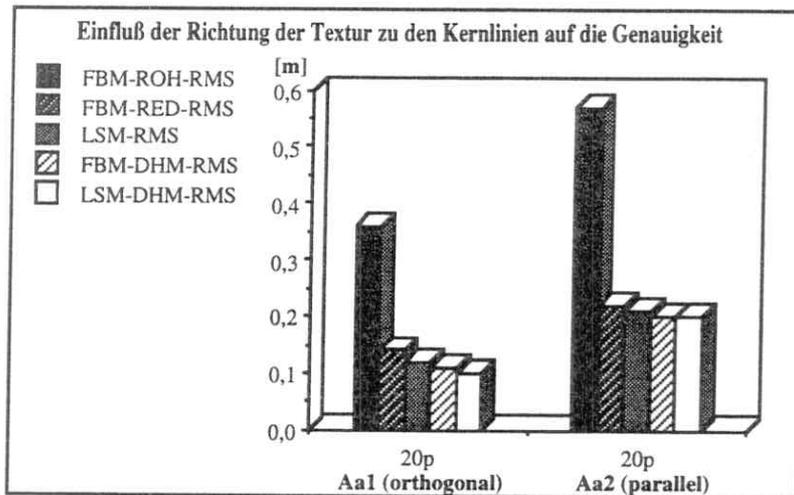
Eine wesentlich höhere Zahl von Ausreißern beim Projekt 'Aa2' gegenüber 'Aa1' kann durch die geringere Genauigkeit der automatischen Messung von nur 0.17 %hg erklärt werden. Wird diese niedrigere Genauigkeit zur Berechnung der Schwellwerte für Ausreißer herangezogen anstelle der hohen manuellen Meßgenauigkeit (0.07 %hg), so wären nur noch 0.9 % der Differenzen zwischen automatischer und manueller Messung als Ausreißer zu betrachten, womit das Ergebnis vergleichbar mit Aa1 würde.

Insgesamt gesehen zeigt also die Erfassung eines Geländes mit der Haupttexturrichtung orthogonal zu den Kernlinien das bessere Ergebnis. Dies war zu erwarten, da sich daraus besser lokalisierbare Kanten bei der Zuordnung im Epipolarbild ergeben und somit die x-Parallaxen besser meßbar sind. Allerdings sollte dieses Resultat nicht überbewertet werden, da es nur auf Sonderfälle der topographischen Geländeerfassung zutrifft.

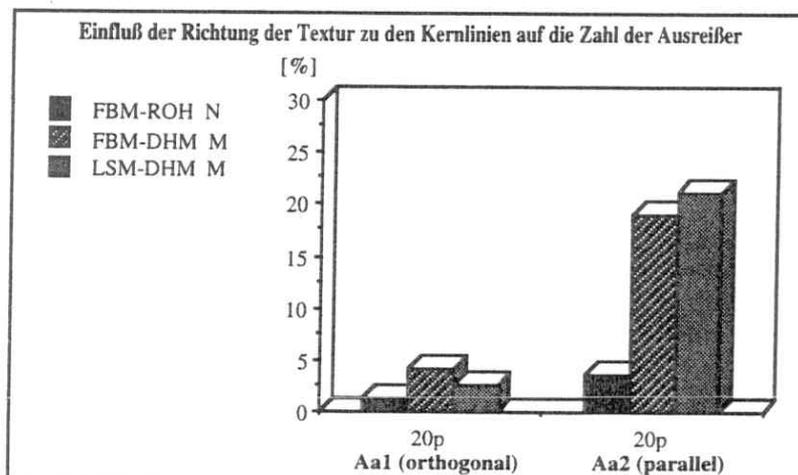


**Abbildung 6.30** Einfluß der Lage im Modell auf (a) die Genauigkeit und (b) die Zuverlässigkeit bzw. Zahl der Ausreißer in den Differenzen zu manuellen Messungen. Das Projekt De1 liegt im Zentrum des Stereomodells, das Projekt De2 liegt am Rand.

Die Genauigkeiten (RMS) sind angegeben für die rohen FBM-Daten (FBM-ROH-RMS), für die reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS), die LSM Messungen (LSM-RMS), das FBM-DHM (FBM-DHM-RMS) und das LSM-DHM (LSM-DHM-RMS). Die Zahl der Ausreißer in den Differenzen zu manuellen Messungen ist angegeben für die rohen FBM Messungen (FBM-ROH N), das FBM-DHM (FBM-DHM M) und das LSM-DHM (LSM-DHM M).



**Abbildung 6.31** Einfluß der Haupttexturrichtung, bezogen auf die Epipolarrichtung, auf die Genauigkeit der Messungen und die daraus abgeleiteten digitalen Höhenmodelle. Bei Projekt Aa1 ist die Hauptrichtung der Textur (Ackerfurchen) orthogonal zu den Epipolarlinien, bei Projekt Aa2 ist sie parallel. Die Genauigkeiten (RMS) sind angegeben für die rohen FBM-Daten (FBM-ROH-RMS), für die reduzierten FBM-Daten (FBM-RED-RMS), die LSM Messungen (LSM-RMS), das FBM-DHM (FBM-DHM-RMS) und das LSM-DHM (LSM-DHM-RMS).



**Abbildung 6.32** Einfluß der Haupttexturrichtung, bezogen auf die Epipolarrichtung, auf die Zahl der Ausreißer in den Messungen und den automatischen Höhenmodellen verglichen mit dem manuell gemessenen DHM. Bei Projekt Aa1 ist die Hauptrichtung der Textur (Ackerfurchen) orthogonal zu den Epipolarlinien, bei Projekt Aa2 ist sie parallel. Die Zahl der Ausreißer in den Differenzen zu manuellen Messungen ist angegeben für die rohen FBM Messungen (FBM-ROH N), das FBM-DHM (FBM-DHM M) und das LSM-DHM (LSM-DHM M).

### 6.5.5 Datenmengen, Geschwindigkeit, Anwendbarkeit

Von den Pixeln im Bild bis zu den Geländepunkten, die in die DHM Berechnung eingingen, war eine enorme Reduktion der Datenmenge zu beobachten.

In Tabelle 6.13 ist erstens die Reduktion der Pixelzahl auf FBM Messungen aufgeführt. Sie lag im Mittel bei einem Faktor 56. Eine weitere Reduktion dieser Punktmenge um den Faktor 35 (im Mittel) wurde durch die Reduktion der rohen FBM Messungen auf repräsentative Geländepunkte erreicht. Im Mittel repräsentierte also jeder Geländepunkt, der in die DHM Berechnung einging, ca. 2 000 Pixel im Bild.

Hier ist deutlich das enorme Potential zu sehen, das durch die großen Punktmenge bei der FBM Messung bereitgestellt wird. Es wurde bisher nur für die Reduktion der FBM Messungen auf repräsentative Geländepunkte ausgenutzt, sollte

aber durchaus auch für weitere Aufgaben, wie die automatische Bruch- und Strukturlinienerkennung, geeignet sein. Damit kann die Erkennung und Elimination auch größerer 3D-Störungen von einer guten Basis aus angegangen werden.

	De1	De2	Aa1	Aa2	Wi	Mittelwert
<b>Reduktionsfaktor durch FBM-Messung</b>	60.1	52.6	54.2	56.8	55.2	55.8
<b>Reduktionsfaktor durch FBM Datenreduktion</b>	40.0	44.4	31.5	31.0	27.4	34.9
<b>Gesamt Reduktionsfaktor</b>	2404.0	2335.0	1707.0	2346.0	15120	2061.0

**Tabelle 6.13** Reduktionsverhältnisse der Pixelmenge zu der Zahl der FBM Messungen, zu der Zahl der reduzierten FBM-Daten, insgesamt für alle Projekte und im Mittel über alle Projekte.

### Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Pilotsystems kann nur in einzelnen Schritten beurteilt werden, da keine on-line Realisierung der Verbindung von FBM- und LSM Messung vorlag. Weiterhin ist zu beachten, daß die Messung an den Rechner des PLANICOMP C100, einen HP1000-A900 gebunden war, der nicht speziell für Bildverarbeitungsaufgaben ausgelegt war. Auch wurde das Fortschalten der Meßfenster durch die mechanische Bewegung der Bildträger beeinflusst. Durch den kleinen Kernspeicher konnten auf effiziente Weise nur kleinere Zuordnungsfenster für die FBM Messung bearbeitet werden. Für die FBM Messung konnte man von ca. 20 Punkten/Sekunde für die reine Zuordnung ausgehen, dabei wurde keine Subpixelschätzung vorgenommen. Die Zeit für Transformationen und das Fortschalten der Meßfenster war mindestens mit dem gleichen Aufwand anzusetzen. Bei der LSM Messung war die Punktleistung, selbst bei Epipolarzuordnung, deutlich geringer und lag bei ca 1-2 Punkten/Sekunde für die reine Zuordnung.

Ein Beispiel in Tabelle 6.14, das einem Teilprojekt in diesem Test ähnlich ist, soll die Zeiten für die Messung weiter verdeutlichen. Insgesamt war mit der gegebenen Hardware von einer Punktleistung von ca. 750 Geländepunkten/Stunde auszugehen, dabei waren Vorbereitung, Nachbearbeitung und DHM Berechnung nicht eingerechnet. Diese Zeit ist für eine Produktion nicht akzeptabel, reichte aber für Untersuchungen dieser Art aus. Der Einsatz eines speziellen Bildverarbeitungsrechners, sowie von Transputern (Hahn, 1991) zeigten bereits vielversprechende Steigerungen der Punktleistung, siehe auch (Krzystek, 1991, Ackermann, 1993).

Schritt	Punkte	Zeit [Sekunden]
Auswahl der Meßfenster		1 500
FBM Messung	30 000	1 500
Datenreduktion		300
LSM Messung	1 000	1 500
Gesamt		4 800

**Tabelle 6.14** Ein fiktives Beispiel zur Darstellung des Zeitaufwandes bei verschiedenen Verarbeitungsschritten mit dem oben beschriebenen Pilotsystem (PLANICOMP C100 + H1000-A900).  
Vorbereitungs- und Nachbearbeitungsphase und die eigentliche DHM Berechnung sind nicht enthalten.

### Anwendbarkeit, Reaktion auf 3D-Störungen

Durch die Graphenstruktur zur Meßsteuerung war das Pilotsystem erwiesenermaßen in der Lage, auf Störungen, seien es nun 3D-Störungen oder kontrastarme Stellen etc., flexibel zu reagieren. Das Pilotsystem konnte kleinere 3D-Störungen sicher erkennen mit Hilfe einer datengesteuerten Erkennung von Ausreißern bei der Messung und bei der Reduktion auf repräsentative Geländepunkte. Die intern geschätzten Qualitätsparameter der Zuordnungen waren in der Lage, Fehlzuordnungen auf Grund schwacher Textur oder 3D-Störungen zu unterdrücken. Die Messung wurde an Problemstellen nicht abgebrochen, sondern an anderer Stelle fortgesetzt. Die Problemgebiete wurden so von anderen

Seiten erneut angegangen. Es hatte sich gezeigt, daß damit in den meisten Fällen eine komplette Erfassung der Oberfläche möglich war. In unlösbaren Fällen wurde der Operateur um Unterstützung ersucht. Diese Strategie hatte sich hier bei diesem Test bestens bewährt. Durch die Ausgabe einer Statistik der Fehlermeldungen und der Zuordnungsausfälle ist die Grundlage geschaffen, um in Zukunft ein lernfähiges System zu errichten, das Erfahrungswerte in Standardparametersätze für die Steuerdaten umwandelt.

Die Automation war abgesehen von Vor- und Nachbearbeitung weit fortgeschritten. Interne Schätzungen der Genauigkeit in den verschiedensten Stufen des Verfahrens erlaubten eine sichere, datengesteuerte Qualitätsbeurteilung. Auch die Wahl einiger Steuerparameter, wie z.B. die Geländeelementgröße konnte weitgehend automatisch erfolgen. Für Fenstergrößen und Schwellwerte bei der Zuordnung haben sich die empirisch ermittelten Erfahrungswerte aus früheren Testmessungen in ähnlichen Gebieten gut bewährt. Allerdings mußte der Operateur weiterhin unter mehreren Parametersätzen den geeigneten auswählen.

## 6.6 Spezifikationen für ein operationelles System

Die Prinzipuntersuchung hat mit einem glänzenden Ergebnis die Anwendbarkeit der digitalen Bildzuordnung für die DHM Generierung mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Pilotsystem bestätigt.

Automatisch gemessene digitale Höhenmodelle nach dem vorgestellten Konzept und mit dem realisierten Pilotsystem erreichen in kleinen und mittleren Bildmaßstäben ohne weiteres die Genauigkeit und Zuverlässigkeit manuell gemessener digitaler Höhenmodelle und liegen **unter 0.1 % in der Absolutgenauigkeit**, womit sie deutlich die konventionelle Genauigkeit übertreffen.

Intern ermittelte, datengesteuerte Maße bei der Reduktion der rohen FBM Messungen in repräsentative Geländepunkte erlauben die Schätzung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von rohen und reduzierten FBM-Daten und ermöglichen damit das Erkennen von Ausreißern in den Messungen, die meist durch kleinere 3D-Störungen hervorgerufen waren.

Ausfälle bei der automatischen Zuordnung waren relativ gering und lagen maximal zwischen 0.4 % und 2.0 % bei FBM und LSM Messung.

Eine Anwendung der LSM Messung nach der Reduktion der FBM-Daten auf repräsentative Geländepunkte brachte im Mittel nur eine Steigerung von 10 % bis in seltenen Fällen 40 %. Die Unterschiede zwischen FBM-DHM und LSM-DHM Genauigkeiten lagen unter 10 %. Dies bedeutet, daß in vielen Fällen die FBM Messung mit evtl. Subpixel-schätzung und anschließender Datenreduktion gleichwertig zur LSM Messung ist und ausreicht, um ein der manuellen Messung vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Die Geschwindigkeit kann damit um ca. 50 % gesteigert werden.

Die Projektgebiete wurden durch das Pilotsystem in den meisten untersuchten Fällen komplett erfaßt.

Mit dieser Untersuchung schließt die Bearbeitung durch den Verfasser. Es wurde ein Pilotsystem zur automatischen DHM Generierung entworfen und experimentell untersucht. Die Ergebnisse bestätigen die Brauchbarkeit und die hohe Genauigkeit.

Aus diesen Erfahrungen läßt sich ein Entwurf für ein **operationell einsetzbares System** spezifizieren. Wichtigste Gesichtspunkte sind:

- Das Prinzip der hohen Punktmengen mit statistischer Analyse funktioniert
- Die Verbindung von Messung und DHM ist vorteilhaft
- Schnelle Rechenzeiten für einen praktischen Einsatz sind mit heutigen Mitteln möglich
- Die Unterschiede in der Genauigkeit zwischen LSM und FBM Methode mit Datenreduktion sind nicht sehr groß.

Die Hauptänderung für ein operationelles System muß in der Loslösung von der Hardware bestehen. Das System muß auf Software aufbauen. Das prädiizierte Voranschreiten der Meßfenster am PLANICOMP und die Näherungswertbestimmung zur Zuordnung muß durch eine hierarchische, **pyramidenartige Meßstruktur** ersetzt werden. Dabei können sowohl die Bilder als auch die Merkmalsbilder hierarchisch aufgebaut werden, vorzugsweise in einander

zugeordneter Struktur. Auch das resultierende DHM kann in pyramidenartiger Struktur erzeugt werden, nun also direkt mit der Messung verbunden, wie es das Konzept in 4.5 vorsah, wie es aber im Pilotsystem nicht zu realisieren war.

Der **Interestoperator** als Teil des FBM Algorithmus bleibt beibehalten. Er übernimmt lokal eine gewisse Interpretationsfunktion, indem er geeignete Punkte zur Zuordnung auswählt. Die Auswahl der Punkte und die Zuordnung erfolgen aus Rechenzeitgründen in den Epipolarbildern, was weiter keine negativen Effekte brachte. Die eigentliche **Zuordnung** erfolgt nach der **FBM Methode**, evtl. mit Subpixelschätzung und mit anschließender Reduktion auf repräsentative Geländepunkte, sofern nicht alle gemessenen Punkte direkt in die damit verbundene DHM Berechnung eingehen. Es hatte sich gezeigt, daß eine nachfolgende LSM Messung keine wesentliche Genauigkeitssteigerung bringt, aber wesentlich aufwendiger ist. Die Bildzuordnung erfolgt von grob nach fein in der Pyramide, im Sinne der Resultate des Tests zur Bildzuordnung (Kapitel 3).

Das Fortschreiten der Messung, die Repräsentation des Geländes unter möglicher Einbeziehung von Bruch- und Strukturlinien, die Sicherstellung der Vollständigkeit und die Überbrückung von texturschwachen Gebieten werden von der **pyramidalen DHM Struktur** übernommen. Aufbauend auf einer Grob- nach Feinmessung wird das DHM in gleicher Weise von grober nach feiner Auflösung erzeugt.

Als geometrisches Modell für das DHM wird ein Finite Elemente Modell verwendet. Innerhalb eines Gitters auf einer Ebene der Messung kann die Punktverteilung dabei beliebig sein. In diesem Modell wird eine robuste Analyse der erhaltenen Objektkoordinaten ausgeführt, um repräsentative Punkte für einen kleinen Geländeoberflächenausschnitt auszuwählen und dabei fehlerhafte Messungen, oder Meßpunkte, die zu 3D-Störungen gehören, zu eliminieren. Dieses Verfahren funktioniert erwiesenermaßen hervorragend.

Durch eine hinreichend kleine Schrittweite von einer Auflösungsstufe zur nächsten wird sichergestellt, daß die gemessenen Daten der einen Stufe als Näherungswerte für die nächst feinere Stufe dienen können. Durch die analoge Strukturierung der Bild-, Merkmals- und DHM-Pyramiden wird eine Parallelisierung des Meßvorgangs erheblich erleichtert.

Zur **Akzeptanzüberprüfung** bietet es sich an, aus dem gemessenen DHM und den Bildern Orthophotos zu berechnen und diese stereoskopisch zu betrachten. Nicht erfaßte Bruchkanten sind dabei leicht zu erkennen. Dieses operationelle System bedarf in diesen Fällen nur geeigneter Betrachtungseinrichtungen.

Es kann ein ähnlich hohes **Genauigkeitspotential** und ähnlich hohe **Zuverlässigkeit** der Messung und des Digitalen Höhenmodells erwartet werden wie im Pilotsystem, da die gleiche Zuordnung und die gleiche Methode der robusten Reduzierung auf repräsentative Geländepunkte verwendet werden.

Hinsichtlich der **Zuverlässigkeit** bleibt zu untersuchen, ob ein Typ von Merkmalen, nämlich interessierende Punkte, letztlich ausreichend ist, oder ob nicht auch linien- und flächenhafte Strukturen hinzugezogen werden sollten. Dies scheint zumindest für den großmaßstäbigen Anwendungsbereich notwendig, wenn künstliche Bauwerke stark in den Vordergrund treten.

**Bruch- und Strukturlinien** ließen sich ohne weiteres in die Finite Element Repräsentation einbauen, sie können aber vorerst implizit in den dichten Massenpunktmessungen enthalten sein. Es erfolgt vorerst keine explizite Erkennung. In diesem Bereich sind einige Arbeiten im Gange, wobei die vielversprechenden auf einer geometrischen Kante im Objekt- oder Parallaxenraum und nicht auf Grauwertkanten in den Bildern aufbauen (Li, M., 1989). Es bleibt zu überprüfen, inwieweit solche Entwicklungen Verbesserungen für die Geländerepräsentation bringen können.

Die Einbeziehung von 3D-Störungen in ein 3D-Geländemodell bzw. ein dazu ergänzendes Objektmodell wird zumindest im großmaßstäbigen Anwendungsbereich letztlich nur durch den Einsatz intelligenter Bildinterpretation befriedigend zu lösen sein.

Inzwischen ist von dritter Seite dieser Entwurf in ein operationelles Verfahren umgesetzt worden (MATCH-T), siehe (Krzystek, 1991, 1992; Ackermann, 1993). Dabei wurden insbesondere die Pyramiden für Bilder, Merkmale und das DHM realisiert. Mit neuer Rechnersituation wurde einerseits die Schnelligkeit drastisch erhöht (z.T. unter 1 Stunde für ein Stereomodell) und andererseits die geäußerten Erwartungen an die Genauigkeit und Brauchbarkeit bestätigt. Somit hat die hier verfolgte Entwicklung bereits ihre Bestätigung erfahren.

## SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Digitale Geländemodelle und ihre Folgeprodukte spielen eine immer größere Rolle für Anwendungen im Bereich der Geowissenschaften. Die Methoden der digitalen Bildverarbeitung bieten weitgehende Möglichkeiten, die photogrammetrische Erfassung eines digitalen Geländemodells bzw. eines digitalen Höhenmodells, DHM, zu automatisieren. Entscheidende Hindernisse sind die 3D-Störungen hinsichtlich einer zu erfassenden Geländeoberfläche, also z.B. Häuser oder Vegetation, die insbesondere in mittleren bis größeren Bildmaßstäben in Erscheinung treten, sowie Bruch- und Strukturlinien des Geländes.

Die Arbeit hatte zum Ziel, die Eignung und die Möglichkeiten der **digitalen Bildzuordnung zur automatischen Generierung von digitalen Geländemodellen** zu untersuchen.

Dazu wurden im ersten Teil dieser Arbeit **theoretische Überlegungen** hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit der digitalen Bildzuordnungsverfahren angestellt. Es wurden allgemein anwendbare, systematische Kriterien zur vergleichenden Klassifikation dieser Verfahren eingeführt. Die Verfahren gliedern sich hauptsächlich in rasterorientierte Zuordnung und in merkmalsgestützte Zuordnung, basierend auf unterschiedlich komplexen Bildmerkmalen. Aus der Analyse eines umfangreichen **empirischen Tests** zur Bildzuordnung an realem Bildmaterial konnten schließlich **Empfehlungen** für den Einsatz bestimmter Zuordnungsverfahren für die Generierung digitaler Geländemodelle unter den wesentlichen Gesichtspunkten von Anwendbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit abgeleitet werden. Es hat sich gezeigt, daß vor allem die Meßstrategie wichtig ist für die praktische Anwendbarkeit. Es gibt mehrere Zuordnungsverfahren, die sehr flexibel auf unterschiedlich komplexes Bildmaterial reagieren können und dabei mit sehr hoher Genauigkeit arbeiten. Die Zahl der Ausreißer in den Messungen ist gering und für praktische Anwendungen akzeptabel. Mit **rasterorientierten Verfahren** zur Feinzuordnung erreicht man auch bei Luftbildmaterial Genauigkeiten in der Parallaxenmessung, die so gut oder sogar besser sind als die stereoskopische Messung des Menschen. Annähernd so gute Genauigkeiten sind auch mit einigen der untersuchten **merkmalsgestützten Verfahren** zu erreichen.

In einem zweiten Teil der Arbeit werden Anforderungen an eine **automatische Erfassung digitaler Geländemodelle** formuliert und in ein **konkretes Konzept** umgesetzt. Dieses Konzept beruht gegenüber der konventionellen photogrammetrischen DHM Erfassung auf einer völlig **neuen Philosophie**, nämlich erstens der schnellen automatischen Messung sehr vieler, u.U. weniger genauen Punkte und einer daran anschließenden statistischen Analyse der redundanten Messungen mit dem Ergebnis sehr genauer und zuverlässiger Geländepunkte und der gleichzeitigen Elimination von 3D-Störungen. Zweitens werden Messung und DHM Generierung nicht mehr getrennt betrachtet, sondern integriert.

Dieses Konzept wurde als **Pilotsystem** für die automatische Generierung digitaler Geländemodelle aus digitalisierten Luftbildern für **kleine und mittlere Bildmaßstäbe** realisiert. Das Pilotsystem arbeitete hierarchisch mit zwei verschiedenen Bildzuordnungsverfahren, der merkmalsgestützten **FBM Zuordnung** und der rasterorientierten **LSM Zuordnung**, und einer speziell ausgearbeiteten **Meßstrategie** zur topographischen Geländeerfassung. Intern geschätzte Qualitätsmaße erlaubten zuverlässige Aussagen über die erreichte absolute Genauigkeit.

Die Tragfähigkeit und Güte des Konzepts wurde anhand der bisher umfangreichsten **empirischen Untersuchung** dieser Art an realem Bildmaterial nachgewiesen. Das Pilotsystem war in der Lage, die in kleinen und mittleren Maßstäben auftretenden **3D-Störungen** durch algorithmische Methoden sicher zu **eliminieren**. Bruch- und Strukturlinien können genügend genau durch die hohe Punktdichte repräsentiert werden. Eine **merkmalsgestützte Zuordnung** vieler Punktmerkmale mit der FBM-Methode war ausreichend, um mit der anschließenden Reduktion der redundanten Messungen auf repräsentative Geländepunkte eine **Genauigkeit** der automatisch generierten **digitalen Höhenmodelle unter 0.1 % der Flughöhe** zu erreichen und nebenbei vom Verfahren her den Anforderungen an Schnelligkeit gerecht zu werden. Die erreichte Genauigkeit ist vergleichbar mit der Genauigkeit sehr guter manuell gemessener Höhenmodelle. Vorarbeiten und Akzeptanzüberprüfung wurden vorerst noch vom Operateur übernommen, die Messung erfolgte automatisch. Die vorgesehene direkte Einbindung der DHM Berechnung in die Messung konnte aus Hardwarebeschränkungen nicht on-line realisiert werden.

Aus den Erfahrungen der Prinzipuntersuchung des Pilotsystems konnten abschließend **Spezifikationen** für ein operationell einsetzbares System zur Generierung von digitalen Geländemodellen mit digitaler Bildzuordnung gegeben werden. Dieser Entwurf ist inzwischen von dritter Seite weitgehend in ein **operationelles System** umgesetzt worden, das die geäußerten hohen Erwartungen an die Genauigkeit, Brauchbarkeit und Schnelligkeit erfüllt. Dieses Programm MATCH-T (Krzystek, 1991, 1992; Ackermann, 1993) ist eine logische Fortentwicklung dieses Pilotsystems und baut auf den damit gemachten Erfahrungen auf.

Es bleibt festzuhalten, daß diese Arbeit bis zu dem Zeitpunkt des Erscheinens den bisher umfassendsten Test zur Bildzuordnung und die umfassendste empirische Untersuchung zur automatischen Erfassung digitaler Höhenmodelle, die nach Kenntnis des Autors mit realem Bildmaterial durchgeführt wurden, beinhaltet.

Selbstverständlich sind an vielen anderen Stellen Arbeiten zur DHM Generierung in der **digitalen Photogrammetrie** im Gange. Der Stand dieser Entwicklungen soll hier kurz umrissen werden, um die Arbeit einzuordnen.

Weisensee gab 1991 einen Überblick über den damaligen Stand der photogrammetrischen Bildzuordnung (Weisensee, 1991), die sehr gezielt auf die kleinste Quadrate Zuordnung und die merkmalsgestützte Zuordnung im Objektraum ausgerichtet war, d.h. eine gemeinsame Lösung des Zuordnungsproblems und der Objektrekonstruktion wurde angestrebt. Diese Entwicklung wurde weiter vertieft, wie sich an der Fülle von Beiträgen zum 17. ISPRS Kongreß in Washington D.C. im August 1992 in diesem Bereich ablesen läßt. Vereinzelt sind bereits auch Ansätze zur merkmalsgestützten Zuordnung mit sehr komplexen Merkmalen zu verzeichnen (z.B. Vosselman, 1991).

Es bleibt sehr zu empfehlen, mit den heutigen Methoden, die vor allem in der Strategie weiter verfeinert worden sind, den **Test zur Bildzuordnung** zu wiederholen und mit neuem Bildmaterial und neuen Aufgaben die Verdeckungen, Diskontinuitäten und 3D-Störungen erneut zu behandeln. Die Photogrammetrie bietet die Möglichkeit, wie gesehen, in vertretbarem Umfang eine Vielzahl von manuellen Vergleichsdaten bereitzustellen. Da allgemein im Fachbereich des Computer Sehens das Fehlen solcher Sollwerte beklagt wird, ist mit breitem Interesse an einer Neuauflage eines Bildzuordnungstests zu rechnen.

Die Erfassung von 3D-Daten im großmaßstäbigen Bereich gewinnt durch die beschleunigte Verbreitung der **Geographischen Informationssysteme** (GIS) und deren enormem Bedarf an aktuellen Daten eine immer größere Bedeutung. Ein automatisch abgeleitetes DHM mit zusätzlicher Orthophotoinformation und Objektinformation bietet eine qualitativ hochstehende Datenbank für ein GIS mit einem enormen Aktualitätsgrad. Dies sind Vorteile, die besonders gegenüber der herkömmlichen Digitalisierung bestehender, zum Teil alter Kartenwerke zum Tragen kommen, die, da kartographisch bearbeitet, geometrisch den Anforderungen häufig nicht genügen.

Bezüglich der automatisch abgeleiteten digitalen Orthophotos mit Hilfe vorhandener Höhenmodelle ist von Produktionsreife zu sprechen (z.B. Baltasvias, 1991; Bähr, 1991). Dies wurde auf dem ISPRS Kongreß in Washington D.C. durch mehrere kommerziell erhältliche Systeme zur praktischen Anwendung unterstrichen.

Die automatische DHM Erfassung wird in der Produktion bisher eigentlich nur im Bereich der Satellitenbildmessung angewandt. Wesentliche Entwicklungen im Bereich der DHM Erfassung aus Luftbildern werden auch z.B. von Charif (Charif, 1988), Heipke (Heipke, 1991) und Norvelle (Norvelle, 1992) berichtet, um nur einige zu nennen. Das Problem der 3D-Störungen wird besonders von (Kölbl, 1990; Krzystek, 1991, 1992; Schenk, 1991) verfolgt. Li (Li, M. 1989) und Zheng (Zheng, 1990) geben erfolversprechende Ansätze für die Behandlung von Diskontinuitäten, wobei das Problem allerdings noch nicht als gelöst gilt. Wie der Washington Kongreß gezeigt hat, gibt es nun doch, neben dem hier vorgestellten Konzept und seinem Nachfolger, einige andere praktisch anwendbare Ansätze zur automatischen DHM Generierung, die zum Teil auch bereits realisiert sind.

Die Extraktion von Kartographischen Objekten aus Luftbildern gewinnt mit zunehmendem Bildmaßstab an Bedeutung und ist vor allem in urbanen Gebieten von Interesse. Als Alternative und Ergänzung zu rein algorithmischen Lösungen bieten sich auch Methoden mit Hilfe wissensbasierter Systeme an. Die Erkennung von Gebäuden und ihre Beschreibung und Lokalisierung (Förstner, 1988; Gülch, 1990, 1991b,c, 1992; McKeown, 1991; Quam, 1991) sind aktuelle Themen in der Forschung.

Die Resultate der Entwicklungen im Bereich der digitalen Photogrammetrie finden ihren Niederschlag in der Entwicklung **digitaler photogrammetrischer Systeme** oder Stationen, als Plattformen für den praktischen Einsatz,

weitgehend losgelöst von konventioneller photogrammetrischer Hardware. Eine automatisierte DHM Erfassung ist dabei ein wichtiges Modul. Mehrere Autoren beschäftigen sich mit dem Design bzw. den Konzepten für solche Stationen (Förstner, 1990; Helava, 1988b; Sarjakoski, 1990; Schenk, 1992). Dowman (Dowman, 1992) gibt einen Überblick über die Entwicklungen in diesem Bereich. Scott (Scott, 1992) beschreibt im Detail einige militärische Systeme in den USA aus der Mitte und dem Ende der 80er Jahre mit detaillierten Zielvorstellungen, wie eine digitale photogrammetrische Arbeitsstation entwickelt und eingesetzt werden kann. Auf dem heutigen Stand der Technik lassen sich zivil nutzbare Systeme mit denselben Eigenschaften viel preiswerter herstellen, die entweder auf PC's oder UNIX Arbeitsstationen basieren. Der Trend geht damit eindeutig zu offenen Systemen, basierend auf Standardarbeitsstationen, ergänzt mit guten Editierfunktionen, die die interaktive Arbeit des Operateurs sehr weitgehend unterstützen. Der erfahrene Operateur wird vorerst weiterhin erforderlich bleiben, auch wenn die Photogrammetrie digital wird.

Es bleibt noch viel zu tun bis die digitale Photogrammetrie auf dem Stand der **Akzeptanz** und des **praktischen Einsatzes** ist wie heutzutage die analytische Photogrammetrie, aber die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung in der Photogrammetrie sind sehr viel umfassender und weitreichender bezüglich Genauigkeit und Automation als die der analytischen Photogrammetrie je waren. Bereits auf dem 16. ISPRS Kongreß in Kyoto, 1988, hatte U.V. Helava dies konstatiert (Helava, 1988b). Inzwischen ist aber, neben der konzeptionellen Ausarbeitung der automatischen DHM Generierung, durch die enorme Entwicklung in der Realisierung photogrammetrischer Arbeitsstationen auch eine genügend große Verbreitung solcher Konzepte erreicht worden, die den praktischen Einsatz der Bildzuordnung für die DHM Generierung in sehr naher Zukunft erwarten lassen.

## LITERATURVERZEICHNIS

### Abkürzungen:

BuL	Bildmessung und Luftbildwesen
DGK	Deutsche Geodätische Kommission, München
IAP	International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing
IEEE T-PAMI	IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence
SIPUS	Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
ZPF	Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung

- Ackermann, F., 1983:** *High Precision Digital Image Correlation*. Proceedings 39th Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 9.
- Ackermann, F., 1984:** *Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in Photogrammetry*. Photogrammetric Record, 11(64), 443-450.
- Ackermann, F., Schneider, W., 1986 a:** *High Precision Aerial Triangulation with Point Transfer by Digital Image Correlation*. Proceedings of the ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Ackermann, F., Schneider, W., Vosselman, G., 1986 b:** *Empirical Investigation into the Precision of Digital Image Correlation*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Ackermann, F., 1993:** *Automatic Generation of Digital Elevation Models*. CONSAS '93, South Africa.
- Anderson, C.H., 1987:** *Match Procedures for Icons*. David Sarnoff Research Center, USA, 5/29/87.
- Ayache, N., Faverjon, B., 1987:** *Efficient Registration of Stereo Images by Matching Graph Description of Edge Segments*. International Journal of Computer Vision, 107-131.
- Bähr, H.P., Wiesel, J., 1991:** *Cost-Benefit Analysis of Digital Orthophoto Technology*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), Digital photogrammetric systems, Wichmann, Karlsruhe.
- Baker, H.H., Binford, T.O., 1981:** *Depth from Edge and Intensity Based Stereo*. Proceedings of the 7th International Jointed Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, British Columbia, Aug., 631-636.
- Baltsavias E.P., 1988:** *Hierarchical Multiphoto Matching and DTM Generation*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B11-III, 476-492.
- Baltsavias E.P., Beyer, H.A., Fritsch, D., Lenz, R.K., 1990:** *Fundamentals of Real-Time Photogrammetry*. Tutorial on occasion of the ISPRS Commission V Symposium, Zurich. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Baltsavias, E.P., 1991:** *A Digital Orthophoto Workstation*. Proceedings 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention, Baltimore, Vol. 5.
- Barnard, S.T., Thompson, W.B., 1980:** *Disparity Analysis of Images*. IEEE T-PAMI, Vol. 2, No. 4.
- Barnard, S.T., 1986:** *A Stochastic Approach to Stereo Vision*. Technical Note, SRI, Menlo Park, USA, No. 373.
- Barnard, S.T., 1987 a:** *Stereo Matching by Hierarchical, Microcanonical Annealing*. Technical Note, SRI, Menlo Park, USA, No. 414, February.
- Barnard, S.T., 1987 b:** *Stochastic Stereo: Results Of Image Matching Test*. Techn. Note, SRI, Menlo Park, USA.
- Benard, M., Boutelab, A.K., Kölbl, O., Penis, C., 1986:** *Automatic Stereophotogrammetry: Implementation and Comparison of Classical Correlation Methods and Dynamic Programming Based Techniques*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Bengtsson, A., Eklundh, J.O., Howako, J., 1986:** *Shape Representation by Multiscale Contour Representation*. Technical Note TRITA-NA-8607, CVAP-27, Dept. of Numerical Analysis and Computing Science, KTH, Stockholm.
- Bethel, J., 1986:** *The DSR11 Image Correlator*. Technical Papers ASP/ACSM Annual Convention, Washington D.C., Vol. 4, 44-49.

- Boochs, F., 1987:** *Off-Line Compilation of Photogrammetric Stereo Models using Digital Image Correlation*. Photogrammetria, 41, 183-199.
- Boyer, K.L., Kak, A.C., 1988:** *Structural Stereopsis for 3D-Vision*. IEEE T-PAMI, Vol. 10, No. 2, 144-166.
- Charif, M., Makarovic, B., 1988:** *Optimizing Progressive and Composite Sampling for Digital Terrain Models*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B10-III, 264-280.
- Claus, M., 1983:** *Korrelationsrechnung in Stereobildpaaren zur automatischen Gewinnung von digitalen Geländemodellen, Orthophotos und Höhenlinienplänen*. DGK, Reihe C, Heft 283, München.
- Cogan, L., Gugan, D., Hunter, D., Lutz, S., Peny, C. 1988:** *Kern DSP 1- Digital Stereo Photogrammetric System*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B2.
- Cogan, L., Hunter, D., 1984:** *DTM Collection and the Kern Correlator*. Proceedings 15th ISPRS Congress, Rio de Janeiro, IAP, Vol. 25.
- Collins, K.A., Roberts, J.B.G., Anthony, A., Muller, J-P., 1987:** *Transputer Arrays for Real-Time Feature Point Stereo Matching*. Proceedings ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June.
- Day, T., Muller, J-P., 1988:** *Quality Assessment of Digital Elevation Models produced by Automatic Stereo Matchers from SPOT Image Pairs*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3.
- Dowman, I.J., Ebner, H., Heipke, C., 1992:** *Overview of European Developments in Digital Photogrammetric Workstations*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, January.
- Dreschler, L., 1981:** *Ermittlung markanter Punkte auf Bildern bewegter Objekte und Berechnung von 3D Koordinaten auf dieser Grundlage*. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg.
- Ebner, H., Hofmann-Wellenhof, B., Reiss, P., Steidler, F., 1980:** *HIFI - A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements*. Proceedings 14th ISPRS Congress, Hamburg, IAP, Vol. 23, 202-215.
- Ebner, H., Fritsch, D., Gillessen, W., Heipke, C., 1987:** *Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*. BuL (55) 5, 194-203.
- Ehlers, M., 1983:** *Untersuchung von digitalen Korrelationsverfahren zur Entzerrung von Fernerkundungsaufnahmen*. Dissertation, Universität Hannover, DGK, Reihe C.
- Euget, G., Vigneron, C., 1988:** *MATRA TRASTER T10N Digital Stereoplotter*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B2.
- Faugeras, O.D., Price, K., 1981:** *Semantic Description of Aerial Images using Stochastic Labeling*. IEEE T-PAMI, Vol. 3, No. 6, November.
- Förstner, W., 1982:** *On the Geometric Precision of Digital Image Correlation*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Helsinki, IAP, Vol. 24, Com. III, 176-189.
- Förstner, W. 1986:** *A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Förstner, W., Gülch, E., 1987:** *A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features*. Proceedings ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June.
- Förstner, W., 1988:** *Model Based Detection and Location of Houses as Topographic Control Points in Digital Images*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27 B11.
- Förstner, W., 1990:** *Concepts and algorithms for digital photogrammetric systems*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Wuhan, IAP, Vol. (28) 3.
- Frisby, J.P., Pollard, S.B., 1987:** *A Stereo Correspondence Algorithm based on some Phenomena of Human Binocular Vision*. Minutes of the Workshop on Image Matching, ISPRS WG III/4, Stuttgart.
- Grimson, W.E.L., 1985:** *Computational Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm*. IEEE T-PAMI, Vol. 7, No. 1.
- Grün, A., 1985:** *Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique*. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3), 175-187.

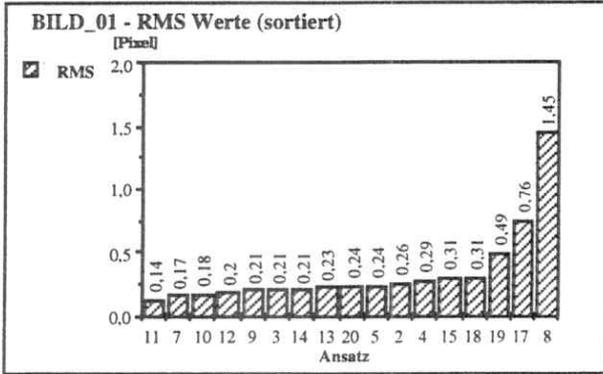
- Gülch, E., 1986:** *Instrumental Realisation and Calibration of Digital Correlation with the Planicomp*. Proceedings 40th Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 11.
- Gülch, E., 1988:** *Results of Test on Image Matching of ISPRS WG-III/4*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 254-271.
- Gülch, E., Axelsson, P., Stokes, J., 1990:** *Object Description and Precise Localization of Prescribed Objects in Digital Images*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Wuhan, IAP, Vol. (28) 3.
- Gülch, E., 1991 a:** *Results of Test on Image Matching of ISPRS WG-III/4*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 46, 1-18.
- Gülch, E., 1991 b:** *Using a Knowledge Based System in the Development of a Generic Model for Buildings*. Proceedings IGARSS'91 Conference, Helsinki, June.
- Gülch, E., 1991 c:** *Automatic Extraction of Geometric Features from Digital Imagery*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), Digital photogrammetric systems, Wichmann, Karlsruhe.
- Gülch, E., 1992:** *A knowledge based approach to reconstruct buildings in digital aerial imagery*. Proceedings 17th ISPRS Congress, Washington D.C., IAP, Vol. 29, Com. II.
- Hahn, M., 1985:** *Comparison of Different Methods and Strategies for Detecting Outliers in Data*. 7. IAG Symposium on Geodetic Computations, Cracow.
- Hahn, M., Förstner, W., 1988:** *The Applicability of a Feature Based Matching and a Least Squares Matching Algorithm for DEM-Acquisition*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27.
- Hahn, M., 1989:** *Automatic Measurements of Digital Terrain Models by Means of Image Matching Techniques*. Proceedings 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 13.
- Hahn, M., Schneider, F., 1991:** *Feature Based Surface Reconstruction - A Hierarchical Approach developed for Moms02-Imagery*. Proceedings IGARSS'91, Vol. 3, Espoo, 1747-1750.
- Hannah, M.J., 1974:** *Computer Matching Of Areas In Stereo Image*. Ph.D.Thesis, Memo AIM 239 Stanford University.
- Hannah, M.J., 1987:** *Test Results From SRI's Stereo System*. Technical Note, SRI, Menlo Park, USA
- Hannah, M.J., 1988:** *Digital Stereo Image Matching Techniques*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 280-293.
- Haralick, R.M., Shapiro, L., 1991:** *Glossary of Computer Vision Terms*. Pattern Recognition, Vol.24, No.1.
- Hartfiel, P., 1986:** *Zur Leistungsfähigkeit von Bildzuordnungsverfahren bei der Erzeugung Digitaler Geländemodelle*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol.26-3.
- Hartfiel, P., 1987:** *Auswertebereicht zum Modell I des Vergleichstest A*. Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, September.
- Heipke, C., Kornus, W. , 1991:** *Nonsemantic Photogrammetric Processing of Digital Imagery - The Example of SPOT Stereo Scenes*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), Digital photogrammetric systems, Wichmann, Karlsruhe.
- Helava, U.V., 1976:** *Digital Correlation in Photogrammetric Instruments*. Proceedings 13th ISPRS Congress, Helsinki, IAP, Vol. 21, Com. III.
- Helava, U.V., 1987:** *Digital Comparator Correlator System*. Proceedings ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June.
- Helava, U.V., 1988 a:** *Object Space Least Squares Correlation*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 321-331.
- Helava, U.V., 1988 b:** *On System Concepts for Digital Automation*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B2, 171-190.
- Henriksen, K., Bajcsy, R., 1986:** *Feature Based Stereo Matching*. Technical Report DIKU-86-7, Computer Science Department, University of Copenhagen.
- Hobrough, G.L., 1959:** *Automatic Stereo Plotting*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 763-769.
- Hobrough, G.L., 1978:** *Digital on-line Correlation*. Bildmessung und Luftbildwesen, 79-86.

- Kaiser, R., 1991:** *The Intergraph Digital Photogrammetric Workstation*. Proceedings 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 15.
- Kass, M., 1986:** *Linear Image Features in Stereopsis*. Proceedings Fifth National Conference on Artificial Intelligence, Philadelphia.
- Kölbl, O., Boutaleb, A.K., Penis, C., 1987:** *A Concept for Automatic Derivation of a Digital Terrain Model with the Kern DSR11*. Proceedings ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June.
- Kölbl, O., Silva, I., 1988:** *Derivation of a Digital Terrain Model by Dynamic Programming*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 77-86.
- Kölbl, O., Chardonnens, I., Silva, I., Gilliéron P.-Y., Hersch, R.D., 1989:** *Replacement of the Human Operator by Image Processing Shown on the Example of the Elaboration of a Digital Terrain Model*. Proceedings ASPRS/ACSM Convention, Baltimore, Vol. 2, 126-141.
- Kölbl, O., Hersch, R., Lutz, S., Chardonnens, B., Gilliéron, P.-Y., 1990:** *Automatic Derivation of a Digital Terrain Model*. Proceedings XIX FIG International Congress, Helsinki.
- König, G., Nickel, W., Storl, J., 1986:** *Processing of Scanning Electron Microscope Imagery in a Digital Stereophotogrammetric System (DSS)*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3/2.
- Köstli, A., Sigle, M., 1986:** *The Random Access Data Structure of the DTM Program SCOP*. IAP, Vol. 26-4.
- Konecny, G., Pape D., 1981:** *Correlation Techniques and Devices*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 3, March, 323-333.
- Konecny, G., Lohmann, P., Skog, L., 1988:** *A Digital Image Mapping System*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B11.
- Kraus, K., Assmus, E., Köstli, A., Molnar, L., Wild, E., 1982:** *Digital Elevation Models: Users Aspects*. SIPUS, Heft 8.
- Kreiling, W., 1976:** *Automatische Auswertung von Stereobildpaaren durch Digitale Korrelation*. Proceedings 13th ISPRS Congress, Helsinki, IAP, Vol. 21.
- Krzystek, P., 1991:** *Fully Automatic Measurement of Digital Elevation Models with MATCH-T*. Proceedings 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 15.
- Krzystek, P., Wild, D., 1992:** *Experimental Accuracy Analysis of Automatically Measured Digital Terrain Models*. Robust Computer Vision: Quality of Computer Vision Algorithms, Förstner/Ruwiedel (eds.), Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Lemmens, M., 1988:** *A Survey on Stereo Matching Techniques*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B8-V, 11-23.
- Lambird, B.A., Lavine, D., Stockmann, G.C., Hayes, K.C., Kanal, L.N., 1980:** *Study of Digital Matching of Dissimilar Images*. ETL Report, No. ETL-0248, USA.
- Li, M., 1987:** *A Comparative Test of Digital Elevation Model Measurement using the Kern DSR-11 Analytical Plotter*. Fotogrammetriskä Meddelanden, No. 53, Dept. of Photogrammetry, KTH, Stockholm.
- Li, M., 1988:** *High Precision Relative Orientation Using Feature Based Techniques*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 456-465.
- Li, M., 1989:** *Detection and Location of Breaklines and Discontinuities in Stereo Image Matching*. PhD Thesis, Fotogrammetriskä Meddelanden, No. 54, Dept. of Photogrammetry, KTH, Stockholm.
- Li, R., 1988:** *Erstellung Digitaler Oberflächenmodelle durch Flächen- und Kantenkorrelation*. Bildmessung und Luftbildwesen 56, Heft 4.
- Lin, Z., 1986:** *Multi-Criteria for Similarity Assessment in Photogrammetric Image Correlation*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Lin, Z., 1988:** *Structural Characteristics Aided Image Matching*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B8.
- Lindeberg, T., 1991:** *Discrete Scale-Space Theory and the Scale-Space Primal Sketch*. Dissertation, TRITA-NA-P9108, CVAP84, Dept. of Numerical Analysis and Computing Science, KTH, Stockholm.

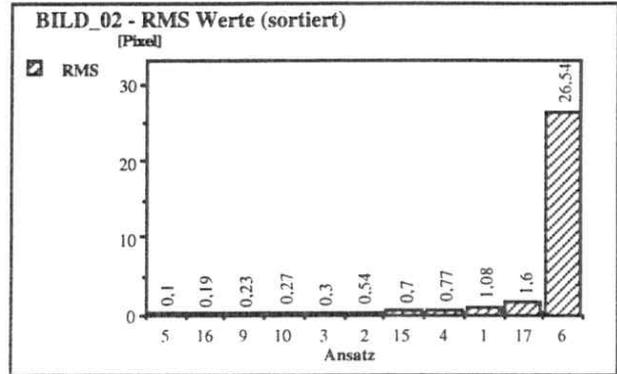
- Lindenberger, J., 1986:** *ARIMA Processes for Modelling Digital Terrain Profiles*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol.26-3/2.
- Makarovic, B., 1973:** *Progressive Sampling for Digital Terrain Models*. ITC Journal.
- Makarovic, B., 1979:** *Composite Sampling for Digital Terrain Models*. ITC Journal.
- Marr, D., Poggio, T., 1979:** *A Computational Theory of Human Stereo Vision*. Proceedings Royal Society of London, Vol. B204, 301-328.
- Mayhew, J.E., Frisby, J.P., 1981:** *Psychophysical and computational studies towards a theory of human stereopsis*. Artificial Intelligence, Vol. 17, 349-386.
- Mayr, W., 1991:** *PHIPS - A NEW Tool for Digital Photogrammetry*. Proceedings 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 15.
- McKeown, D.M., 1991:** *Information fusion in cartographic feature extraction from aerial imagery*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), Digital photogrammetric systems, Wichmann, Karlsruhe.
- Medioni, G., Nevatia, R., 1984:** *Matching Images Using Linear Features*. IEEE T-PAMI 1984, No. 6.
- Moravec, H.P., 1977:** *Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance*. Proceedings 5th International Conference on Artificial Intelligence, August, 584.
- Mulawa, D., 1989:** *Estimation And Photogrammetric Treatment Of Linear Features*. PhD Thesis, Purdue University, USA.
- Norvelle, R., 1981:** *Interactive Digital Correlation Techniques for Automatic Compilation of Elevation Data*. U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, ETL-0272, USA.
- Norvelle, F.R., 1992:** *Stereo Correlation: Window Shaping and DEM Corrections*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, January.
- Ohta, Y., Kanade, T., 1985:** *Stereo by Intra- and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming*. IEEE T-PAMI, Vol. 7, No. 2.
- Olsen, S.I., 1986:** *Concurrent Solution of the Stereo Correspondence Problem and the Surface Reconstruction Problem*. Presented at the Eighth International Conference On Pattern Recognition, Paris.
- Paderes, F.C., Mikhail, E.M., Förstner, W., 1984:** *Rectification of Single and Multiple Frames of Satellite Scanner Imagery using Points and Edges as Control*. NASA-Symp. on Pattern Recognition and Image Analysis, Houston.
- Pertl, A., 1985:** *Digital Image Correlation with the Analytical Plotter*. Photogrammetria 40.
- Piechel, J., 1986:** *Investigations of different Interest Operators for DTM- Generation by Epipolar Line Correlation*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26-3.
- Pollard, S.B., Mayhew, J.E.W., Frisby, J.P., 1985:** *PMF: A Stereo Correspondence Algorithm Using A Disparity Gradient Limit*. Perception, Volume 14, 449-470.
- Price, K., 1985:** *Relaxation Matching Techniques - A Comparison*. IEEE T-PAMI, Vol. 7, No. 5.
- Price, K., 1987:** *Relaxation-Based Region Matching*. Minutes of the Workshop on Image Matching, ISPRS WG III/4, Stuttgart.
- Quam, L., Strat, T.M., 1991:** *SRI Image Understanding Research in Cartographic Feature Extraction*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), Digital photogrammetric systems, Wichmann, Karlsruhe.
- Rauhala, U.A., 1988:** *Compiler Positioning System: An Array Algebra Formulation of Digital Photogrammetry*. Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B9.
- Rosenfeld, A., Hummel, R., Zucker, S.W., 1976:** *Scene labelling by relaxation operations*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 6, 420-433.
- Rosenholm, D., 1986:** *Accuracy Improvement of Digital Matching for Evaluation of Digital Terrain Models*. Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol. 26, 573-587.
- Saarikoski, A., 1988:** *Survey of Segmentation Techniques for Image Analysis*. Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 11, No. 1.
- Sarjakoski, T., 1990:** *Digital stereo imagery - a map product of the future?* Proceedings ISPRS Com. IV Symposium, Tsukuba, IAP, Vol. (28) 4.

- Schenk, T., Toth, C., 1990: *Zur automatischen Orientierung von digitalen Bildpaaren*. ZPF (58) 6, 182-189.
- Schenk, T., Toth, C., 1991: *Knowledge-Based Systems for Digital Photogrammetric Workstations*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), *Digital photogrammetric systems*, Wichmann, Karlsruhe.
- Schenk, T., Toth, C., 1992: *Conceptual Issues of Softcopy Photogrammetric Workstations*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58, No. 1, January.
- Schewe, H., Förstner, W., 1986: *The Program PALM for Automatic Line and Surface Measurement Using Image Matching Techniques*. *Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol.26*.
- Scott, B.M., Helava, U.V., Helava, K.D., 1992: *Softcopy Photogrammetric Workstations*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58, No. 1, January.
- Shapiro, L.G., Haralick, R.M., 1987: *Relational Matching*. *Applied Optics* (26), 10, 1845-1851.
- Sinnreich, K., 1985: *Mathematisch-Morphologische Transformationen zur Lagebestimmung von Rahmenmarken*. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- Stockman, G., Kopstein, S., Benett, S., 1982: *Matching Images to Models for Registration and Object Detection via Clustering*. *IEEE T-PAMI*, Vol. 4, No. 3, 229-241.
- Stokes, J., 1988: *A Photogrammetric monoplottter for Digital Map Revision using the image processing System GOP-300*. *Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B2*.
- Straub, B., 1987: *IPE-Report on Test on Image Matching*. Institut für Physikalische Elektronik, Universität Stuttgart.
- Torlegård, K., 1983: *Photogrammetrie und digitale Höhenmodelle - Gegenwärtiger Stand der Entwicklung und Anwendung*. BuL (51), Heft 1.
- Tsingas, V., 1991: *Automatische Aerotriangulation*. *Proceedings 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, SIPUS, Heft 15*.
- Vosselman, G., 1991 *Relational Matching*. PhD Thesis, University Bonn.
- Weisensee, M., 1987: *Facets Stereo Vision (Fast Vision)*. *Minutes of the Workshop on Image Matching, ISPRS WG III/4, Stuttgart*.
- Weisensee M., Wrobel, B., 1991: *State-of-the-Art of Digital Image Matching for Object Reconstruction*. In Ebner H., Fritsch, D., Heipke, C. (eds.), *Digital photogrammetric systems*, Wichmann, Karlsruhe.
- Wild, E., 1983: *die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen*. DGK, Reihe C, Heft Nr. 277.
- Witkin, A.P., Terzopoulos, D., Kass, M., 1987: *Signal Matching through Scale-Space*. *International Journal on Computer Vision*, Vol. 1, 133-144.
- Wrobel, B., 1987 a: *Digital Image Matching by Facets Using Object Space Models*. Presented paper at the Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering, March, The Hague.
- Wrobel, B., 1987 b: *Facets Stereo Vision (FAST Vision) - A New Approach to Computer Vision and to Digital Photogrammetry*. *Proceedings ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June*.
- Wrobel, B., 1988: *Least Squares Methods for Surface Reconstruction from Images*. *Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27-B3, 806-821*.
- Zhang, Z., 1988: *A New Approach of Epipolar-line Image Matching for Improving the Performance of SODAMS System*. *Proceedings 16th ISPRS Congress, Kyoto, IAP, Vol. 27*.
- Zheng, Y.J., Hahn, M., 1990: *Surface reconstruction from digital images in the presence of discontinuities, occlusions and deformations*. *Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Wuhan, IAP, Vol. (28) 3*.
- Zheng, Y.-J., 1991: *Inverse und schlecht gestellte Probleme in der photogrammetrischen Rekonstruktion*. DGK, Reihe C, Heft 390.
- Zielinski, H., 1992: *Line Photogrammetry with Multiple Images*. *Proceedings 17th ISPRS Congress, Washington D.C., IAP, Vol. 29*.
- Zucker, S.W., 1976: *Region Growing: Childhood and Adolescence*. *Computer Graphics and Image Processing*, 5, 382-399.

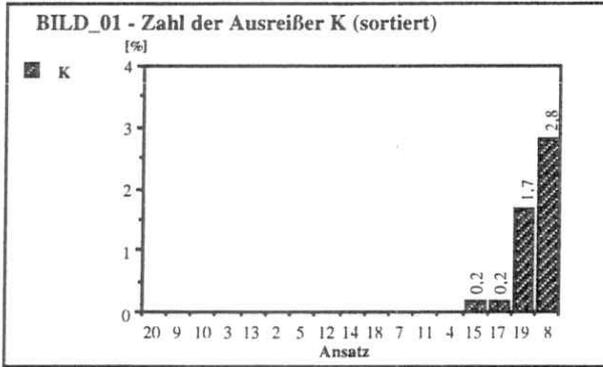
# ANHANG A - ZUSAMMENSTELLUNG DER GENAUIGKEITS- UND ZUVERLÄSSIGKEITSUNTERSUCHUNGEN DER EINZELNEN ZUORDNUNGSANSÄTZE DES ISPRS WG III/4 TESTS (KAP. 3.7)



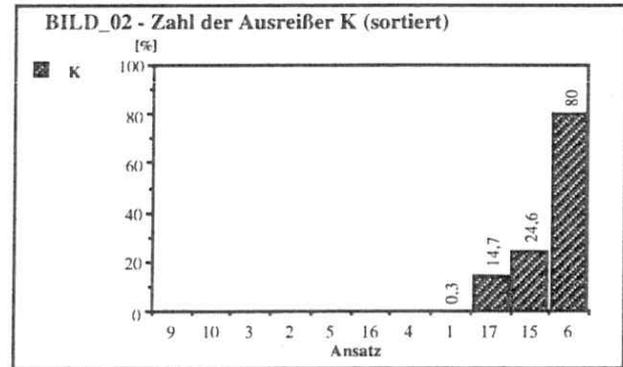
(a)



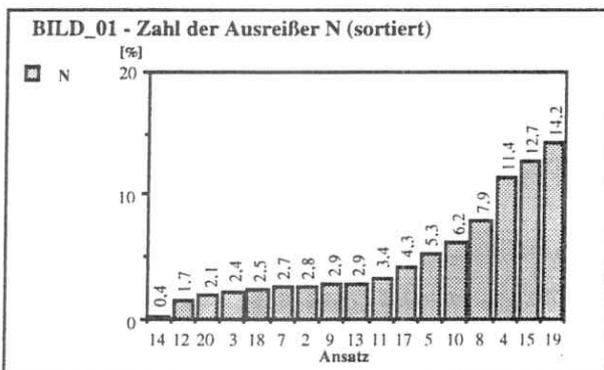
(a)



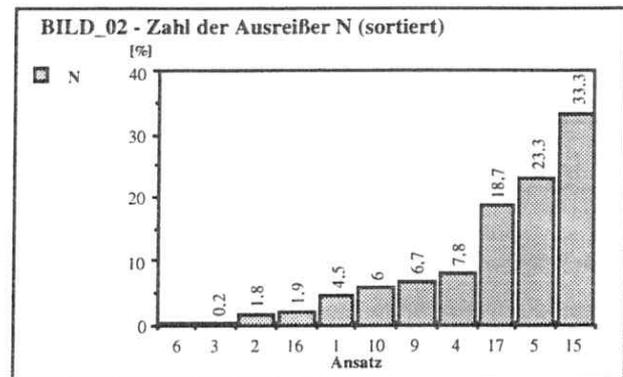
(b)



(b)



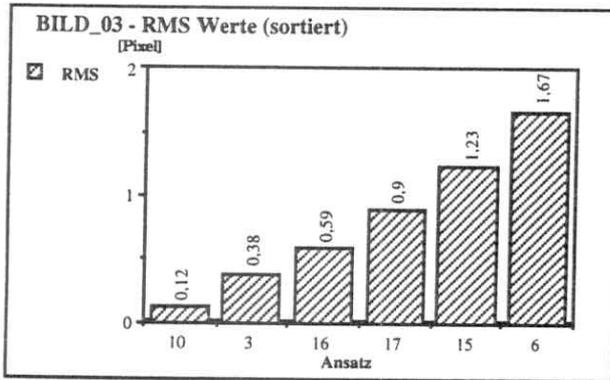
(c)



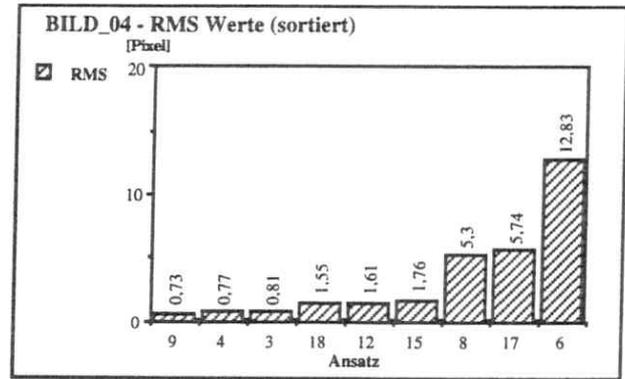
(c)

Abbildung 3.16 Bild01. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).

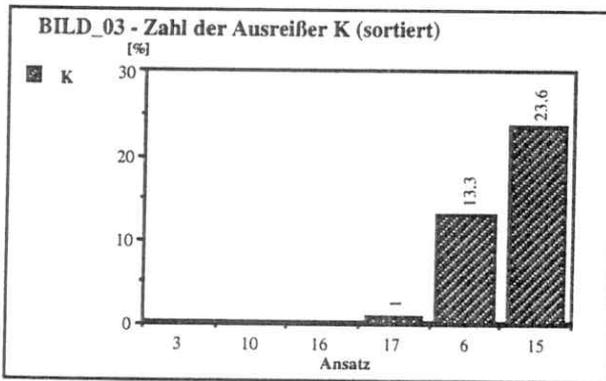
Abbildung 3.17 Bild02. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).



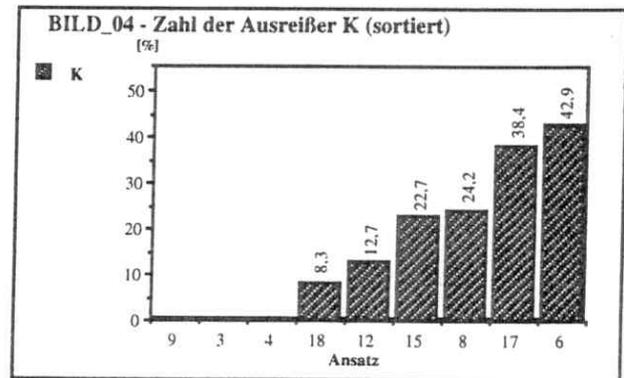
(a)



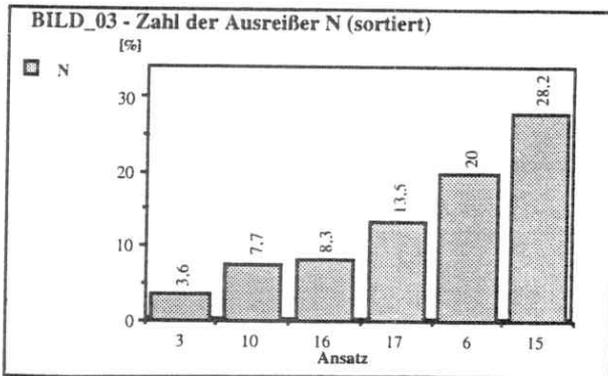
(a)



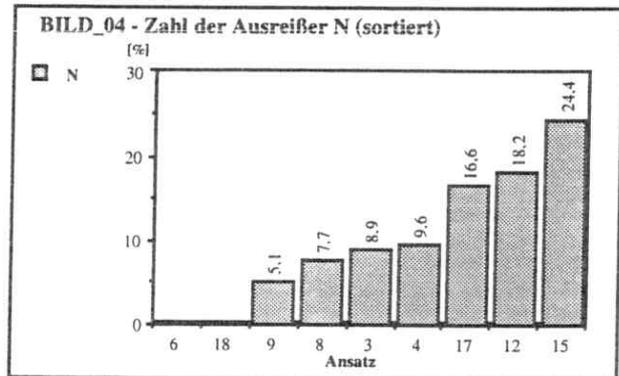
(b)



(b)



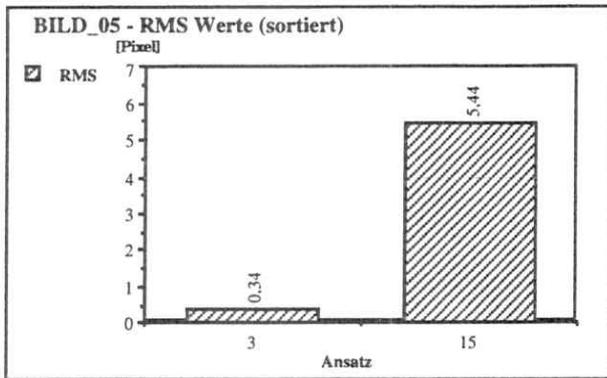
(c)



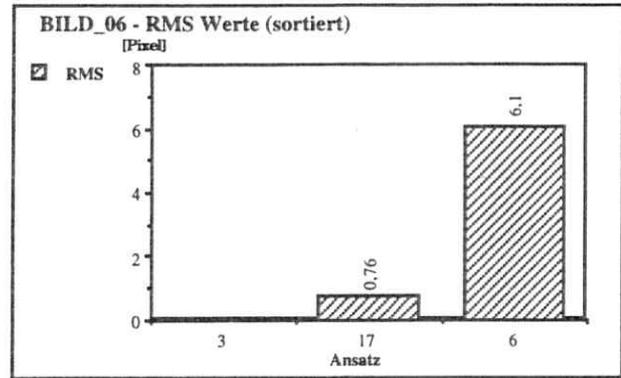
(c)

**Abbildung 3.18** Bild03. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).

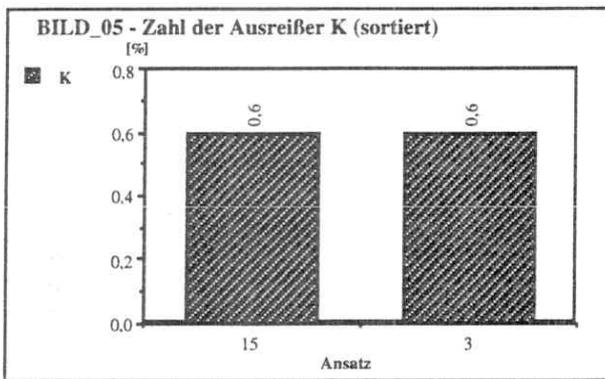
**Abbildung 3.19** Bild04. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).



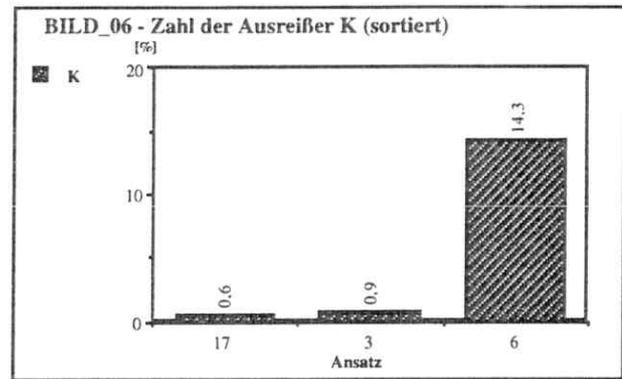
(a)



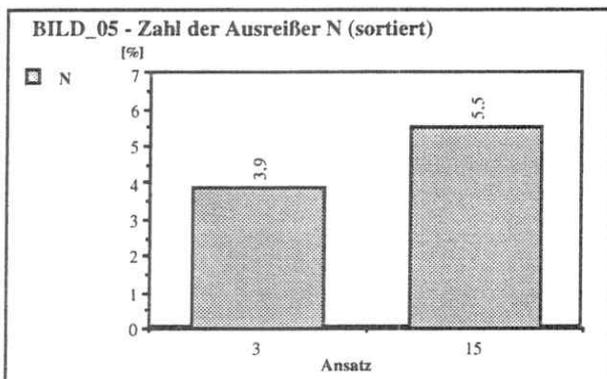
(a)



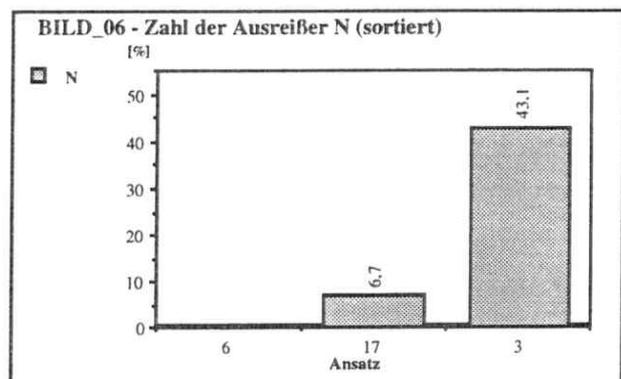
(b)



(b)



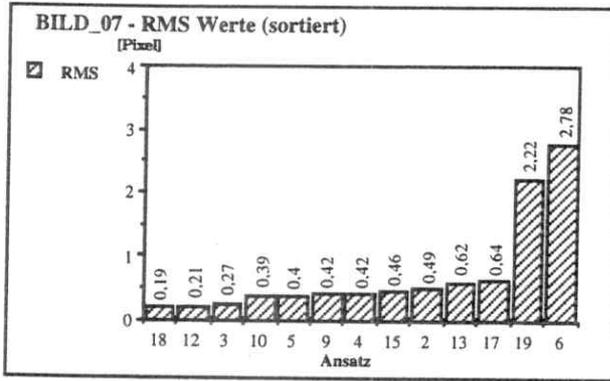
(c)



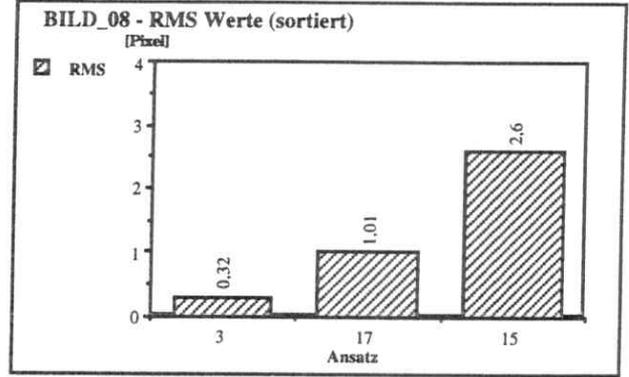
(c)

**Abbildung 3.20** Bild05. Ansätze sortiert nach  
(a) Genauigkeit (RMS),  
(b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
(c) Anzahl der Ausreißer (N).

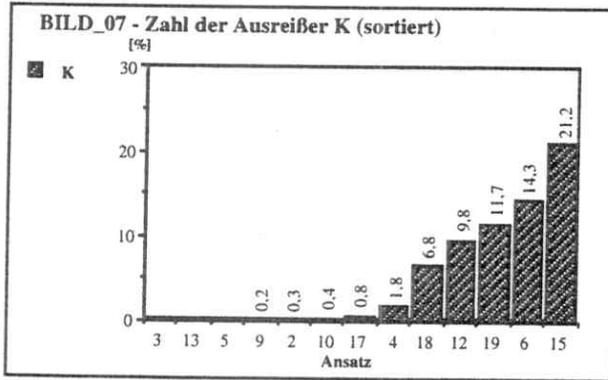
**Abbildung 3.21** Bild06. Ansätze sortiert nach  
(a) Genauigkeit (RMS),  
(b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
(c) Anzahl der Ausreißer (N).



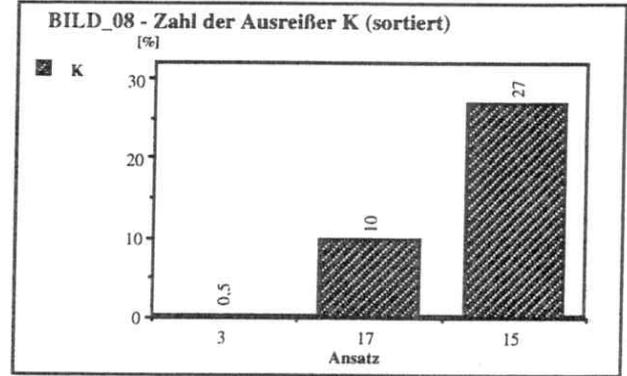
(a)



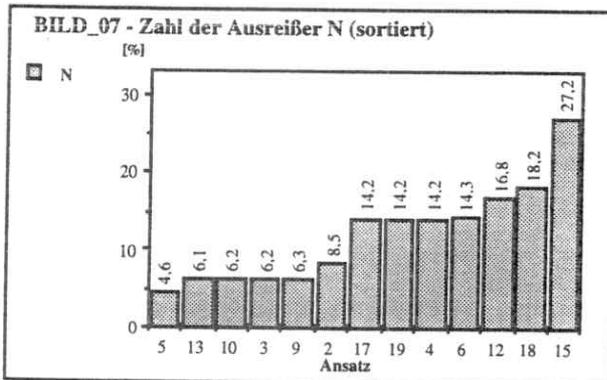
(a)



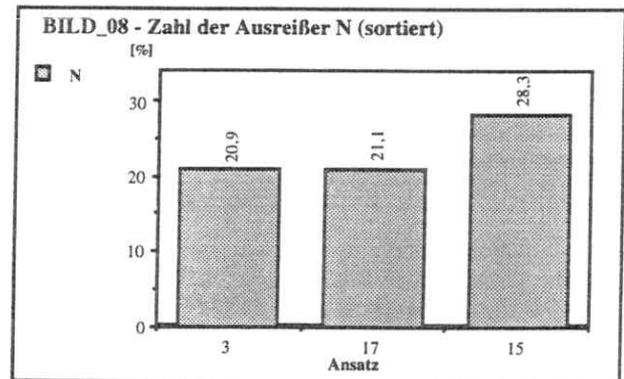
(b)



(b)



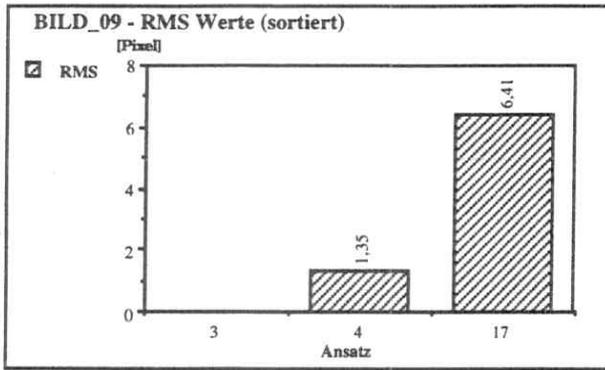
(c)



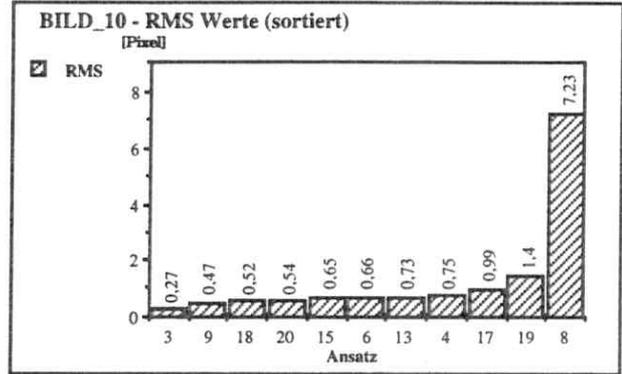
(c)

**Abbildung 3.22** Bild07. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).

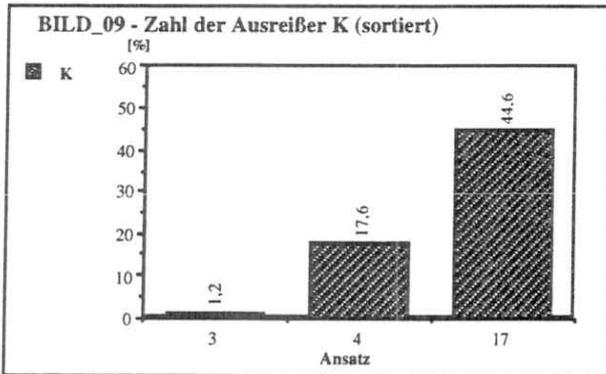
**Abbildung 3.23** Bild08. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).



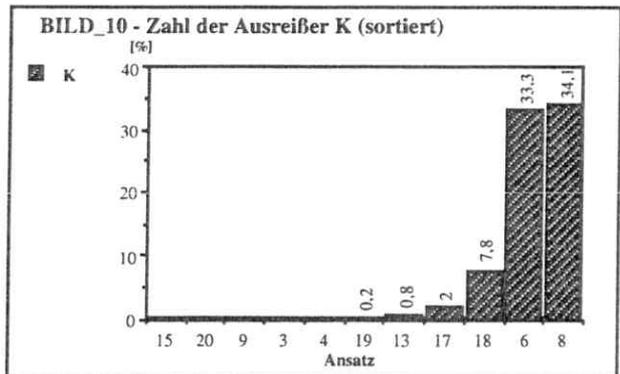
(a)



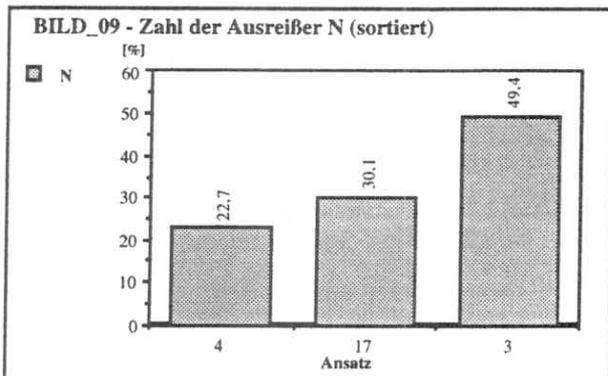
(a)



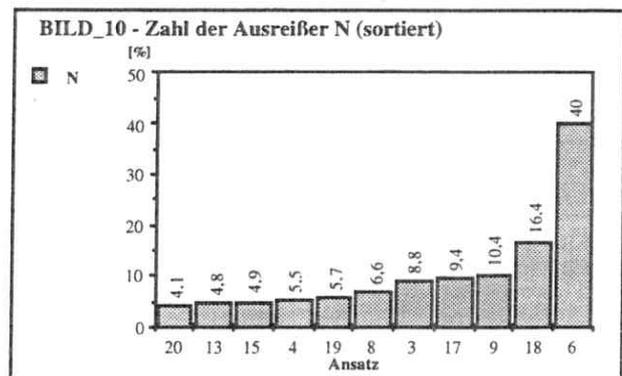
(b)



(b)



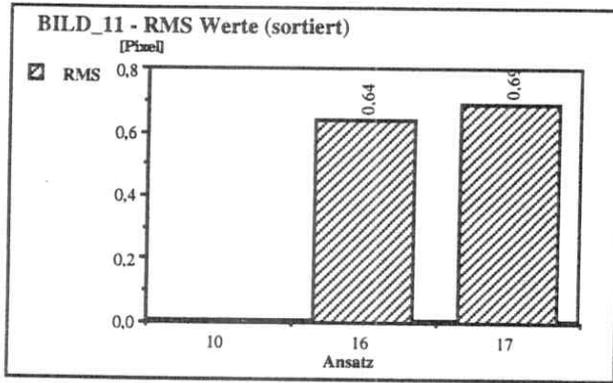
(c)



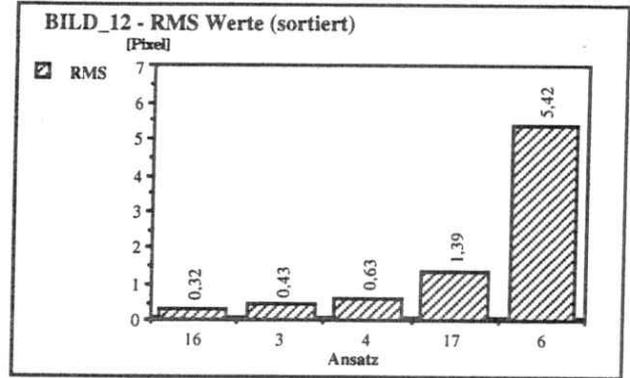
(c)

**Abbildung 3.24** Bild09. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).

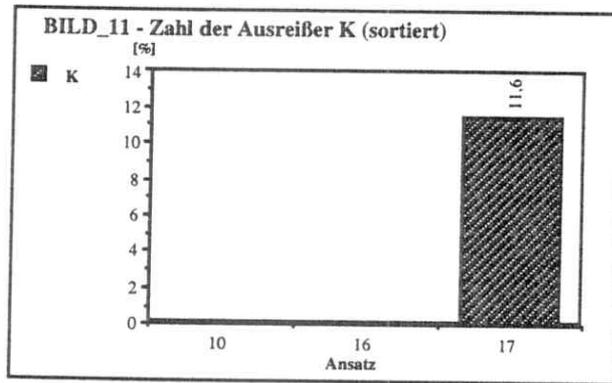
**Abbildung 3.25** Bild10. Ansätze sortiert nach  
 (a) Genauigkeit (RMS),  
 (b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
 (c) Anzahl der Ausreißer (N).



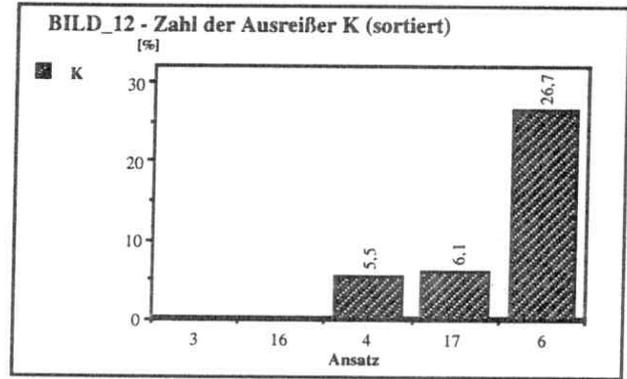
(a)



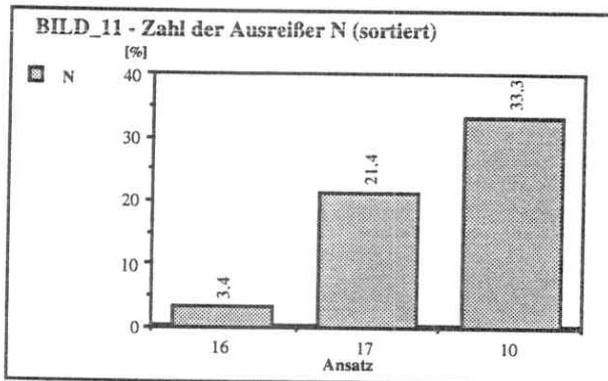
(a)



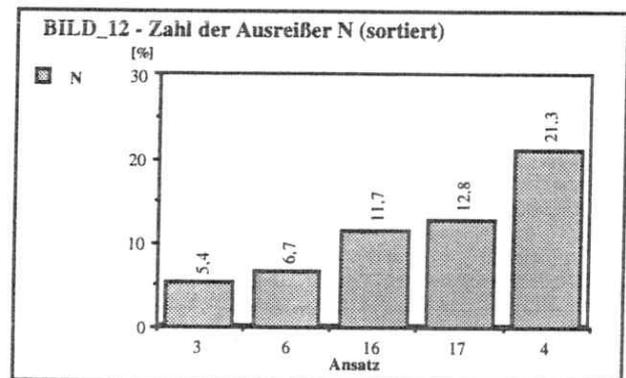
(b)



(b)



(c)



(c)

**Abbildung 3.26** Bild11. Ansätze sortiert nach  
(a) Genauigkeit (RMS),  
(b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
(c) Anzahl der Ausreißer (N).

**Abbildung 3.27** Bild12. Ansätze sortiert nach  
(a) Genauigkeit (RMS),  
(b) Anzahl der Ausreißer (K) und  
(c) Anzahl der Ausreißer (N).

## DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ackermann, der diese Arbeit betreut hat und der trotz hoher Arbeitsbelastung und der räumlichen Distanz Zeit und Gelegenheit gefunden hat, bei zahlreichen Treffen in Stuttgart, Stockholm und Helsinki Verbesserungsvorschläge einzubringen, kritische Anmerkungen zu machen und Ratschläge zu geben, um die Arbeit in die endgültige Form zu bringen.

Ebenso möchte ich ganz besonders Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner danken, der den Test zur Bildzuordnung initiiert und Teile der Auswertung mitbetreut hat.

Bei Prof. Dr. Einari Kilpelä konnte ich über mehrere Monate am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Hochschule Helsinki mit der Abfassung dieser Arbeit beginnen, die ich dann Dank der Möglichkeit zur Teilzeitarbeit bei Prof. Dr. Kennert Torlegård am Institut für Photogrammetrie der Königlich Technischen Hochschule in Stockholm abschließen konnte.

Für die empirische Überprüfung des Konzepts zur topographischen Geländeerfassung konnte ich auf die umfangreichen Arbeiten und Erfahrungen von Dipl.-Ing. Alfred Pertl, Dipl.-Ing. Heinrich Schewe, Dipl.-Ing. Michael Hahn und Dipl.-Ing. Markus English aufbauen. Ihnen sei dafür herzlich gedankt.

Dr.-Ing. George Vosselman, Dipl.-Ing. Markus English und Dipl.-Ing. Uwe Hirth danke ich für die Unterstützung bei der Aufbereitung und den manuellen Vergleichsmessungen des sehr umfangreichen Datenmaterials für den Test zur Bildzuordnung. Auch allen weiteren, nicht genannten Mitarbeitern des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart und der INPHO GmbH in Stuttgart sei sehr herzlich gedankt.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, bei Marja und bei Johanna bedanken, die mir auf ihre Weise die nötige Unterstützung gegeben haben, um diese Arbeit abzuschließen.

## LEBENS LAUF

Ich bin am 27. April 1958 in Göppingen-Bezgenriet als Sohn des damaligen Amtmannes Willi Gülch und seiner Ehefrau Maria geb. Reyher geboren.

Meine Schulausbildung umfaßte 4 Jahre Grundschule und 9 Jahre Gymnasium und war mit dem Bestehen der Reifeprüfung am Hohenstaufen-Gymnasium in Göppingen 1977 abgeschlossen.

Daran anschließend leistete ich 15 Monate Wehrpflicht ab.

Im Oktober 1978 begann ich das Studium der Geodäsie an der Universität Stuttgart, das ich 1983 mit dem Bestehen der Diplomprüfung abschloß. Meine akademischen Lehrer waren Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann, Prof. Dr.-Ing. E.W. Grafarend, Prof. Dr.-Ing. P. Hartl, Prof. Dr.-Ing. K. Linkwitz und Prof. Dr.-Ing. M. Ruopp.

Von September 1983 bis August 1988 war ich am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart bei Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, ab 1984 im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 228 „Hochgenaue Navigation“. Im März 1988 verbrachte ich einen einmonatigen Forschungsaufenthalt am Institut für Photogrammetrie der Technischen Hochschule in Delft, Niederlanden, auf Einladung von Prof. Dr. G.H. Ligterink.

Von September bis Dezember 1988 arbeitete ich als Gastforscher am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Helsinki in Espoo, Finnland, auf Einladung von Prof. Dr. E. Kilpelä.

Seit Januar 1989 bin ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr. K. Torlegård am Institut für Photogrammetrie der Königlich Technischen Hochschule in Stockholm, Schweden, tätig. Im Dezember 1990 habe ich einen einmonatigen Forschungsaufenthalt am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart auf Einladung des Sonderforschungsbereichs SFB 228 „Hochgenaue Navigation“ verbracht.