

DAS ORTHOPHOTOVERFAHREN IN DER ARCHITEKTURPHOTOGRAMMETRIE

Von der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

EBERHARD SEEGER, OBERKOCHEN

Hauptberichter: Prof.Dr.-Ing. F. Ackermann
Mitberichter: Prof.Dr.-Ing. F. Löschner
Prof.Dr.-Ing. G. Nagel

Tag der Einreichung: 22. Nov. 1977
Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juni 1978

Mit dem vorliegenden Heft Nr. 5 der Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie wird die Dissertation von E. Seeger veröffentlicht. Die Aufnahme einer Dissertation in diese Reihe hat als Ausnahme zu gelten. Sie ist in diesem Fall dadurch gegeben, daß Art, Umfang und die angesprochene Interessengruppe der Arbeit eine Veröffentlichung z.B. in der üblicherweise dafür in Anspruch genommenen Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission oder in anderen sonst dafür geeigneten Schriftenreihen ausschließt.

F. Ackermann

DAS ORTHOPHOTOVERFAHREN IN DER ARCHITEKTURPHOTOGRAMMETRIE

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	7
1.1 <u>Allgemeine Einführung</u>	7
1.2 <u>Aufgabenstellung</u>	8
2. <u>Aufgaben und konventionelle Techniken der Architekturphotogrammetrie</u>	9
2.1 <u>Aufgaben der Architekturphotogrammetrie</u>	9
2.2 <u>Techniken und Geräte</u>	9
2.2.1 Photogrammetrische Aufnahme	10
2.2.2 Photogrammetrische Auswertung	10
2.3 <u>Die Problematik der graphischen Detailauswertung bei der Stereokartierung</u>	12
2.3.1 Darzustellende Detailfülle	13
2.3.2 Zeitbedarf	14
2.3.3 Weitere Gesichtspunkte zur Stereokartierung	20
2.4 <u>Photokarten, Abgrenzung der Verfahren</u>	20
2.4.1 Tendenz zu Halbtonbildern	20
2.4.2 Hochzeichnung aus maßstäblichen Halbtonbildern	21
2.4.3 Abgrenzung der Verfahren für die Herstellung von Bildplänen	22
2.4.4 Vergrößerung, Entzerrung	24
2.4.5 Reliefversetzung	26
3. <u>Das Orthophotoverfahren</u>	29
3.1 <u>Allgemeine Beschreibung</u>	29
3.2 <u>Realisierung der Differentialentzerrung</u>	29
3.2.1 Mathematische Entzerrungsprinzipien, Grad der Objektannäherung	29
3.2.2 Umbildungstechniken	32
3.2.3 Gerätetechnische Realisierung am Beispiel des Orthoprojektors Zeiss GZ 1	33

3.3 <u>Fehler und Genauigkeit von Orthophotos</u>	40
3.3.1 Fehler des Geländemodells im Stereoauswertegerät	40
3.3.2 Verfahrensfehler	40
3.3.3 Abtastfehler	42
3.3.4 Ankopplungsfehler	44
3.3.5 Fehler des Orthoprojektors	44
3.3.6 Filmfehler	44
3.3.7 Bewegungsunschärfen	44
3.3.8 Wirkungsweise der Fehler	45
3.4 <u>Problematik der Orthophoto-Anwendung in der Architektur</u>	46
4. <u>Die photogrammetrische Aufnahme für die Herstellung von Architektur-Bildplänen</u>	51
4.1 <u>Wahl der Aufnahmekammer</u>	51
4.1.1 Bildformate, Brennweiten, Bildwinkel	51
4.1.2 Abhängigkeit verschiedener Fehlergrößen von Brennweite und Bildwinkel	53
4.1.3 Tiefenschärfenbereich	57
4.1.4 Neigungsmöglichkeiten	57
4.2 <u>Aufnahmeanordnung</u>	
4.2.1 Aufnahmeentfernung	58
4.2.2 Basisverhältnis	58
4.2.3 Äußere Orientierung der Maßkammern	59
4.2.4 Anzahl der Modelle	59
4.3 <u>Vorbereitungen zur Aufnahme</u>	63
4.3.1 Paßpunkte	63
4.3.2 Vorkehrungen am Objekt	63
4.4 <u>Lichtverhältnisse, Beleuchtung</u>	64

5.	<u>Vorbereitungen zur orthophotographischen Auswertung von Architektur-Bildplänen</u>	67
5.1	<u>Aufbereitung des Bildmaterials, Kontrastausgleich</u>	67
5.2	<u>Vorüberlegungen zur Auswertung</u>	68
5.2.1	Bildformat, Kammerkonstante	68
5.2.2	Affinauswertung	70
5.2.3	Optische Umbildung	76
5.2.4	Modellbereiche	76
5.2.5	Auswertemaßstäbe	79
5.3	<u>Orientierung</u>	80
5.3.1	Innere Orientierung	80
5.3.2	Relative Orientierung	80
5.3.3	Absolute Orientierung	83
6.	<u>Modellabtastung in Profilen, Orthoprojektion</u>	85
6.1	<u>Streifenbreite und Profilabstand</u>	85
6.1.1	Verfahrensfehler, Unstetigkeiten im Orthophoto	85
6.1.1.1	Eigenschaften des Verfahrensfehlers	85
6.1.1.2	Einfluß des Verfahrensfehlers auf die Genauigkeit des Orthophotos	86
6.1.1.3	Unstetigkeiten im Orthophoto als Folge des Verfahrensfehlers	92
6.1.1.4	Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von der Streifenbreite Δx	98
6.1.2	Theoretische Untersuchungen zum Verfahrensfehler bei der differentiellen Entzerrung ausgewählter Standardflächen	104
6.1.2.1	Ebene als Objektfläche	107
6.1.2.2	Zylinder als Objektfläche	111
6.1.2.3	Kugel als Objektfläche	120
6.1.2.4	Kegel als Objektfläche	123
6.1.3	Untersuchung der maximalen Streifenbreite bei einem vorgegebenen zulässigen Verfahrensfehler	126

6.1.4	Folgerungen für die Wahl von Streifenbreite und Profilabstand	132
6.1.4.1	Maßnahmen zur Reduzierung der Verfahrensfehler	133
6.1.4.2	Möglichkeiten zur Verringerung der Auswerte- zeit bei Verwendung kleiner Spaltblenden	135
6.2	<u>Blendenbreite in Profileinrichtung</u>	138
6.2.1	Bildwanderung bei der Orthoprojektion	138
6.2.2	Theoretische Untersuchungen zur Bildwanderung bei der differentiellen Entzerrung ausge- wählter Standardflächen	139
6.2.3	Demonstration von Bewegungsunschärfen an praktischen Beispielen	144
6.2.4	Folgerungen zur Wahl der Blendenbreite	148
6.3	<u>Abtastgeschwindigkeit</u>	149
6.3.1	Empirische Untersuchungen zum Höhenabtastfehler	149
6.3.2	Beispiele für die Auswirkung von Höhenabtast- fehlern auf das Orthophoto sowie auf Schicht- liniendarstellungen	156
6.3.3	Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Objektneigung bzw. -krümmung	161
6.3.4	Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Oberflächenstruktur	164
6.3.5	Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Abtastgeschwindigkeit	166
6.3.6	Maßnahmen zur Reduzierung des Höhenabtastfehlers	167
6.4	<u>Überlegungen zur Wahl der Abfahrriichtung</u>	168
6.5	<u>Laufunterbrechung</u>	169
7.	<u>Weitere Gesichtspunkte bei der Herstellung von Architektur-Bildplänen</u>	173
7.1	<u>Abwicklungen und allgemeinere Projektionen</u>	173
7.2	<u>Höhendarstellung</u>	176
7.3	<u>Weiterverarbeitung von Halbtonbildern</u>	179
7.3.1	Photographische Weiterverarbeitung zu Bildplänen und Photokarten	179
7.3.2	Herstellen von Strichkarten durch manuelles Hochzeichnen von Halbtonbildern	181
7.3.3	Herstellen von Strichkarten durch automatische Bildwandlung	184
7.3.4	Kombinierte Verfahren	191

8.	<u>Allgemeine Übersicht über die bisherige Produktion von Orthophotos in der Architektur</u>	195
8.1	<u>Beispiele von Architektur-Bildplänen und kombinierten Strich-Halbton-Karten</u>	195
8.2	<u>Diskussion der Projektparameter für Aufnahme und Auswertung</u>	197
9.	<u>Genauigkeit orthophotographischer Auswertungen in der Architekturphotogrammetrie</u>	205
9.1	<u>Genauigkeit der einzelnen Verfahrensabschnitte</u>	205
9.1.1	Paßpunktsystem	205
9.1.2	Photogrammetrische Aufnahme	209
9.1.3	Zwischenprozesse	209
9.1.4	Modellbildung	212
9.1.5	Orthophotoherstellung	212
9.1.5.1	Genauigkeit der Ankopplung	212
9.1.5.2	Abbildegengenauigkeit	213
9.1.5.3	Verfahrens- und Abtastfehler	213
9.1.5.4	Überprüfung der Orthophotogenauigkeit an praktischen Beispielen	218
9.1.6	Orthophoto-Hochzeichnung, Stereokartierung	223
9.1.7	Photographische Weiterverarbeitung von Orthophotos	225
9.2	<u>Empirische Genauigkeitsuntersuchung an kombinierten Strich-Halbton-Plänen</u>	241
9.2.1	Streckengenauigkeit in den Bildplänen der Innenräume	243
9.2.2	Absolute Koordinatengenauigkeit in den kombinierten Strich-Halbton-Plänen	246
9.3	<u>Zusammenstellung und Vergleich der Genauigkeiten</u>	247
9.3.1	Orthophotogenauigkeit	247
9.3.2	Genauigkeit von kombinierten Strich-Halbton- Plänen, Hochrechnung	249

10.	<u>Zeitaufwand bei verschiedenen Auswerteverfahren</u>	253
10.1	<u>Orthophoto-Herstellung, Zeitaufwand und Kosten</u>	253
10.2	<u>Zeitvergleich Hochzeichnung - Stereokartierung</u>	257
11.	<u>Anwendungsbereiche und Grenzen von Differential-Entzerrung und Halbtondarstellung</u>	263
11.1	<u>Die Herstellung und Verwendung von Architektur- Bildplänen</u>	265
11.2	<u>Der Einsatz von Hochzeichnungstechniken</u>	272
11.3	<u>Die Stereokartierung</u>	273
12.	<u>Zusammenfassung und abschließende Beurteilung</u>	279
	Literaturverzeichnis	287
	Anhang A	297
	Anhang B	310
	Anhang C	324

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Einführung

Die Architekturphotogrammetrie als Meß- und Auswertemethode zur maßstäblichen Abbildung und Darstellung von Bauwerken und figürlichen Objekten hat, obwohl schon alt, erst in den letzten Jahren bei Kunsthistorikern, Architekten und Ingenieuren verbreitete Anwendung gefunden. Das Verfahren dient der Erfassung des Ist-Zustandes erhaltenswerter Objekte bei der Durchführung von Sanierungen und Restaurierungen sowie bei der baugeschichtlichen Dokumentation. Mit Hilfe der Photogrammetrie ist eine schnelle und vollständige Bauaufnahme möglich. Gegebenenfalls erscheint eine Kombination von konventioneller Handvermessung und terrestrischer Photogrammetrie als angebracht.

Die Verarbeitung der aufgenommenen Objektinformation erfolgt in der Regel durch linienweises Abfahren und graphische Wiedergabe der Detailstrukturen an einem photogrammetrischen Stereoauswertegerät. Diese Kartentechnik ist auf Objekte jeglicher Gestalt und Ausdehnung anwendbar. Der für die Zeichnung architektonischer Kleinformen notwendige Zeitaufwand ist dabei jedoch sehr stark von der darzustellenden Detailfülle abhängig. So entstehen bei der Kartierung fein gegliederter Fassaden oder barocker Kuppelfresken lange Auswertezeiten, die bis zu mehreren Wochen pro Bildpaar betragen können. Dadurch rückt die Frage der Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund. Die Reduzierung der wiederzugebenden Detailfülle durch starke Selektion bzw. Generalisierung des Bildinhalts kann jedoch nicht als allgemeine Lösung des Problems angesehen werden. Vielmehr erhebt sich die Forderung nach anderen Darstellungstechniken, die bei vertretbarem Aufwand eine dennoch befriedigende Objektdokumentation gewährleisten.

Dieser Vorstellung kommt der bei Architekten und Kunsthistorikern lange gehegte Wunsch nach maßstäblichen Halbtonbildern entgegen, die den gesamten Detailreichtum des aufgenommenen Objekts beinhalten. So werden Fassadenpläne schon seit längerer Zeit auf photographischer Basis hergestellt (GRUN /43/, KUPFER /80/, LÖSCHNER /84/, WROBEL /140/). Die optische Umbildung auf die Objektbezugsebene erfolgt jeweils durch ganzflächige Entzerrung. Dabei lassen sich die Bildneigungen der Aufnahme durch Projektion auf eine wiederum geneigte Fläche eliminieren. Vorsprünge und Vertiefungen gegenüber der Bezugsebene unterliegen aber weiterhin den Gesetzen der Zentralprojektion, was zu relativen Lageversetzungen und radialen Umklappungen führt. Die Methode der ganzflächigen Entzerrung kann also nur bei weitgehend ebenen Objekten angewandt werden.

Gerade in der Architektur liegen aber häufig gekrümmte oder räumlich gegliederte Objekte vor, die für die Umbildung zumindest einen verfeinerten Entzerrungsprozeß erfordern. Durch separate Transformation differentiell kleiner Bildelemente auf die Projektionsfläche ist es möglich, die zentralperspektive Aufnahme in eine genäherte Orthogonalprojektion (Orthophoto) umzuwandeln.

Die "Orthophototechnik" hat sich im topographisch-kartographischen Bereich in den letzten zehn Jahren erfolgreich in die Praxis eingeführt und wird heute zur Herstellung von Orthophotokarten (KRAUSS /78/, VOSS /136/, WINKELMANN /139/, van ZUYLEN /148/) sowie als Grundlage zur Hochzeichnung von Kartenentwürfen

(BECK /4/, KÖNIG /73/, STROBEL /131/) eingesetzt. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit bei der Darstellung nichtebenen Geländes. Diese Eigenschaften lassen eine Anwendung auch in der Architekturphotogrammetrie als sinnvoll erscheinen.

Von verschiedenen Seiten (CARBONNELL /15/, CIPA /20/, HARDEGEN /46/, MAUELSHAGEN /88/, SCHOLL /114/) wurde bereits auf eine mögliche Herstellung architektonischer Orthophotos hingewiesen. Zugleich mit den optimistischen Erwartungen bezüglich der vollständigen Detaildarstellung und der vermutlich hohen Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wurden aber auch Bedenken geäußert. Sie bezogen sich auf die Umbildung diskontinuierlicher Flächen sowie auf die Erfassung von Unstetigkeiten am Objekt. Inzwischen wurden an einigen Hochschulinstituten Versuche zur differentiellen Entzerrung architektonischer Aufnahmen durchgeführt (DÖHLER /24/, FERRI und FONDELLI /28/, HÖHLE /57/, JACHIMSKI /59/61/, KRAUS und TSCHANNERL /76/, SITEK /125/126/, STEPHANI /129/, VOJNOVIĆ und MARČETA /135/). Erste eigene Erfahrungen entstanden 1973 bei der Anwendung der Methode für die Darstellung reich verzierter Wandflächen in Schloß Linderhof (SEEGER /120/).

1.2 Aufgabenstellung

Das Orthophotoverfahren wurde bisher nur versuchsweise auf architektonische Objekte angewandt. Ein Grund dafür ist in der noch ungenügenden Erfahrung bei der Anpassung terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahmetechniken an die Gegebenheiten der für Luftbildauswertung konzipierten Orthoprojektionsgeräte zu sehen. So entstanden sowohl bei den eigenen Experimenten als auch bei den an auswärtigen Instituten durchgeführten Arbeiten zahlreiche Probleme. Dazu gehören die Einschränkung der Auswertung durch Gerätebereiche (Bildweite, Basis, z-Bereich), sowie das verstärkte Auftreten von geometrischen und optischen Fehlern im Orthophoto (Verfahrensfehler, Abtastfehler, Bewegungsunschärfen).

Die Aufgabe dieser Arbeit besteht nun darin, die genannten Schwierigkeiten und Fehlereinflüsse zu analysieren und mögliche Lösungen zur Verbesserung der gesamten Verfahrenstechnik für Aufnahme und Auswertung zu geben. Durch Vergleich der Genauigkeit und des Zeitbedarfs soll das Orthophotoverfahren der konventionellen Stereokartierung gegenübergestellt werden. Die ersten Versuche haben bereits gezeigt, daß sich nur bestimmte Objektgruppen für die differentielle Umbildung eignen. Die Abgrenzung der Einsatzmöglichkeiten stellt somit einen wichtigen Teil der Untersuchung dar. Die Arbeit schließt mit einer Empfehlung für die praxisgerechte Durchführung von Differentialentzerrungen im Bereich der Denkmalpflege.

Die Untersuchung entstand am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann danke ich für die Betreuung und fachliche Unterstützung. Für zahlreiche Vorschläge und Anmerkungen aus geodätischer Sicht möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. techn. F. Löschner bedanken. Herr Prof. Dr.-Ing. G. Nagel gab die Anregung zu dieser Arbeit sowie Hinweise für die Architekturanwendung des Verfahrens, wofür ich auch ihm herzlich danken möchte. Mein ganz besonderer Dank gilt der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, die mir das off-line Orthoprojektionssystem GZ-1 freundlicherweise für längere Zeit zur Verfügung gestellt hat.

2. Aufgaben und konventionelle Techniken

der Architektur-Photogrammetrie

2.1 Aufgaben der Architekturphotogrammetrie

Die geometrische Erfassung und Darstellung des Ist-Zustandes von Bauwerken mit Hilfe photographischer Meßbilder wird als "Architekturphotogrammetrie" bezeichnet. Ihr wichtigstes Ergebnis sind maßstäbliche Pläne und Zeichnungen.

Nach der "Haager Konvention" (1954), einem von den Vereinten Nationen angeregten und von 66 Staaten unterzeichneten Völkerrechtsvertrag zum Schutze von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten (FORAMITTI /35, S. 36 / 37, S. 63/) und der internationalen "Charta von Venedig" (1964) über die Pflege und Restaurierung von Denkmälern und historischen Stätten (FORAMITTI /37, S. 69/) ist jedes Signatarland verpflichtet, durch Bestandsaufnahme und Dokumentation zur Sicherheit seines Kulturgutes beizutragen. Photogrammetrische Methoden sind hierbei das wichtigste Hilfsmittel zur schnellen sowie vollständigen Erfassung und Wiedergabe einer großen Zahl bauhistorisch wertvoller Objekte.

Für die Restaurierung oder Rekonstruktion beschädigter bzw. zerstörter Bauwerke (z.B. Klosterkirche Neresheim, NAGEL /101/) sowie für die Sanierung von Altstadtgebieten (z.B. Heidelberg NAGEL /100/) werden maßstäbliche Kartierungen in Form von Rissen, Schnitten und Ansichtsplänen benötigt. Die Wiedererrichtung von Baudenkmalern (z.B. Abu Simbel, Ägypten, CARBONNELL /16/) wird erleichtert, wenn photogrammetrische Aufnahmen, Detailzeichnungen und Schichtliniendarstellungen vorliegen. Die genaue Kenntnis über den Ist-Zustand gefährdeter Objekte dient als Grundlage für statische Berechnungen.

2.2 Techniken und Geräte

Bereits in den Jahren 1851 - 1860 wurden von Laussedat, Brunner, Porro und Meydenbauer einfache terrestrische Meßkammern gebaut (von GRUBER /42, S. 174/). MEYDENBAUER /92/ benutzte als erster die Bildmessung für Zwecke der Bauaufnahme und war damit der Begründer der Architekturphotogrammetrie. Im Jahre 1885 wurde durch ihn in Berlin die "Königlich Preußische Meßbildanstalt" geschaffen und als photogrammetrisches Denkmalarhiv eingerichtet (CARBONNELL /15/). Die Auswertung der Bilder erfolgte damals nach einfachen Einschneideverfahren.

Heute steht der Architekturphotogrammetrie ein vielseitiges Angebot an terrestrischen Einzel- und Stereomeßkammern sowie speziellen Auswertegeräten zur Verfügung. Die Arbeitsmethoden sind konventionell und entsprechen teilweise den Techniken der Luftphotogrammetrie. Darüber hinaus wird jedoch in der Architekturvermessung durch die Verschiedenartigkeit der aufzunehmenden Objekte und ihrer jeweiligen Umgebung eine individuelle Planung von Aufnahme und Auswertung notwendig.

2.2.1 Photogrammetrische Aufnahme

Die terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme von Bauwerken unterscheidet sich sehr wesentlich von einer topographischen Geländeaufnahme im Rahmen eines Bildfluges. Kurze Aufnahmeentfernungen (oft kleiner als 5 m) werfen Probleme der Kammerfokussierung und Tiefenschärfe auf. In vielen Fällen werden durch die Unzugänglichkeit der Umgebung Schräg- oder Steilaufnahmen erforderlich. Licht- und Beleuchtungsverhältnisse sind bisweilen ungünstig. Sie haben gerade bei terrestrischen Arbeiten einen entscheidenden Einfluß auf die Qualität der Meßbilder.

Die Wahl der zu verwendenden Kammer ist neben zahlreichen aufnahmetechnischen Faktoren vom Objekt und von der Art der späteren Auswertung abhängig. Sind großflächige Fassaden oder enge Innenräume zu kartieren, so ist die Verwendung von Weitwinkelkamern zweckmäßig. Für spätere Detailzeichnungen von Figuren, Stuckornamentik oder Malerei sowie für die Erstellung von Bildplänen sollten die Aufnahmen dagegen mit langbrennweitigen Kamern durchgeführt werden.

Der Architekturphotogrammetrie liegt ein vielseitiges Angebot an terrestrischen Aufnahmekammern vor. Die Firmen Zeiss, Wild, Jenoptik, Galileo und Hasselblad liefern Einzelmeßkamern mit Brennweiten zwischen 45 mm und 200 mm (teilweise fokussierbar) für Aufnahmeentfernungen von 0,9 m bis ∞ . Die Bildformate liegen zwischen 6 cm x 6 cm (Hasselblad MK 70) und 18 cm x 24 cm (Prototyp AMK 7/1824, MEYER /96/). Die meisten Kamern besitzen Zusatzadapter für feste oder stufenlos einstellbare Neigungswinkel.

Neben den orientierungsfähigen Einzelkamern gibt es für die Architekturphotogrammetrie spezielle Stereomeßkamern, die entweder feste (40, 100, 120, 200 cm) oder variable Basen (30 cm bis 160 cm) aufweisen. Die Aufnahmeachsen der beiden Teilkamern sind parallel zueinander und senkrecht zur Basis ausgerichtet, so daß bei der Auswertung mit hinreichender Genauigkeit vom stereophotogrammetrischen "Normalfall" ausgegangen werden kann.

2.2.2 Photogrammetrische Auswertung

Die Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen kann mit Hilfe numerischer, graphischer oder photographischer Techniken erfolgen. (Abb. 2/1). Auch die Kombination mehrerer Auswerteverfahren ist möglich.

Die numerische Auswertung wird in der Architekturphotogrammetrie bisher nur wenig angewandt. Sie dient vornehmlich der Paßpunktbestimmung an Bauwerken (HELL /49/, KUPFER /80/, MOHL und MOHR /7977, WROBEL /140/141/) und der punktwisen Erfassung von Deformationen (CARBONNELL /17/18/). Für die Einzelpunktmessung stehen leistungsfähige Mono- und Stereokomparatoren (Meßgenauigkeit: 1 - 3 μ m) zur Verfügung.

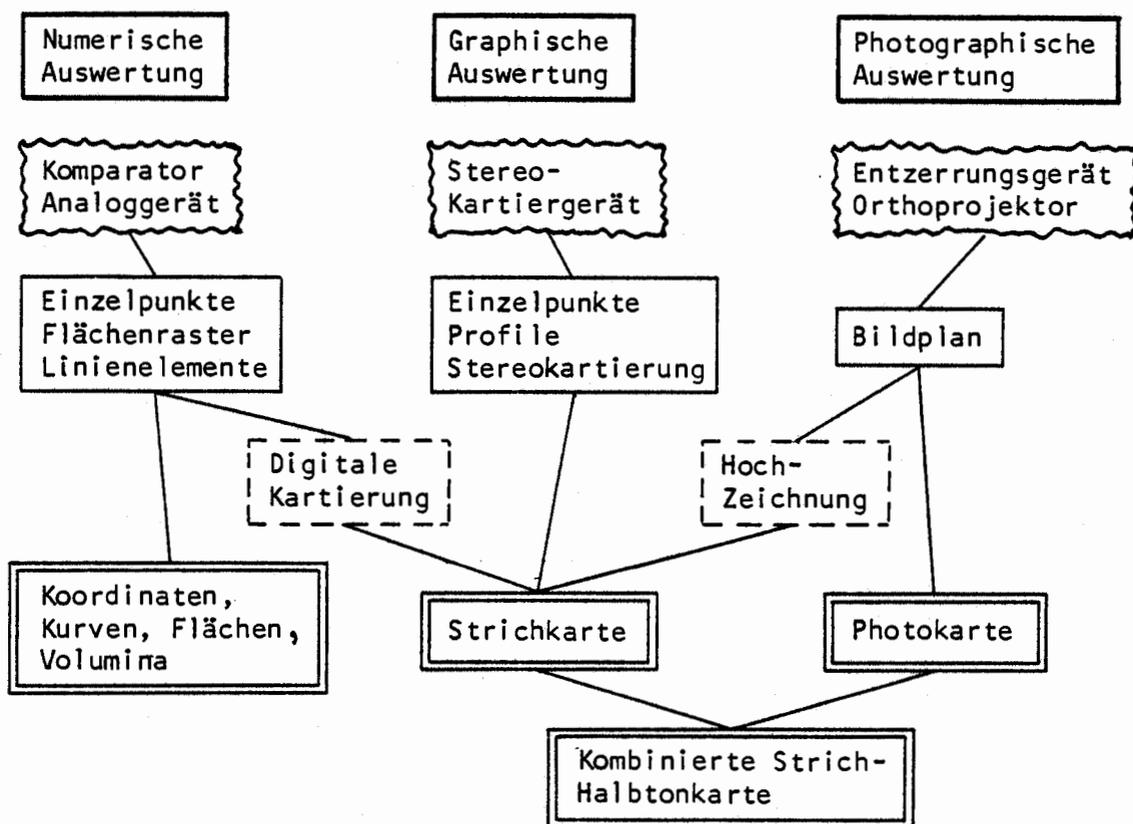


Abb. 2/1 Photogrammetrische Auswertung nach numerischen, graphischen und photographischen Methoden

Die neuere Datentechnik hat die Anwendungsmöglichkeiten der numerischen Verfahren erweitert. So können auch graphische Endprodukte über numerische Zwischenstufen erhalten werden. Durch Abtastung von Objektstrukturen und Linienelementen in einem Stereoauswertegerät entstehen digitale Punktfolgen, die auf Magnetband (Lochkarten, Lochstreifen) ausgegeben werden. Ein Vorteil der numerischen Verarbeitung ist, daß die für die absolute Modellorientierung sowie für perspektive Darstellungen erforderlichen Transformationen an einem Rechner durchgeführt werden. Die Kartierung der digitalisierten Linien erfolgt nach eventueller Manipulation an einem Zeichenautomaten. Erste architektur-photogrammetrische Anwendungen dieser Technik (CARBONNELL /17/18/) liegen im Bereich der Stadtplanung vor.

Der überwiegende Teil an Architekturaufnahmen wird jedoch nach wie vor graphisch ausgewertet. In Form der linienhaften Stereokartierung entstehen auf einem Intern- oder Externzeichentisch eines Stereoauswertegerätes (als sogenannte Manuskripte) Ansichtspläne, Grund- und Seitenrisse sowie Schichtliniendarstellungen. Die Bleistiftauswertung erfordert bisweilen eine Reinzeichnung in Tusche.

Einige Auswertestellen sind inzwischen zur direkten Schichtgravur übergegangen (CLASEN /23/, DÖHLER /26/), um die aufwendige graphische Überarbeitung einzusparen.

Für die Stereokartierung terrestrischer Aufnahmen können im Prinzip alle photogrammetrischen Auswertegeräte eingesetzt werden, wenn eine Angleichung der Bildformate und Brennweiten möglich ist. Konvergente oder stark geneigte Aufnahmen erfordern jedoch speziell darauf eingerichtete Auswertegeräte. Die bereits oben erwähnte Spezialisierung einiger Aufnahmekammern auf den stereophotogrammetrischen "Normalfall" führte zur Entwicklung besonderer Kartiergeräte, bei denen die relative und absolute Orientierung aus dem Zentrieren der Photoplatten sowie der Maßstabsbestimmung bestehen. Da die Orientierungsprobleme dadurch zumindest theoretisch weitgehend entfallen, ist ein einfaches Arbeiten mit derartigen Geräten möglich.

Als Beispiele für Geräte dieser Bauart sind der Zeiss Terragraph, der Wild Autograph A 40 und der Technocart von Jenoptik zu nennen. Durch den Einsatz mechanischer Neigungsrechner können auch stark geneigte Aufnahmen (Terragraph: $\pm 30^\circ$, $\pm 70^\circ$, Autograph A 40: $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$, Technocart: $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$) zur Kartierung von Grund- und Aufriß verwendet werden.

Die photographische Auswertung architekturphotogrammetrischer Aufnahmen war bis heute auf die Herstellung ganzflächig vergrößerter oder entzerrter Fassadenbildpläne beschränkt (GRÜN /43/, KUPFER /80/, LÖSCHNER /84/, WROBEL /140/). Die bisherigen Versuche mit der Orthophototechnik bei der Halbtondarstellung gekrümmter Flächen in der Architektur (DÖHLER /24/, FERRI und FONDELLI /28/, HÖHLE /57/, JACHIMSKI /59/61/, SEEGER /120/, SITEK /125/126/, STEPHANI /129/, VOJNOVIĆ und MARČETA /135/) waren ermutigend und lassen eine zunehmende Anwendung der Methode erwarten. Neue Möglichkeiten der allgemeinen photographischen Umbildung (Abwicklung, konforme Abbildung) eröffnen sich durch den Einsatz von digital steuerbaren Orthoprojektoren (KRAUS und TSCHANNERL /76/).

Im folgenden wird auf die numerischen Verfahren nicht mehr eingegangen. Die Abschnitte 2.3 und 2.4 enthalten jedoch Ergänzungen zur Stereokartierung sowie Anmerkungen zur Herstellung maßstäblicher Halbtonebilder durch einfache Vergrößerung oder ganzflächige Entzerrung.

2.3 Die Problematik der graphischen Detailauswertung bei der Stereokartierung

Die Stereokartierung an einem photogrammetrischen Auswertegerät leistet eine maßstäbliche Abbildung räumlicher Gegenstände, bezogen auf eine gewählte Rißebeine (Grundriß, Aufriß, Seitenriß). Das Verfahren der Stereokartierung ist hinreichend bekannt und in der architekturphotogrammetrischen Praxis etabliert (BERLING /6/, RASLAN /110/, SCHWIDEFSKY /116/). Auch über die Genauigkeit der Darstellung liegen Angaben vor (BURKHARDT /14/, JÄNSCH /62/), weswegen auf die Technik selbst nicht weiter eingegangen werden soll. Im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist jedoch das Problem der graphischen Detailauswertung von Interesse.

Die detaillierte Wiedergabe feiner Objektstrukturen durch linienweises Abfahren der Bildkonturen im Stereoauswertegerät ist bei stark gegliederten, verzierten oder bemalten Objekten besonders aufwendig. Deshalb steht aus wirtschaftlichen Gründen stets die Frage im Vordergrund, welche Kleinformen bei der architektonischen Bauaufnahme dargestellt werden müssen.

2.3.1 Darzustellende Detailfülle

Im Gegensatz zur topographischen Kartierung für die Erstellung und Fortführung amtlicher Kartenwerke, über deren Informationsgehalt Vorschriften und Musterblätter Auskunft geben, bestehen in der Denkmalpflege keine Regelungen bezüglich des wiederzugebenden Formenreichtums. Es gibt außer einer methodisch orientierten Dokumentationsschrift von GOMOLISZEWSKI /39/ (in polnischer Sprache) kein "Handbuch der Bauaufnahme", in dem die für Restaurierungszwecke notwendigen Kartierarbeiten unter Angabe der Vollständigkeit, der Maßstäbe oder z.B. der Strichstärken aufgezeigt wären. Von Seiten der Denkmalämter oder ähnlicher Institutionen sind bisher keine Erlasse zur Durchführung und Auswertung von Bauaufnahmen ergangen.

Diese Tatsache räumt auf der einen Seite eine weitgehende Freiheit und Flexibilität des Verfahrens ein und erlaubt eine individuelle Anpassung an das jeweilige Objekt bzw. die Aufgabenstellung. Auf der anderen Seite aber entstehen dadurch die unterschiedlichsten Pläne und Zeichnungen, die sich nicht mehr in einheitlicher Form dokumentieren lassen. Zudem werden der Informationsgehalt der Zeichnungen und die Qualität der Darstellung zu stark von wirtschaftlichen Faktoren beeinflusst. So weisen Kartierungen, die unter privatwirtschaftlichen Bedingungen bearbeitet wurden, in der Regel eine stark reduzierte Detailfülle und Genauigkeit auf. Aus Kostengründen begnügt sich der Auftraggeber in vielen Fällen mit einer Mindestleistung. Im Gegensatz dazu stehen Auswertungen im Rahmen von Forschungs- und Studienarbeiten. Hier ist die Frage der Wirtschaftlichkeit sekundär, so daß sich unter Umständen ein Perfektionismus bei der Anfertigung der Pläne einstellt.

Kritische Bemerkungen zur optimalen Ausgestaltung architekturphotogrammetrischer Kartierungen befinden sich bei FIETZ /30/, KASPER /67/, KNECHT /69/ und KNÖPFLI /70/. Danach sollte zwar versucht werden, eine Darstellung der Details in "Faksimile-Präzision" zu erreichen, der Aufwand und die geforderte Genauigkeit sollten aber in jedem Fall sowohl dem Objekt als auch dem Zweck der Bauaufnahme (z.B. baugeschichtliche Forschung, Schadensdokumentation, Schaffung von Planungsunterlagen) angepaßt sein. Faksimile-Präzision bedeutet bei der Bauaufnahme eine möglichst wirklichkeitstreue, "sinnvoll ausführliche" Wiedergabe des zu erhaltenden oder zu rekonstruierenden Gegenstandes. Trotz der unklaren Definition herrscht in der Praxis jedoch eine weitgehend einheitliche Auffassung über die darzustellende Detailfülle.

Der Grad der Selektion und Abstraktion bei der Kartierung architektonischer Objekte ist niedrig im Vergleich zur topographischen Geländeaufzeichnung. Auch sehr kleine Details lassen sich im Maßstab 1:5 oder 1:10 ohne Generalisierung und Verdrängung darstellen. Die Gefahr des "Überladens" der Zeichnung ist normalerweise auch im Maßstab 1:25 noch nicht zu befürchten, da der gegenseitige Abstand zwischen Objektdetails an Außenfassaden selten weniger als 2 cm (d.h. ca. 1 mm im Plan 1:25) beträgt. Als Ausnahmebeispiel seien ionische oder korinthische Kapitelle angeführt. Eine vollständige Objekterfassung ist also in den meisten Fällen von der Wiedergabe her möglich und im Hinblick auf eine qualifizierte Dokumentation auch erforderlich.

Die graphische Darstellung detaillierter Objektstrukturen am Stereoauswertegerät erfolgt meist im Anschluß an die Kartierung baulicher Hauptelemente. Im Gegensatz zur Auswertung langer, geradliniger Kanten, Rahmen oder Umrisse ist jedoch das Abfahren von Ornamenten und bildhaften Details eine bezüglich Zeitbedarf, Gerätebelegung und Personaleinsatz höchst aufwendige Angelegenheit.

2.3.2 Zeitbedarf

Die Zeichenzeit am Stereoauswertegerät hängt in entscheidendem Maße von der Linienstruktur der darzustellenden Objektdetails sowie von ihrer Tiefengliederung ab. Wie stark die Verhältnisse schon bei einfachen Linienstrukturen variieren, wird in Tab. 2/2 an einem Beispiel (aus Abschnitt 10.2) gezeigt.

Geraden, achsparallel, ohne Höhe	1
Geraden, schräg, ohne Höhe	2
Geraden, achsparallel, mit Höhe	4
Geraden, schräg, mit Höhe	6
Kurven, ohne Höhe	4
Kurven, mit Höhe	9

Tab. 2/2 Zeitfaktoren für die Darstellung von Linien gleicher Länge (bezogen auf die Zeichenebene)

In Tabelle 2/2 sind die Verhältnisse von Zeichenzeiten für Linien gleicher Länge und unterschiedlicher Lage zum Gerätekoordinatensystem angegeben. Beim Abfahren mit Höhennachführung (Fußscheibe) ergeben sich ca. 3-fache Zeichenzeiten gegenüber der Kartierung zweidimensionaler Strukturen. Liegen die abzufahrenden Linien schräg zum x/y-Koordinatensystem des Auswertegerätes oder sind sie gekrümmt, so dauert die Auswertung 2 - 5 mal so lange wie bei der Nachführung gerätesystemparalleler Kanten.

An diesem einfachen Versuch wird demonstriert, daß die Zeichenzeit am Stereokartiergerät um so mehr anwächst, je feingliedriger und schwingungsreicher die Objektfläche verziert ist. Das gilt in

besonderem Maße für eine zusätzliche räumliche Gliederung der Details. Als Beispiele können Stuckornamentik, Steinverbände und Schnitzwerk sowie Fresken oder Mosaiken erwähnt werden.

Über den Zeitaufwand für die Stereokartierung von stark detaillierten Objekten liegen nur wenige Angaben vor, die einen Vergleich oder eine Aufstellung von Normzeiten gestatten. Objektdichte und Detailfülle sind Parameter, die in der topographischen Kartographie feste Werte annehmen und in Musterblättern für bestimmte Maßstäbe und Darstellungsvarianten niedergelegt sind. Dagegen treten in der Architekturphotogrammetrie Keinformen und Verzierungen in solcher Vielgestalt und Unterschiedlichkeit auf, so daß der Begriff "Detailfülle" und damit die Angabe von Auswerte- und Zeichenzeiten nur relative Gültigkeit besitzen. In architekturphotogrammetrischen Institutionen werden zur Leistungsabrechnung mittlere Tabellenwerte herangezogen, die sich nach Kartiermaßstab und Darstellungsdichte aufgliedern. Einige Erfahrungszeiten des Institut Géographique National (IGN), Paris, sind in Tabelle 2/3 wiedergegeben.

Kartier- maßstab	Detailfülle			
	gering	normal	hoch	sehr hoch
1 : 100	0,4	0,8	1,3	2
1 : 50	0,8	1,7	3	5
1 : 20	2	4	8	15

Tab. 2/3 Reine Zeichenzeit ohne Tusche-Überarbeitung (Std.pro 10 m² Wandfläche) in Abhängigkeit von Zeichenmaßstab und Detailfülle. (Mittelwerte, IGN Paris, Angaben nach persönlicher Mitteilung)

Die der Tabelle 2/3 zu Grunde gelegte Klassifizierung der Darstellungsdichte läßt sich nur schwer präzisieren. Aus den Zahlenwerten ist aber trotzdem zu erkennen, daß die Zeichenzeit bei zunehmender Detailfülle stark anwächst.

Die Abbildungen 2/4 bis 2/7, die den Ausstellungsbeiträgen zum Internationalen Kurs für Architekturphotogrammetrie in Heerbrugg (1975) entnommen sind, enthalten Beispiele reich verzierter Objekte und Fassaden. Die jeweils beigefügten Zeitangaben verdeutlichen anschaulich, daß die Stereokartierung bei derartig hohem Detailreichtum außerordentlich viel Zeit in Anspruch nimmt.

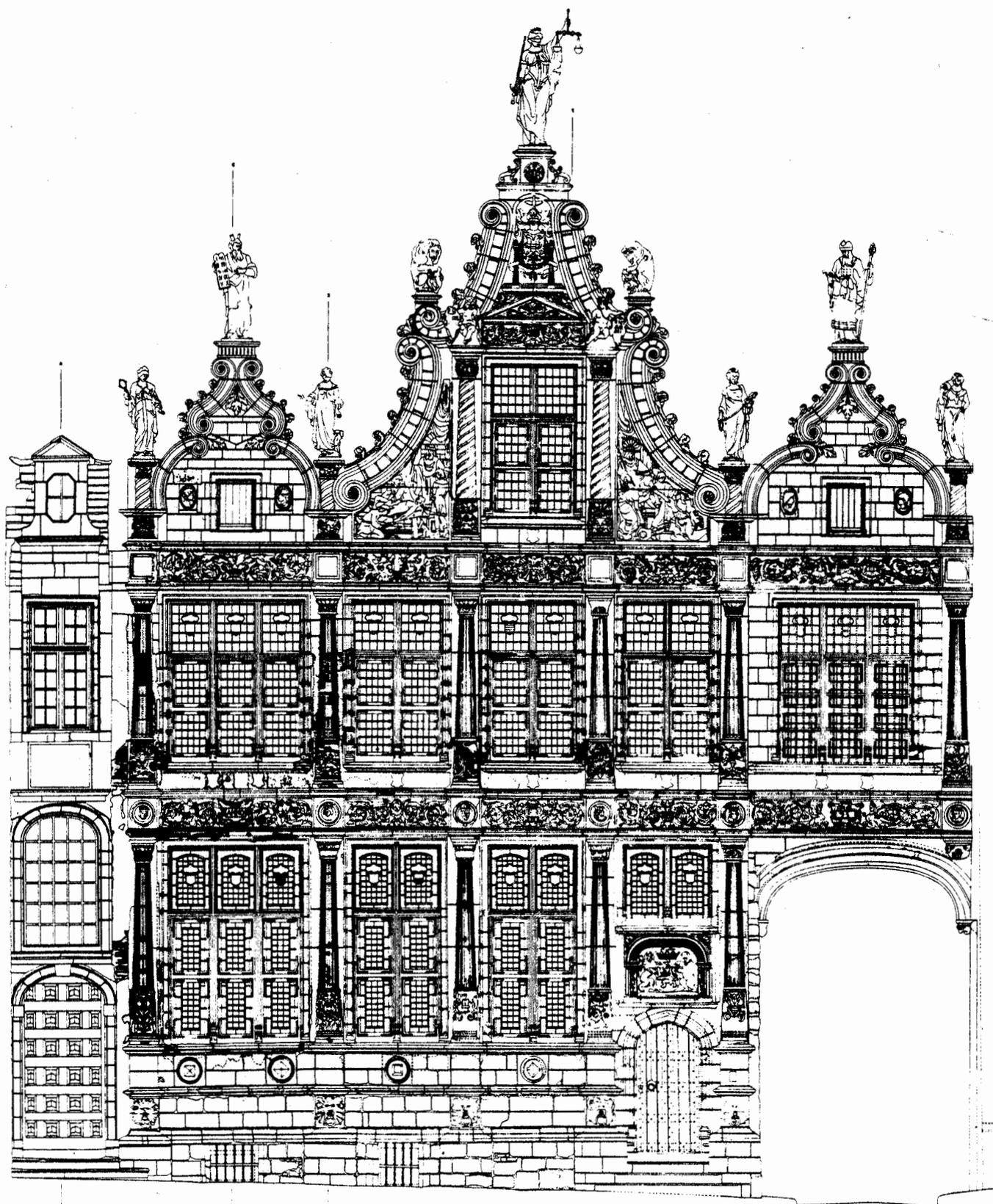


Abb. 2/4 Beispiel für hohen Detailreichtum in der graphischen Darstellung:

Zeitaufwand: Stereokartierung (1:20): 100 Stunden
Tuschezeichnung: 80 Stunden

Bearbeitung: De Waal, Archi Foto B.V., Holland

Objekt: Altes Gerichtsgebäude in Brügge, Belgien

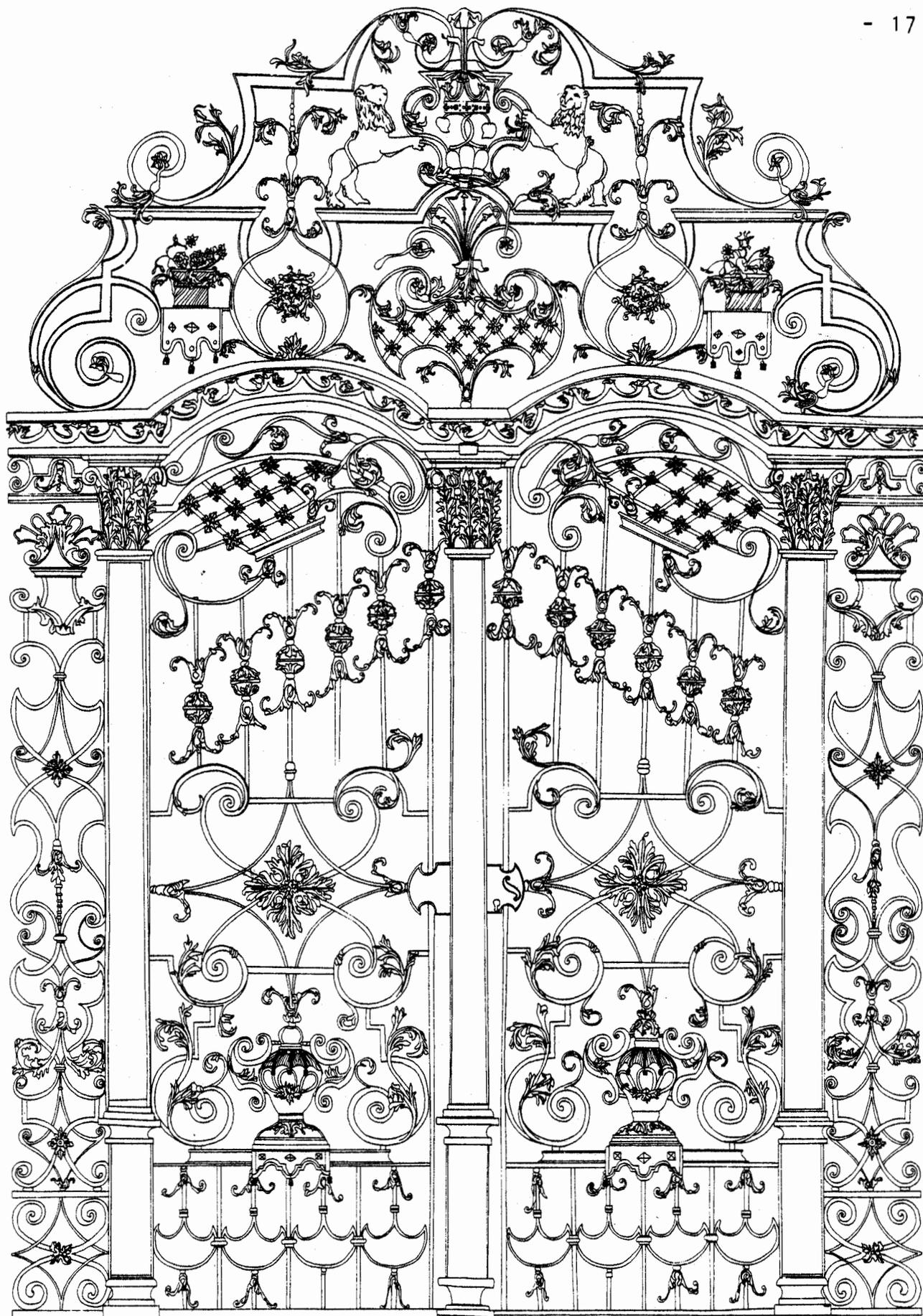


Abb. 2/5 Beispiel für hohen Detailreichtum in der graphischen Darstellung:

Zeitaufwand für die Stereokartierung im Maßstab 1:5
(ohne Tuschezeichnung) : 30 Stunden

Bearbeitung: Bundesdenkmalamt, Wien

Objekt: Gittertor in der Klosterkirche Stams, Tirol

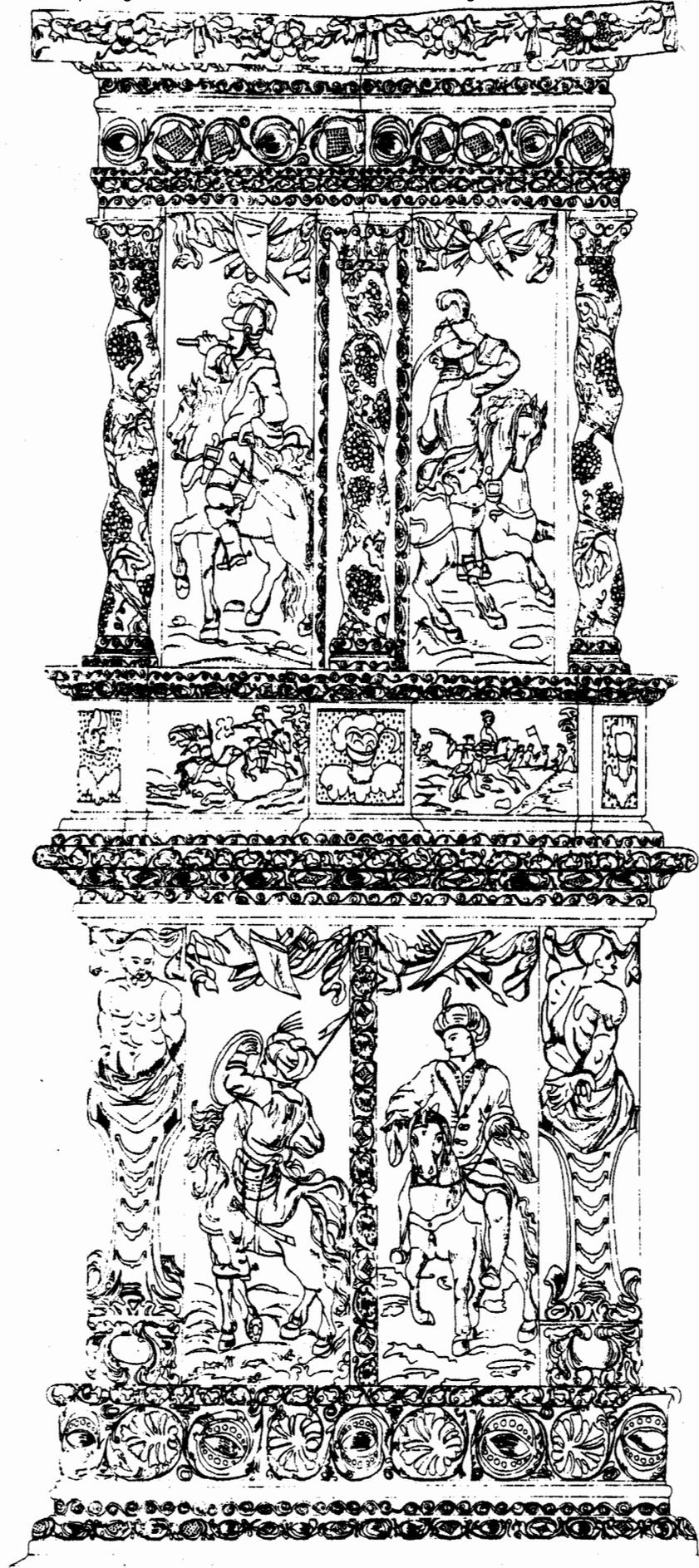


Abb. 2/6 Beispiel für hohen Detailreichtum in der graphischen Darstellung:
Zeitaufwand für die Stereokartierung im Maßstab 1:5
(ohne Tuschezeichnung): 40 Stunden
Bearbeitung: Bundesdenkmalamt, Wien
Objekt: Kamin im Volkskunstmuseum Innsbruck, Tirol

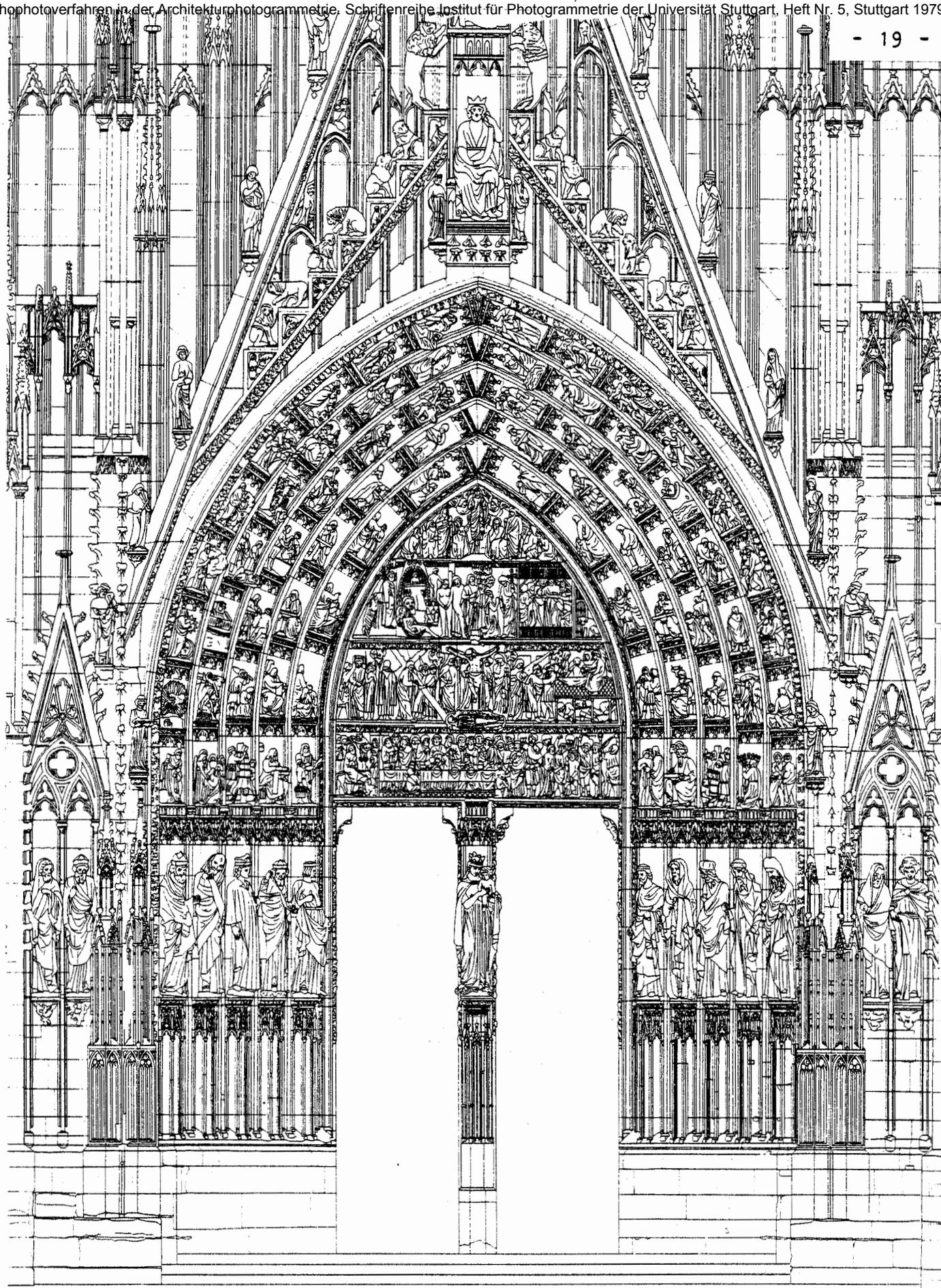


Abb. 2/7 Beispiel für hohen Detailreichtum in der graphischen Darstellung:
Zeitaufwand für die Stereokartierung im Maßstab 1:50
(ohne Tuschezeichnung): ca. 200 Stunden
Bearbeitung: Institut Géographique National, Paris
Objekt: Straßburger Münster, Hauptportal

2.3.3 Weitere Gesichtspunkte zur Stereokartierung

Gerätebelegung: Verbunden mit der durch langwierige Detailzeichnungen erhöhten Auswertzeit ist die Dauerbelegung der Stereokartiergeräte und Zeichentische. Es wäre erwünscht, diejenigen Zeichenaufgaben, die nicht im Zusammenhang mit der Darstellung gesamtbaulicher Elemente (z.B. Fenster, Türen, Rahmen und Pfeiler) stehen, durch die Verwendung anderer graphischer Methoden zu dezentralisieren, um damit das Stereokartiergerät zu entlasten.

Personaleinsatz: Die topographische Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen erfolgt in der Regel durch kartographisch geschulte Operateure. Dagegen spielen bei der Interpretation und Darstellung architektonischer Detailstrukturen und ornamentaler Kleinformen Gesichtspunkte der Architektur, Denkmalpflege oder Kunstgeschichte eine Rolle, so daß für den Auswerter eine entsprechende Schulung und Einarbeitung sowie Spezialisierung erforderlich werden. Durch eine Dezentralisierung der Arbeiten und die damit verbundene Aufgabenteilung kann die Interpretation auch dem Anwender selbst überlassen werden.

Die angesprochenen Kriterien (Zeitbedarf, Gerätebelastung, Personaleinsatz) führten in der topographischen Photogrammetrie schon vor Jahren zur Anwendung von Verfahren, die die Stereokartierung ergänzen oder zum Teil bereits ersetzen:

- die Herstellung von entzerrten Halbtonbildern und Photokarten sowie
- die Hochzeichnung von Kartenentwürfen aus entzerrten Halbtonbildern.

Diese Techniken sind auch in der Architekturphotogrammetrie anwendbar und werden verschiedentlich bereits eingesetzt.

2.4 Photokarten, Abgrenzung der Verfahren

2.4.1 Tendenz zu Halbtonbildern

Der große Bedarf an Planunterlagen und topographischen Karten aller Maßstäbe war in der Kartographie ausschlaggebend für die zunehmende Verwendung von Bildplänen und Photokarten. Zum Beispiel wird in Nordrhein-Westfalen seit 1969 die Deutsche Grundkarte im Maßstab 1:5000 als Photokarte hergestellt. Als Grundlage dafür dienen entzerrte bzw. differentiell entzerrte Halbtonbilder (KRAUSS /78/, VOSS /136/). Auch im kleinmaßstäbigen Bereich, z.B. bei der Darstellung dünn besiedelter Regionen oder arider Wüstengebiete, hat sich die Photokarte als Alternative zur Strichkarte durchgesetzt (WINKELMANN /139/, van ZUYLEN /148/).

Die Vorteile der Halbtontechnik im topographisch-kartographischen Anwendungsbereich werden allmählich erkannt. Sie geben zu der Vermutung Anlaß, daß auch bei architekturphotogrammetrischen Aufgaben ein wirkungsvoller Einsatz möglich ist. Dementsprechend wird die Anwendung von Bildplänen in der Architekturvermessung in zu-

nehmendem Maße von Architekten, Bauhistorikern und Restauratoren angeregt. Neben der auch im terrestrischen Bereich wirtschaftlichen Herstellung (siehe Abschnitt 10) besteht vielfach ein direktes Interesse an Halbtondarstellungen. Folgende Gründe können hierfür angegeben werden:

1. Die Photokarte verbindet den vollen Detailreichtum des photographischen Bildes mit der Genauigkeit einer photogrammetrischen Kartierung, falls geeignete Entzerrungsverfahren zur Anwendung kommen.
2. Kleinformen und Details erfahren keine Vorinterpretation und Generalisierung durch den photogrammetrischen Operateur. Die gesamte Information bleibt im Halbtonbild erhalten.
3. Die Auswahl und Interpretation der für bestimmte Aufgaben wichtigen Details kann durch die jeweiligen Kartenbenutzer (z.B. Architekten oder Bauhistoriker) erfolgen.
4. Gerade im architektonischen Anwendungsbereich gelten Photographien als anschaulicher und dem Betrachter vertrauter als Strichkartierungen.
5. Die Halbtondarstellung eignet sich besonders für die Wiedergabe des Objektzustandes. Strichzeichnungen dagegen dienen zur Erläuterung der Objektstruktur sowie zur Interpretation konstruktiver Zusammenhänge (Fachwerk).
6. Die photographische Verarbeitungstechnik macht Farbdarstellungen möglich, die die Detailinterpretation erleichtern und zudem die ästhetische Wirkung der Objekte bis zum graphischen Endprodukt bewahren.

2.4.2 Hochzeichnung aus maßstäblichen Halbtonbildern

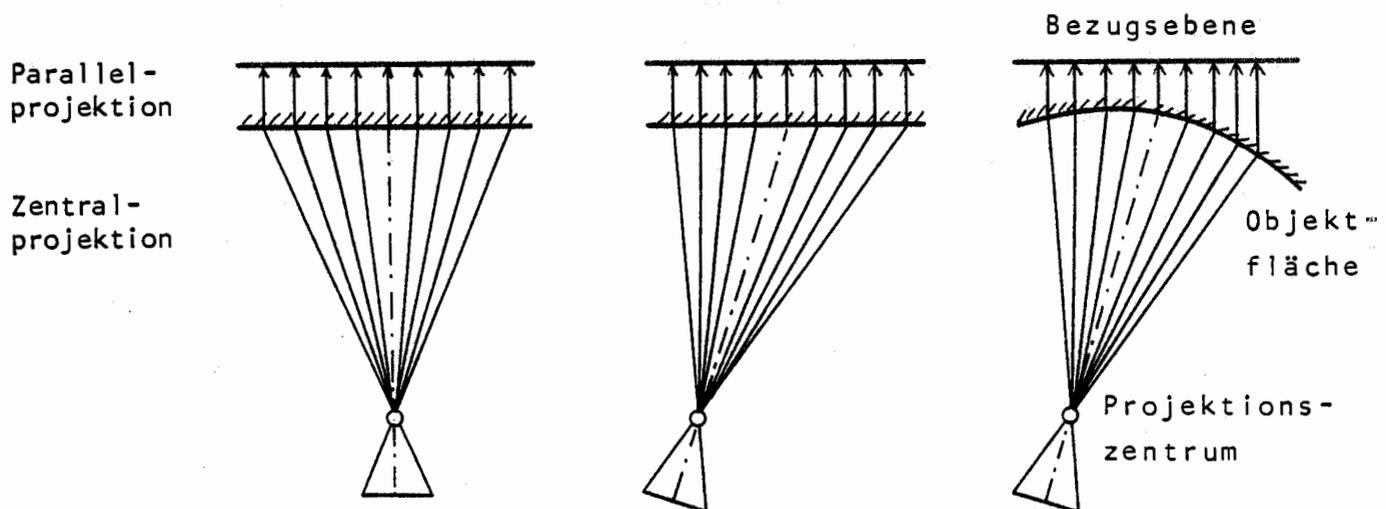
Halbtonbilder können also ein graphisches Endergebnis darstellen, sei es als einfaches photographisches Bild oder mit entsprechender Annotation als Photokarte. Sie können aber auch ganz allgemein als Zwischenprodukt zur Ableitung von Strichkarten durch Hochzeichnen dienen.

In der Kartographie wird diese Methode vor allem zur Kartennachführung und Kartenergänzung verwendet. So werden beispielsweise im Landesvermessungsamt Baden-Württemberg Orthophotos im Maßstab 1:10 000 ausschließlich als Grundlage zur Hochzeichnung von Grundrißentwürfen für die Laufendhaltung der topographischen Karten 1:25 000 und 1:50 000 hergestellt (KÖNIG /73/, STROBEL /131/). Umfangreiche Untersuchungen der Commission D der OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Experimentales) haben gezeigt, daß die Hochzeichnung von Kartenentwürfen aus Orthophotos bei etwa gleicher Vollständigkeit und Genauigkeit nur ca. 30 % der Zeit benötigt, die für eine Stereokartierung aufgewendet werden muß (BECK /4/, SEEGER /119/). Allerdings bestehen gewisse Schwierigkeiten beim Erkennen und bei der Interpretation von Details, die aber durch eine stereoskopische Überarbeitung weitgehend behoben werden können.

Die Hochzeichnungstechnik wird in der Architekturphotogrammetrie zur partiellen Ergänzung der Stereokartierung bereits angewandt. So werden Kleinformen wie Steinverbände, Kapitelle, Figuren oder Ornamente aus Amateuraufnahmen sowie aus Detailvergrößerungen des Zentralbereichs von Meßbildern unmittelbar übernommen.

2.4.3 Abgrenzung der Verfahren für die Herstellung von Bildplänen

Die Direktverwendung von Halbtonbildern sowie die Gewinnung von Planentwürfen durch Hochzeichnen setzen ein Bildmaterial voraus, das den geometrischen Anforderungen, die an eine Strichkarte gestellt werden, in gleicher Weise genügt. Die Halbtonbilder müssen also einer zumindest genäherten Parallelprojektion des dargestellten Objekts auf eine Bezugsebene entsprechen (Abb. 2/8). Von einer Abwicklung wird hier vorerst noch abgesehen.



Objekt	eben	eben	nicht eben
Aufnahmerichtung zur Bezugsebene	senkrecht	verschwenkt	verschwenkt
Verarbeitung	Vergrößerung	Entzerrung	Differential-entzerrung

Abb. 2/8 Verfahren für die Herstellung von Bildplänen in Abhängigkeit von Objektform und Aufnahmeanordnung

Ist die aufzunehmende Fläche eben und die Aufnahmerichtung der Kammer senkrecht dazu, so genügt die Herstellung einer optischen Vergrößerung des in Frage kommenden Bildausschnitts. Diese Konstellation ist aber nur selten gegeben oder realisierbar. Bei ebenflächigem Objekt und geneigter oder verschwenkter Aufnahmerichtung kann die geometrische Transformation auf die Objektfläche durch optisch-mechanische Umbildung an einem Entzerrungsgerät erfolgen. In den häufigsten Fällen der architekturphoto-

grammetrischen Praxis ist das aufzunehmende Objekt jedoch gekrümmt, räumlich abgestuft oder zumindest mit herausragenden Elementen versehen. Bei derartigen Objekten führt die ganzflächige Entzerrung nicht zu Darstellungen, die einer Stereokartierung an Genauigkeit und geometrischer Richtigkeit äquivalent sind. Nur das Verfahren der Differentialentzerrung (Orthophototechnik) vermag in solchen Fällen durch Umwandlung der Zentralprojektion in eine ausreichend genäherte Orthogonalprojektion ein lagerichtiges und in allen Teilen maßstäbliches Halbtonbild zu erzeugen.

Die Entscheidung, wann die optische Bildvergrößerung, die Gesamtflächenentzerrung oder das Orthophotoverfahren anzuwenden ist, hängt somit vom Objekt, den Aufnahmebedingungen und den Genauigkeitsanforderungen, d.h. dem Zweck der Aufnahme ab. Eine grobe Abgrenzung der Verfahren soll an Hand von einfachen Abschätzungen in den Abschnitten 2.4.4 und 2.4.5 durchgeführt werden. Die den dabei verwendeten Formeln zugrunde liegenden Koordinatensysteme sind in Abb. 2/9 angegeben. Da diese Definition in den folgenden Kapiteln beibehalten werden soll, erscheinen einige zusätzliche Bemerkungen für angebracht.

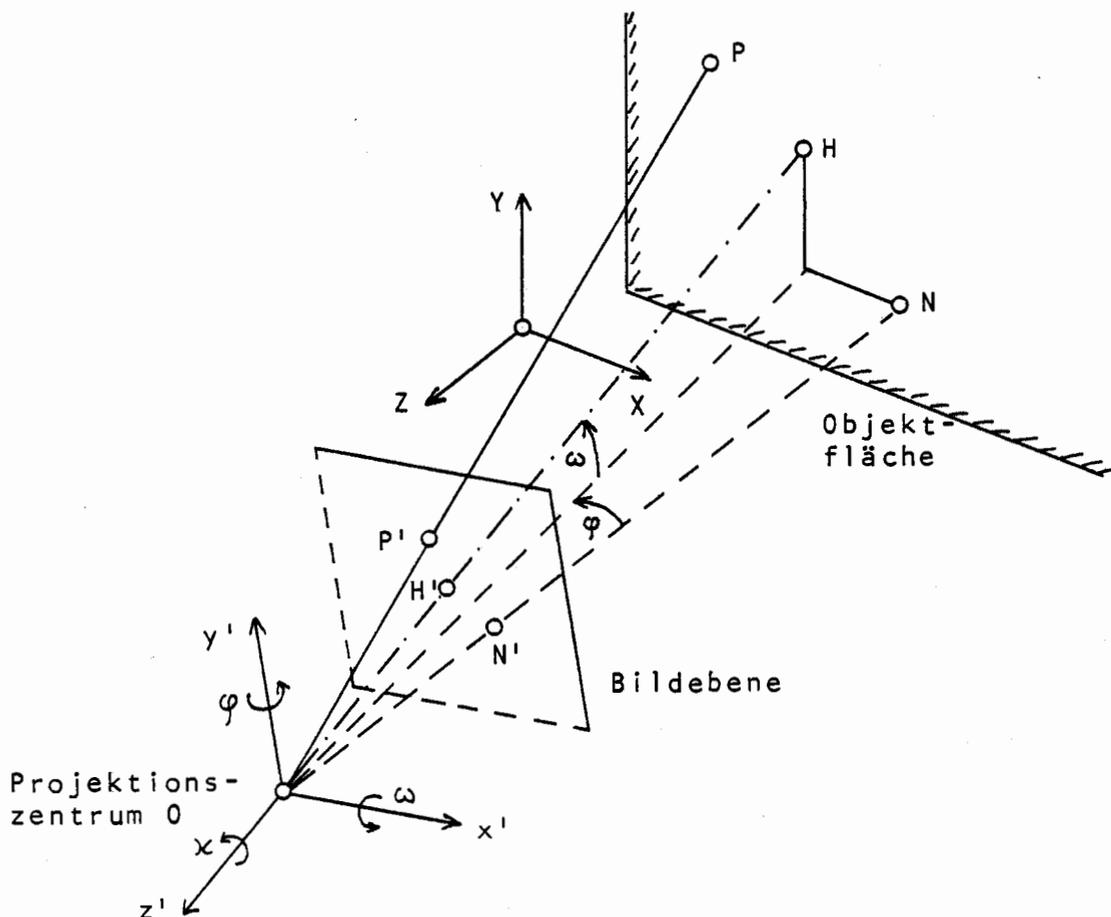


Abb. 2/9 Koordinatensysteme (rechtsdrehend kartesisch)
(Bild in Positiv-Stellung)

X, Y, Z	Objektkoordinaten	H	Hauptpunkt	N	Nadirpunkt
x', y', z'	Bildkoordinaten	H'	Bildhauptpunkt	N'	Bildnadirpunkt

Die Bezeichnungen der Achsen und Drehwinkel entsprechen denen der Luftphotogrammetrie (SCHWIDEFSKY-ACKERMANN /118, S. 23/), wobei jedoch das gesamte System um einen Winkel von 90° um die X-Achse gedreht ist. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems liegt im Projektionszentrum, die negative z' -Achse zeigt in Richtung zum Objekt. Die Neigung der Aufnahmeachse gegenüber der Grundrißebene (XZ-Ebene) des Objekts wird mit ω , die azimutale Verschwenkung gegenüber der Normalen zur Aufrißebene (XY-Ebene) wird mit ϕ bezeichnet.

Das sonst in der terrestrischen Photogrammetrie gebräuchliche Koordinatensystem (y-Achse in Richtung Objekt, z-Achse zum Zenit) wird in dieser Arbeit nicht verwendet. Mit Rücksicht auf die vorwiegende Behandlung orthophotographischer Zusammenhänge (Abschnitt 6) wurde dem luftphotogrammetrischen System der Vorzug gegeben.

2.4.4 Vergrößerung, Entzerrung

Eine grundlegende Voraussetzung für die Anwendung ganzflächiger Umbilverfahren (Vergrößerung, Entzerrung) ist die Ebenheit des aufgenommenen Objekts. Für die einfache Bildvergrößerung (z.B. an einem Vergrößerungsgerät Wild VG 1) kommt als weitere Bedingung hinzu, daß die Bildebene der Aufnahmekammer zu der Objektfläche parallel ist. Bei ungenügender Ausrichtung der Meßkammer wird das Objekt projektiv verzerrt abgebildet. Diese Deformationen lassen sich durch einfache Bildvergrößerung nicht eliminieren. Sie werden im entsprechenden Maßstab mit in den Bildplan übertragen.

Es stellt sich daher die Frage, welche Anforderungen an die Ausrichtung der Meßkammer bei der Aufnahme gestellt werden müssen, um bei einer vorgegebenen Toleranz der projektiven Verzerrungen das Verfahren der Bildvergrößerung anwenden zu können. Die Abschätzung erfolgt nach den linearisierten Grundformeln der perspektiven Abbildung (Differentialbeziehungen, aus SCHWIDEFSKY-ACKERMANN /118, S. 38/), wobei in diesem Zusammenhang nur die Einflüsse von ω und ϕ von Interesse sind.

$$dX_{\omega,\phi} = - \frac{XY}{Z} d\omega + Z \left(1 + \frac{X^2}{Z^2}\right) d\phi \quad (2,1a)$$

$$dY_{\omega,\phi} = - Z \left(1 + \frac{Y^2}{Z^2}\right) d\omega + \frac{XY}{Z} d\phi \quad (2,1b)$$

Die in den Gleichungen (2,1) enthaltenen linearen Anteile $Zd\omega$ und $Zd\phi$ wirken auf alle Punkte in gleicher Weise. Sie können durch eine konstante Bildverschiebung (mit Hilfe von Paßpunkten) eliminiert werden und sollen daher für die Abschätzung außer Betracht bleiben. Die vereinfachten Formeln lauten also:

$$d\bar{X}_{\omega, \phi} = -\frac{XY}{Z}d\omega + \frac{X^2}{Z}d\phi \quad (2,2a)$$

$$d\bar{Y}_{\omega, \phi} = -\frac{Y^2}{Z}d\omega + \frac{XY}{Z}d\phi \quad (2,2b)$$

Für die Aufnahme stehe eine Weitwinkel-Meßkammer Zeiss TMK 6 ($c = 60$ mm, nutzbares Bildformat 8 cm x 10 cm) zur Verfügung. Die Aufnahmeentfernung zum Objekt betrage 6 m, woraus sich ein Bildmaßstab von $1:100$ ergibt. Die maximale Projektionsverzerrung tritt in einer Bildecke ($x = 4$ cm, $y = 5$ cm) auf. Der dort abgebildete Objektpunkt liegt (bei $M_B = 1:100$) um etwa $X = 4$ m und $Y = 5$ m vom Nadirpunkt entfernt. Mit den angenommenen Werten lassen sich nach den Gleichungen (2,2) die dort auftretenden Projektionsverzerrungen $d\bar{X}$ und $d\bar{Y}$ berechnen.

Die Kammerneigung ω kann mit Hilfe einer Libelle klein ($d\omega < 1^\circ$) gehalten werden. Der ω -Einfluß auf die Koordinaten des äußersten Objektpunktes ergibt sich also mit $d\omega = 1^\circ$ nach den Gleichungen (2,2) zu

$$d\bar{X}_{\omega} = 0,5 \text{ mm}$$

$$d\bar{Y}_{\omega} = 0,6 \text{ mm.}$$

Die Auswirkung von ω auf die Genauigkeit der Objektivwiedergabe ist gering und kann für die weitere Abschätzung unberücksichtigt bleiben.

Wesentlich kritischer ist dagegen die azimutale Ausrichtung der Kammerachse senkrecht zur Objektfläche. Für die Lösung dieses Problems gibt es zahlreiche Vorschläge (BRUCKLACHER in /143/, S. 10 und 12/, DÖHLER /25/, GRIMM /41/, MEYER /94/, NAGEL/100/), auf die aber hier nicht näher eingegangen werden soll. Über die bei diesen Verfahren erzielbare Ausrichtegenauigkeit liegen allerdings nur wenige Angaben vor. Die Werte für $d\phi$ bewegen sich dabei in der Größenordnung von 10° bis 50° . Sie berücksichtigen jedoch nur die eigentliche Ausrichtegenauigkeit. Durch die in vielen Fällen unzureichende Definition der Objektfläche in der örtlichkeit können mit Sicherheit größere Winkelfehler entstehen.

Unter den angenommenen Voraussetzungen ($X = 4$ m, $Y = 5$ m, $Z = -6$ m, $d\omega \approx 0$) und mit $d\phi = 10^\circ$ bis 50° ergeben sich nach den Gleichungen (2,2) die in Tab. 2/10 zusammengestellten Projektionsverzerrungen am Objekt:

$d\phi$	10°	20°	30°	40°	50°
$d\bar{X}_{\phi}$	4	8	13	17	21
$d\bar{Y}_{\phi}$	5	10	16	21	26

Tab. 2/10 Projektionsverzerrungen $d\bar{X}_{\phi}$, $d\bar{Y}_{\phi}$ in (mm) am Objekt, in Abhängigkeit von der Verschwenkung $d\phi$.

Die Tabelle zeigt, daß die Koordinatenfehler bei einer Verschwenkung der Aufnahmeachse von $d\phi < 40^\circ$ einen Betrag von 2 cm am Objekt nicht überschreiten, was für die Zwecke der Bauaufnahme in den meisten Fällen als ausreichend angesehen werden kann.

Diese Aussage darf aber nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, weil für andere Aufnahmekammern und bei unterschiedlicher Aufnahmeanordnung veränderte Zahlenwerte zu erwarten sind. Trotzdem macht die Abschätzung deutlich, daß die Ausrichtung der Meßkammer mit großer Sorgfalt (und damit verbunden mit entsprechendem Aufwand) durchzuführen ist, wenn die Bildplanherstellung durch einfache Vergrößerung erfolgen soll.

Stehen für die Auswertung photogrammetrische Entzerrungsgeräte (z.B. Zeiss SEG V, Wild E 4, Jenoptik Rectimat) zur Verfügung, so entfallen die oben diskutierte Ausrichtekriterien bei der Aufnahme weitgehend, da eine Entzerrung auf die Objektebene (mit Hilfe von Paßpunkten, Planunterlagen oder Einstelldaten) möglich ist. In diesem Fall sollte jedoch darauf geachtet werden, daß die Neigungen und Verschwenkungen der Aufnahmekammer den Bereich der Freiheitsgrade des Entzerrungsgerätes nicht überschreiten. Zum Beispiel ergibt sich bei einer Aufnahmebrennweite von $f_A = 60$ mm, einer Entzerrungsbrennweite (SEG V) von $f_E = 180$ mm und einer Maximalneigung des Projektionstisches von $\nu_T = \pm 14,9$ nach der Beziehung

$$\sin \nu = \frac{f_A}{f_E} \cdot \sin \nu_T \quad (2,3)$$

(aus BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 146) eine maximal zulässige Neigung bzw. Verschwenkung der Aufnahmekammer von $\nu = \pm 4,69$.

2.4.5 Reliefversetzung

Die geometrischen Bedingungen der Ebenflächigkeit, die für die Anwendung von Vergrößerungs- und Entzerrungsverfahren Voraussetzung sind, werden jedoch in den seltensten Fällen vom Objekt erfüllt. Alle Punkte, die außerhalb der Bezugsfläche und nicht in der Aufnahmeachse liegen, erfahren bei der Aufnahme durch die zentralperspektive Abbildung eine radiale Verschiebung (Abb. 2/11). Objektteile, die senkrecht aus der Bezugsfläche herausragen, erscheinen im Bild radial nach außen "umgeklappt".

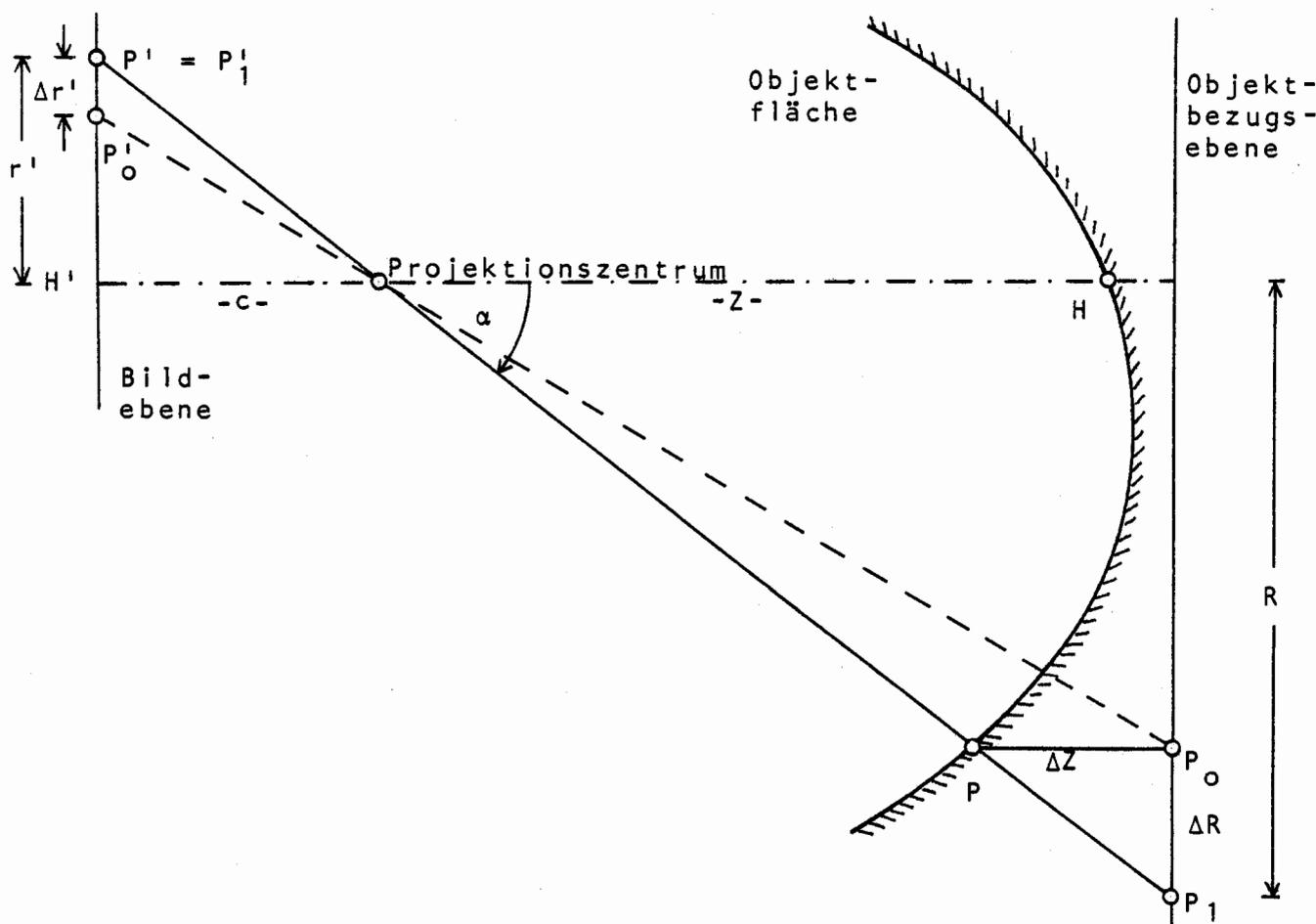


Abb. 2/11. Radiale Versetzung von Punkten, die außerhalb der Bezugsfläche liegen

- | | | | |
|------------|----------------------|-------------|-----------------------|
| Z | Aufnahmeentfernung | c | Bildweite |
| R | Radialabstand | r' | Radialabstand im Bild |
| ΔR | Versetzung am Objekt | $\Delta r'$ | Versetzung im Bild |
| α | Radialwinkel | | |

Die Reliefversetzung am Objekt ergibt sich nach Abb. 2/11 zu:

$$\Delta R = \Delta Z \frac{R}{Z} = \Delta Z \frac{r'}{c} = \Delta Z \tan \alpha \quad (2,4)$$

Die für die Einhaltung einer bestimmten Fehlerschranke zulässige Reliefhöhe ΔZ am Objekt kann aus Gleichung (2,4) berechnet werden. Für drei in ihrem Bildwinkel extrem unterschiedliche Aufnahmekammern (Wild P 31/45, Zeiss TMK 6, TMK 12) sind unter Vorgabe von $\Delta R = 2$ cm die zulässigen Maximalwerte von ΔZ in Tab. 2/12 zusammengestellt. Dabei wird von der Verwendung des jeweils nutzbaren Bildformates ausgegangen.

Kammer Max. Radialwinkel α Nutzbares Bildformat (cm ²)	Wild P 31/45 59,0° 9,2 x 11,8	Zeiss TMK 6 46,9° 8 x 10	Zeiss TMK 12 28,1° 8 x 10
r'_{\max} (cm)	7,5	6,4	6,4
c (cm)	4,5	6,0	12,0
ΔZ (cm)	1,2	1,9	3,8

Tab. 2/12 Zulässige Reliefhöhe ΔZ bei Verwendung verschiedener Aufnahmekammern für eine Fehlerschranke von $\Delta R = 2$ cm am Objekt

Liegt also eine nur bis auf wenige Zentimeter von einer Ebene abweichende Objektfläche vor, so kann bei voller Ausnutzung des Bildformates die Herstellung der Photokarte durch einfache Bildvergrößerung oder, bei geneigten bzw. verschwenkten Aufnahmen, durch ganzflächige Entzerrung erfolgen.

Bei nichtebenen Objekten ist eine einfache Entzerrung in Teilflächen möglich, vorausgesetzt, daß diese Teilflächen ihrerseits durch eine Ebene angenähert werden können. Zwei Methoden der Teilflächenumbildung sind aus dem topographischen Bereich bekannt. Beim "Facettenverfahren" (MAKAROVIC /87/) wird eine affine Entzerrung geneigter Polyederflächen durchgeführt. Im Gegensatz dazu erfolgt beim "Zonenverfahren" eine Entzerrung auf mehrere horizontale Bezugsebenen durch einfaches Ändern der Projektionsweite (BUCHHOLTZ-RÜGER /13/). Beide Methoden erfordern eine manuelle Einteilung der Objektfläche in geeignete Teilbereiche und eine ebenfalls manuelle Zusammensetzung der einzelnen entzerrten "Zonen" oder "Facetten". Da der dadurch entstehende Aufwand entsprechend hoch ist, sollten diese Verfahren nur dann angewandt werden, wenn durch wenige Teilentzerrungen eine gute Objektannäherung möglich ist.

Bei stark gekrümmten oder räumlich gegliederten Objekten können die ganzflächige Entzerrung sowie die Methoden der Teilstückumbildung aus Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsgründen nicht mehr angewandt werden. Die besondere Objektstruktur erfordert einen verfeinerten und möglichst automatisierten Entzerrungsprozeß. Diesen Forderungen entspricht weitgehend das Verfahren der "Differentialentzerrung" (Orthophotoverfahren).

3. Das Orthophotoverfahren

3.1 Allgemeine Beschreibung

Bei der differentiellen Entzerrung wird das zentralprojektive photographische Bild in "differentiell" kleinen Flächenelementen (Größenordnung 0,1 bis 10 mm²) auf eine ebene Bezugsfläche umgebildet. Das so auf einem Film entstehende Halbtonbild entspricht unter bestimmten Voraussetzungen (Abschnitte 3.3 und 6.1) in guter Näherung einer Orthogonalprojektion des aufgenommenen Objekts auf die Bezugsebene. Es wird daher als "Orthophoto" bezeichnet.

Die photographische Umbildung von Zentralprojektion in Parallelprojektion soll an einem Beispiel (aus der Bauaufnahme Schloß Linderhof, SEEGER /120/) in Abb. 3/1 veranschaulicht werden. Bild (a) ist ein Ausschnitt aus der zentralperspektiven Originalaufnahme. Im Vergleich zur Parallelprojektion (b) ist der linke Teil der Wandfläche stark verzerrt wiedergegeben (Schrägaufblick auf das Objekt). Der Bildmaßstab ist hier größer als auf der rechten Seite des Bildausschnitts. Die differentielle Entzerrung bildet nun in der Art um, daß das Objekt parallel auf die in Teil (c) dargestellte Bezugsfläche projiziert erscheint. Inwieweit diese Umbildung im einzelnen richtig ist, wird in Abschnitt 6.1 behandelt.

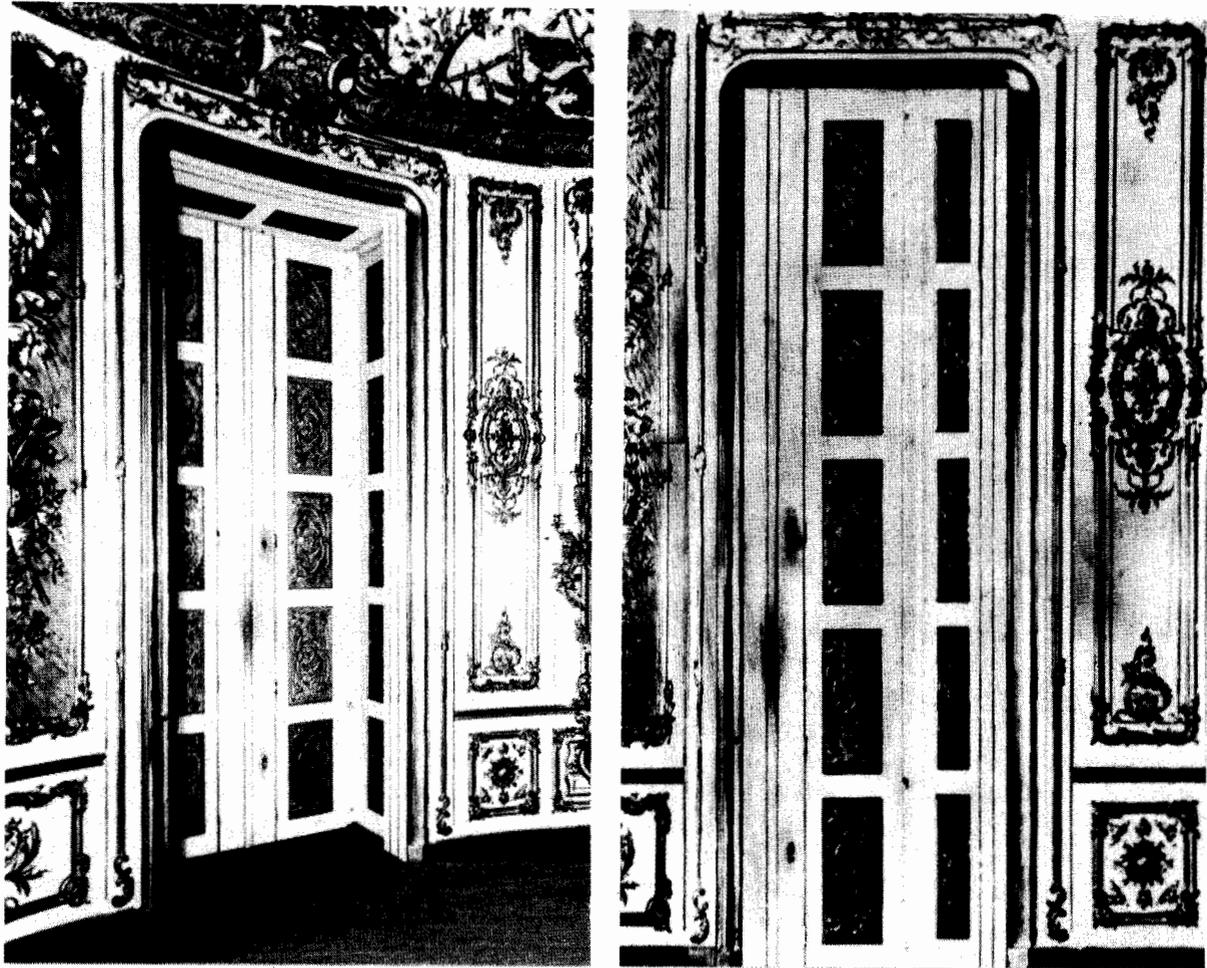
Die dem Verfahren zugrunde gelegten theoretischen Ansätze und deren technische Verwirklichung sind bei BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 240/, FÖRSTNER /33/, HELAVA /48/, HOBBIE /52/55/, HOBROUGH /56/, MEIER /89/91/, NEUBAUER /104/, PÖLZLEITNER /108/, SCHWIDEFSKY /117/, STEWARDSON /130/, SZANGOLIES /132/ u.a. ausführlich beschrieben. An dieser Stelle ist nur ein zusammenfassender Überblick angebracht, der im wesentlichen aus /55/ und /104/ übernommen wurde.

3.2 Realisierung der Differentialentzerrung

3.2.1 Mathematische Entzerrungsprinzipien, Grad der Objektannäherung

Zur Verfeinerung des Entzerrungsprozesses kann das zentralprojektive Bild in gleichartige Teilflächen oder schmale Streifen zerlegt werden. Dabei ist es aus gerätetechnischen Gründen (HOBBIE /55, S. 10/) zweckmäßig, die systematische Einteilung (gleich große Flächenelemente, parallele Streifen) in der Entzerrungsebene (im Orthophoto) vorzunehmen.

Nur wenige Geräte arbeiten nach dem Prinzip der flächenweisen Entzerrung. Als bekanntestes Beispiel ist der Gestalt Photo-mapper GPM II (HOBROUGH /56/) der Firma Gestalt International, Kanada, zu nennen. Bildabtastung und Orthoprojektion erfolgen hier elektronisch mit Hilfe von Photozellen und Kathodenstrahlröhren. Als Teilflächen (patches) dienen regelmäßige Sechsecke mit einer Größe von ca. 50 mm², die einzeln entzerrt und dann im Orthophotowabenförmig aneinandergesetzt werden.



SCHLOSS LINDERHOF

Teil Grundriss OG

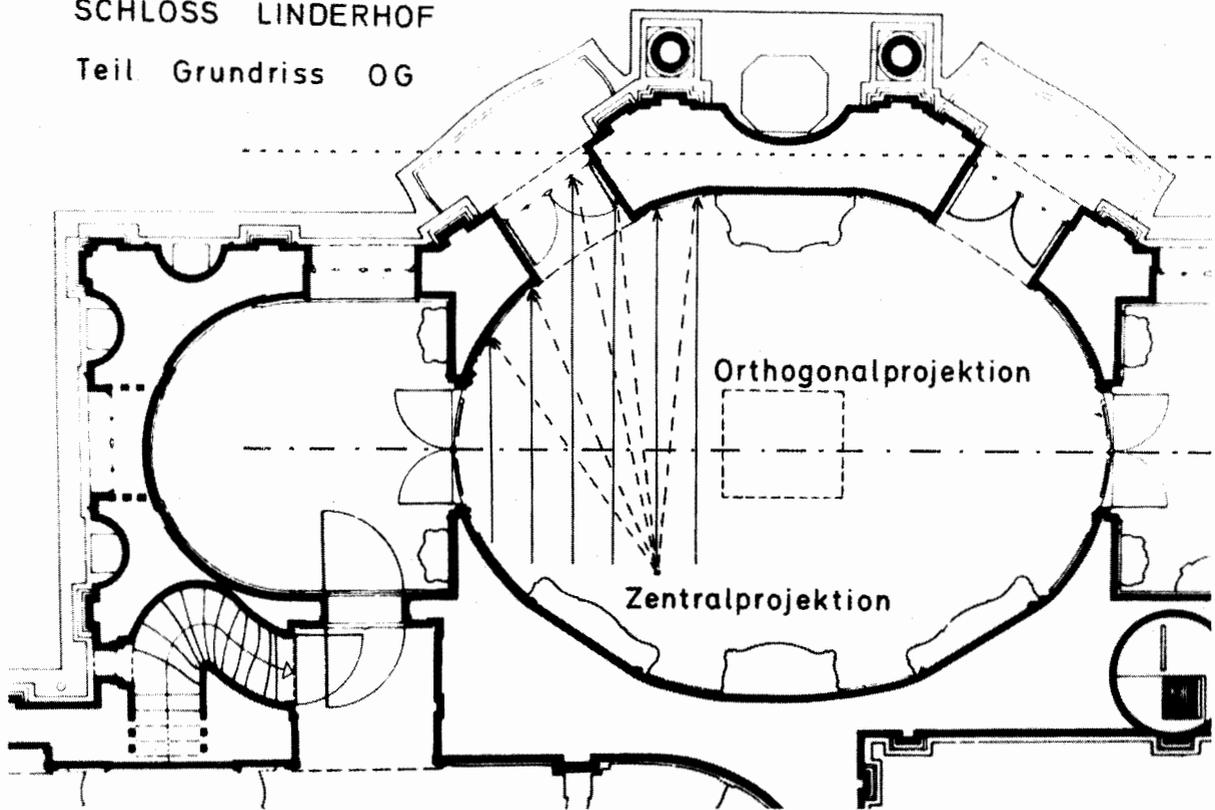


Abb. 3/1 Beispiel für Zentralprojektion und Parallelprojektion

- (a) Originalaufnahme (Zentralprojektion)
- (b) Orthophoto (Parallelprojektion)
- (c) Grundrißdarstellung mit eingetragenen Projektionslinien
 - Zentralprojektion
 - - - - - Schnittlinie
 - Parallelprojektion
 - Bezugsebene

Objekt: Schloß Linderhof, Längsschnitt

Nahezu alle übrigen Orthoprojektionsgeräte sind für streifenweise Entzerrung eingerichtet. Das Orthophoto (als Parallelprojektion des in Abb. 3/2 dargestellten Geländemodells auf die gekennzeichnete x/y -Ebene) setzt sich dabei aus schmalen parallelen Streifen zusammen. Die Streifenbreite ist in einem Bereich von 0,5 mm bis 16 mm wählbar (Abschnitt 6.1.4), bleibt aber für das jeweilige Orthophoto konstant. Als Streifenrichtung dient in den meisten Fällen die y -Richtung (Abschnitt 6.4).

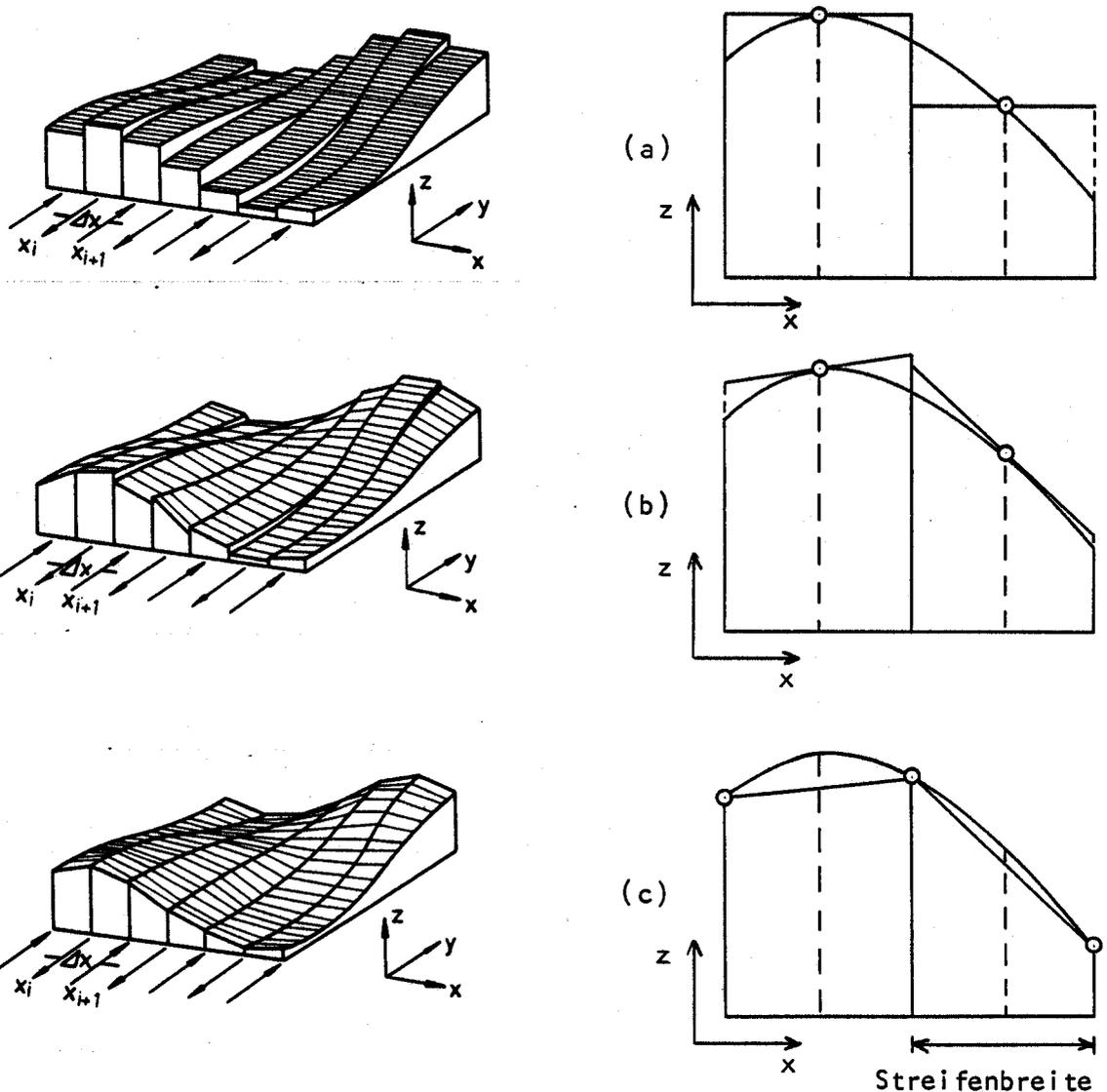


Abb. 3/2 Objektannäherung in Abhängigkeit vom Grad der differentiellen Entzerrung (aus HOBBI E /55, S. 13/).

- (a) Differentielle Entzerrung 0. Ordnung
- (b) Differentielle Entzerrung 1. Ordnung, Tangentialfläche
- (c) Differentielle Entzerrung 1. Ordnung, Polyederfläche

Die Oberfläche des Objekts wird bei der Orthoprojektion streifenweise durch eine Näherungsfläche ersetzt, die sich in Streifenrichtung dem Objekt weitgehend anpassen läßt (Abschnitt 6.2). Die Objektannäherung quer zur Streifenrichtung hängt dagegen vom Grad der Ersatzfläche ab, auf welche die Projektion erfolgt.

Die einfachste Form der Annäherung (differentielle Entzerrung 0. Ordnung, Abb. 3/2 (a)) ist durch eine (quer zur Streifenrichtung) horizontale Fläche gegeben. Die Höhe dieser Ersatzfläche stimmt aber nur in Streifenmitte mit der Objekthöhe überein. In allen anderen Punkten der Projektionsfläche treten Höhenabweichungen gegenüber der Objektoberfläche auf, die im Orthophoto zu Lagefehlern führen.

Diese verfahrensbedingten Abweichungen lassen sich verringern, wenn innerhalb des Streifens eine zusätzliche Entzerrung erfolgt. Wird die geneigte bzw. gekrümmte Objektfläche im betreffenden Teilgebiet durch eine (in x-Richtung) geneigte Ebene angenähert, so kann von differentieller Entzerrung 1. Ordnung gesprochen werden. Als Approximationsfläche im Streifen ist dabei entweder eine Tangentialebene an die Objektfläche (Abb. 3/2 (b)) oder eine Polyederfläche (Abb. 3/2 (c)) möglich. Eine weitere Verfeinerung des Umbildeprozesses kann (bei entsprechend höherem Aufwand) durch die Wahl einer Näherungsfläche 2. oder höherer Ordnung erreicht werden. Bei stetigem Flächenverlauf genügt jedoch in der Regel die Objektannäherung durch lineare Interpolation innerhalb der Streifen.

3.2.2 Umbildungstechniken

Die Umsetzung der zentralprojektiven Bildinformation in das Orthophoto kann durch optische Projektion, optische Bildübertragung oder elektronische Bildtransformation erfolgen (Abb. 3/3).

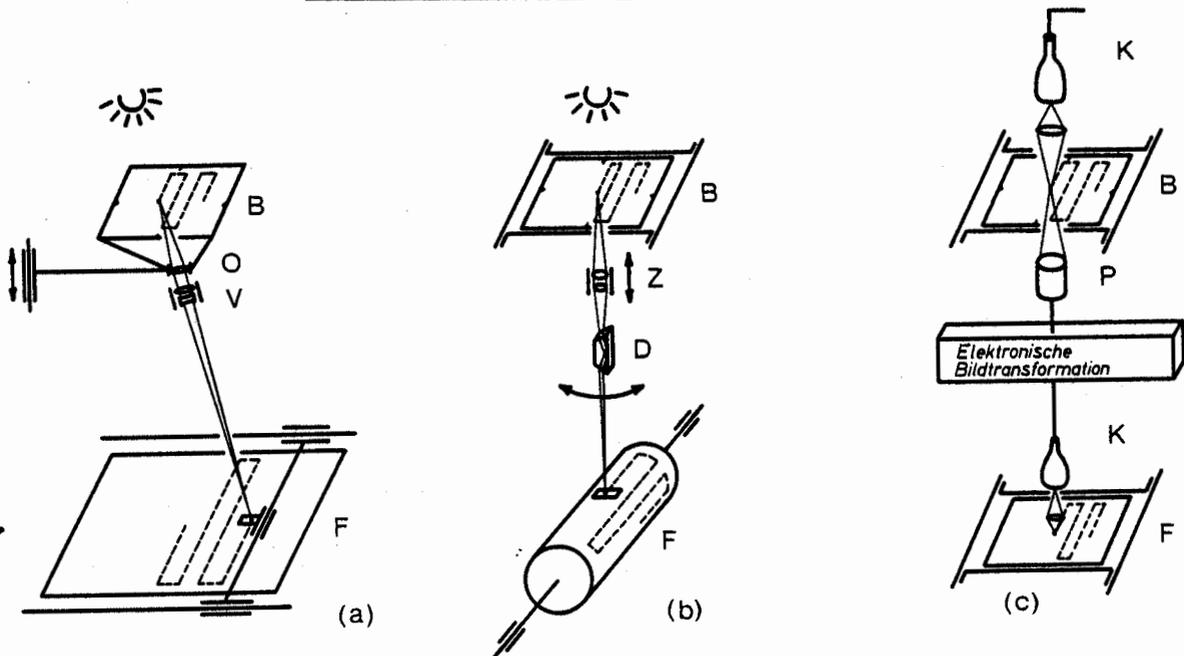


Abb. 3/3 Umbildungstechniken der Differentialentzerrung
(aus HÖBBIE /55, S.15/):

- | | | |
|--|-----------------|-----------------------|
| (a) Optische Projektion (Zentralprojektive Zuordnung) | | |
| (b) Optische Bildübertragung (Funktionale geometrische Zuordnung) | | |
| (c) Elektronische Bildtransformation (Funktionale mathematische Zuordnung) | | |
| B Bildebene | V Vorsatzsystem | K Kathodenstrahlröhre |
| F Projektionsfläche | Z Zoom-Optik | P Photozelle |
| O Objektiv | D Dove-Prisma | |

Das naheliegendste Verfahren zur Umbildung ist die optische Rückprojektion (a) des photographischen Bildes auf die gewählte Bezugsfläche durch Wiederherstellung bzw. Umkehrung des Aufnahmestrahlanganges (Kern OP 2 /68/, Zeiss GZ 1 (MEIER /89/)). Die durch Tiefengliederung des aufgenommenen Objekts verursachten Maßstabsunterschiede und Reliefversetzungen im Bild werden bei diesem Verfahren durch Verändern der Projektionsentfernung (Höhenänderung des Projektors) rückgängig gemacht. Scharfabbildung kann durch Ausnutzung der Tiefenschärfe (starke Objektivabblendung (KERN /68/)) oder mit Hilfe eines optischen Vorsatzsystems (MEIER /89/) erreicht werden.

Im Gegensatz zur direkten optischen Projektion erfolgt die optische Übertragung (b) der Bildelemente über ein Linsen- und Prismensystem (Galileo Orthophoto-Simplex (FERRI /27/), O.M.I. OP/C-2 /106/, Wild PPO 8 (PÖLZLEITNER /108/), Wild Avioplan OR 1 (STEWARDSON /130/), Jenoptik Orthophot B (SZANGOLIES /132/)). Die umzusetzenden Bildausschnitte werden der zentralprojektiven Aufnahme entnommen (Strahlengang meist senkrecht zur Bildebene) und gelangen in den optischen Übertragungsteil. Eine "Zoom-Optik" (Linsensystem mit variabler Brennweite) übernimmt die Korrektur und Anpassung des Maßstabs. Die wegen den Bildneigungen (ω , ϕ) und der Kantung (κ) notwendige Rotation der Bildelemente wird durch Drehung eines "Dove-Prismas" erreicht. Zoom-Optik und Dove-Prisma werden je nach Gerätetyp durch analoge (FERRI /27/, PÖLZLEITNER /108/, SZANGOLIES /132/) oder digitale (O.M.I. /106/, STEWARDSON /130/) Rechner gesteuert. Die Abbildung auf die Entzerrungsebene (Orthophotofilm) erfolgt orthogonal.

Eine dritte, bisher nur in wenigen Geräten (z.B. Gestalt Photomapper GPM II (HOBROUGH /56/)) realisierte Möglichkeit der Umbildung ist die elektronische Bildtransformation (c). Der jeweils in das Orthophoto zu übertragende Bildausschnitt wird von einer Kathodenstrahlröhre auf eine Photozelle projiziert, wo die Bildinformation in elektrische Signale umgewandelt wird. Die eigentliche Umbildung geschieht durch digitale Transformation mit Hilfe von Abbildungsgleichungen, die sich aus den Projektionsbeziehungen zwischen Bild und Orthophoto ergeben und auf die gewählte Approximationsfläche abgestimmt sind. Die digitale Verarbeitung eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit der Bildverbesserung durch Kontrasterhöhung bzw. Kontrastausgleich. Die transformierte Bildinformation wird von einer Kathodenstrahlröhre in senkrechter Projektion auf den Orthophotofilm übertragen.

3.2.3 Gerätetechnische Realisierung am Beispiel des Orthoprojektors Zeiss GZ 1

Die ständig wachsende Nachfrage und der große Bedarf an Orthophotokarten verschiedenster Maßstäbe hat das Geräteangebot für die differentielle Entzerrung in den letzten Jahren wesentlich beeinflusst. Nahezu jede Herstellerfirma photogrammetrischer Geräte verfügt über ein bis zwei Typen von Orthoprojektoren. Insgesamt sind ca. 30 verschiedene Modelle erhältlich, deren Konstruktionsprinzipien sich in die Liste der in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Möglichkeiten einordnen lassen. Eine ausführliche und nahezu vollständige Tabelle der heute auf dem Markt befindlichen Orthoprojektoren ist im Lehrbuch von BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 242/ enthalten.

Stellvertretend für andere Differentialentzerrungsgeräte soll hier das Orthoprojektionssystem Zeiss GZ 1 beschrieben werden, weil es, abgesehen vom digital gesteuerten Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 (STEWARTSON /130/), in seinen Betriebsarten (on-line / off-line) und Zusatzeinrichtungen (Elektrische Interpolation, Optische Interpolation, Höhenschraffenzusatz, Elektronischer Höhenlinienzeichner) das vielseitigste unter den bisher verfügbaren Umbildesystemen darstellt. Außerdem wurden alle Untersuchungen dieser Arbeit mit der Gerätekombination Zeiss GZ 1 - Stereoplanigraph C 8 bzw. GZ 1 - Planimat D 2 durchgeführt.

Der Orthoprojektor GZ 1 wurde 1964 von Zeiss/Oberkochen erstmalig vorgestellt (AHREND u.a. /2/). Das Gerät repräsentiert die differentielle Umbildung nach dem Streifenverfahren, wobei als Approximationsfläche im Streifen eine horizontale Ebene (0. Ordnung) oder eine quer zur Streifenrichtung geneigte Ebene (1. Ordnung, Polyederfläche) gewählt werden kann. Die Übertragung der Bildinformation geschieht durch optische Projektion, d.h. durch Wiederherstellung des Aufnahmestrahlanganges.

Die technische Realisierung der Umbildung soll an Hand von Abb. 3/4 erläutert werden.

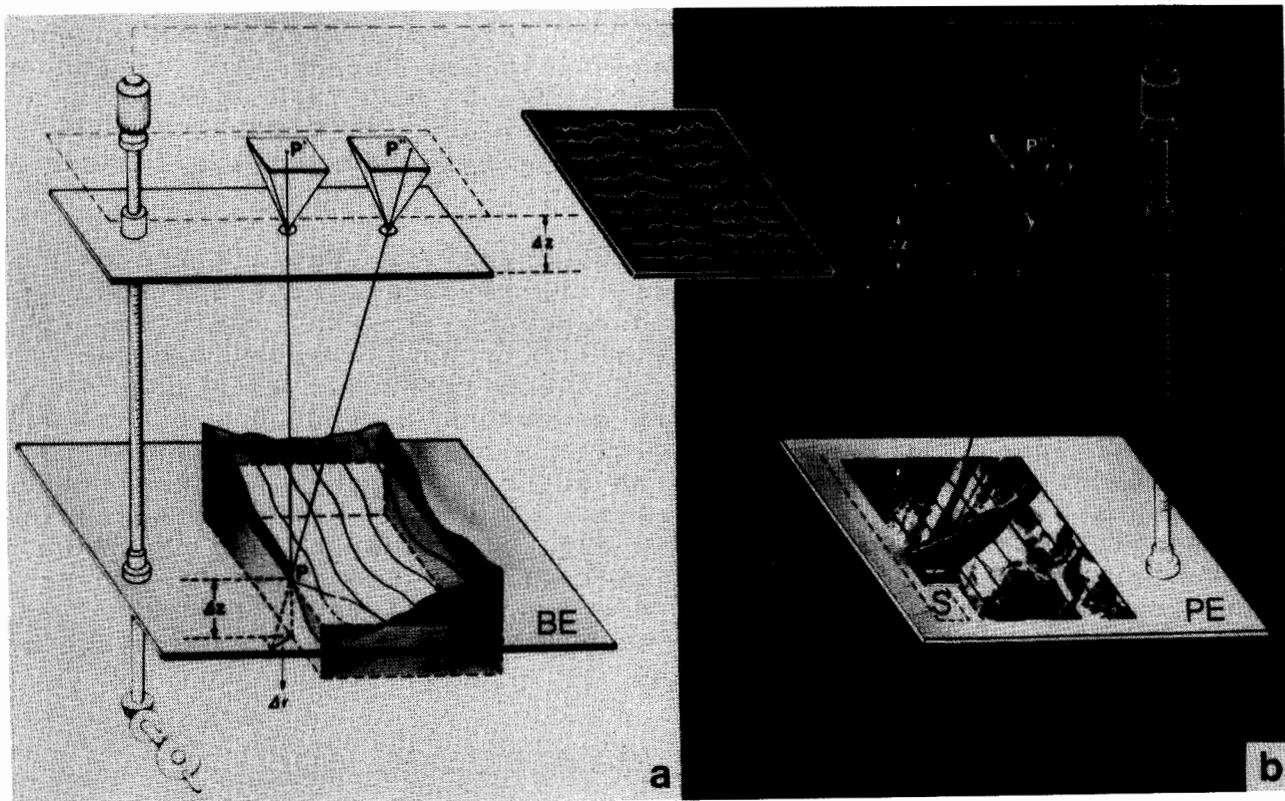


Abb. 3/4 Technische Realisierung der Differentialentzerrung nach dem Streifenverfahren in Geräten mit zentralprojektiver Umbildung am Beispiel des Orthoprojektors Zeiss GZ 1 (/142,S.113/):

(a) Modellbildung im Stereoauswertegerät (b) Orthoprojektion durch 3. Projektor

P Modellpunkt, P'P'' Bildpunkte zu P,
 Δz Höhenunterschied von P gegenüber
 der Bezugsebene BE
 Δr Reliefversetzung infolge Δz

PE Projektionsebene,
 S Spaltblende

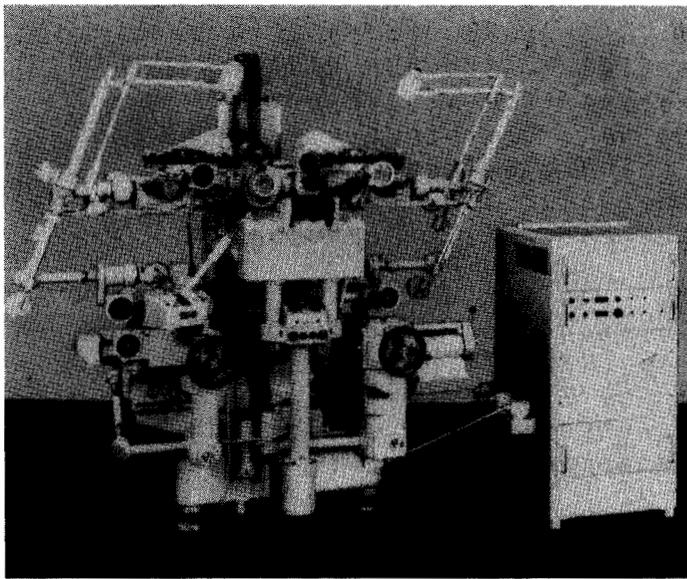
Die Steuerung der Orthoprojektion erfolgt beim GZ1-System durch ein Stereoauswertegerät (z.B. Stereoplanigraph C 8 oder Planimat D 2), in dem das Geländemodell durch optische (C 8) bzw. mechanische (D 2) Projektion gebildet wird. Die gemäß Abb. 3/2 in parallele Streifen aufgeteilte Modelloberfläche wird nun entlang von Profilen, die in der jeweiligen Streifenmitte liegen, mäanderrförmig abgefahren. Der photogrammetrische Operateur versucht dabei, die Meßmarke im Auswertegerät ständig auf der Modelloberfläche aufgesetzt zu halten. Die Höhenänderungen Δz (nach Abb. 3/4) werden in kontinuierlicher Folge auf den Orthoprojektor übertragen.

Die Projektionseinrichtung im GZ 1 besteht aus einem kardanisch (in ϕ, ω -Richtung) neigbaren und in der Höhe (z) verstellbaren Projektor, der einer Auswertekammer des Stereoplanigraphen C 8 entspricht. In diesem sogenannten "dritten Projektor" befindet sich ein Duplikat eines der im Stereoauswertegerät verwendeten Meßbilder. Die Projektionsfläche im GZ 1 ist bei Entzerrung 0. Ordnung die horizontale Tischebene. Auf ihr wird der für die Belichtung vorgesehene Orthophotofilm befestigt. Eine Spaltblende, die das differentielle Entzerrungselement verkörpert, und deren Länge der gewählten Streifenbreite entspricht, überstreicht die Projektionsfläche in ebenfalls mäanderrförmigem Lauf. Sie gibt aus dem projizierten Strahlenbündel jeweils nur einen kleinen Ausschnitt zur Belichtung des Orthophotofilms frei.

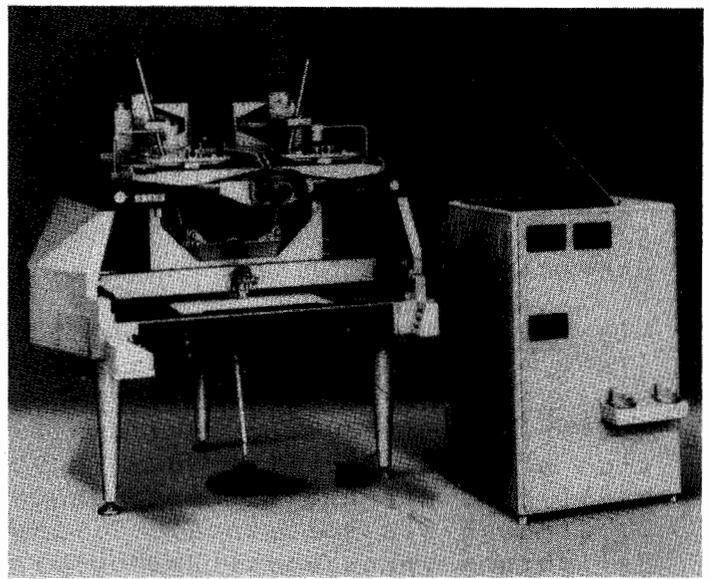
Die Höhennachführung des Projektors erfolgt in Übereinstimmung mit der vertikalen Meßmarkenbewegung im Stereoauswertegerät. Die Projektion der Objektpunkte in ihrer jeweiligen Soll-Projektionsentfernung bewirkt auf der Auffangfläche (d.h. im Orthophoto) eine Eliminierung der Maßstabsunterschiede sowie der radialen Punktversetzungen im zentralprojektiven Bild. Zur Scharfabbildung auch aus unterschiedlicher Projektionsentfernung wird beim Orthoprojektor GZ 1 ein "Bauersfeld'sches Vorsatzsystem" (von GRUBER /42, S. 338/) verwendet.

Die Übermittlung der Höheninformation vom Stereoauswertegerät zum Orthoprojektor GZ 1 kann entweder in direkter Ankopplung durch elektrische Drehmelder (on-line) oder über analog zwischengespeicherte Höhenprofile (off-line) erfolgen. Beide Betriebsarten sind in Abb. 3/5 (d) in einem Blockschema dargestellt. Die Höhenprofile werden in einem Speichergerät (SG 1) durch Schichtgravur auf einer präparierten Glasplatte mechanisch aufgezeichnet und in einem Lesegerät (LG 1) von einer Photozelle optisch gelesen.

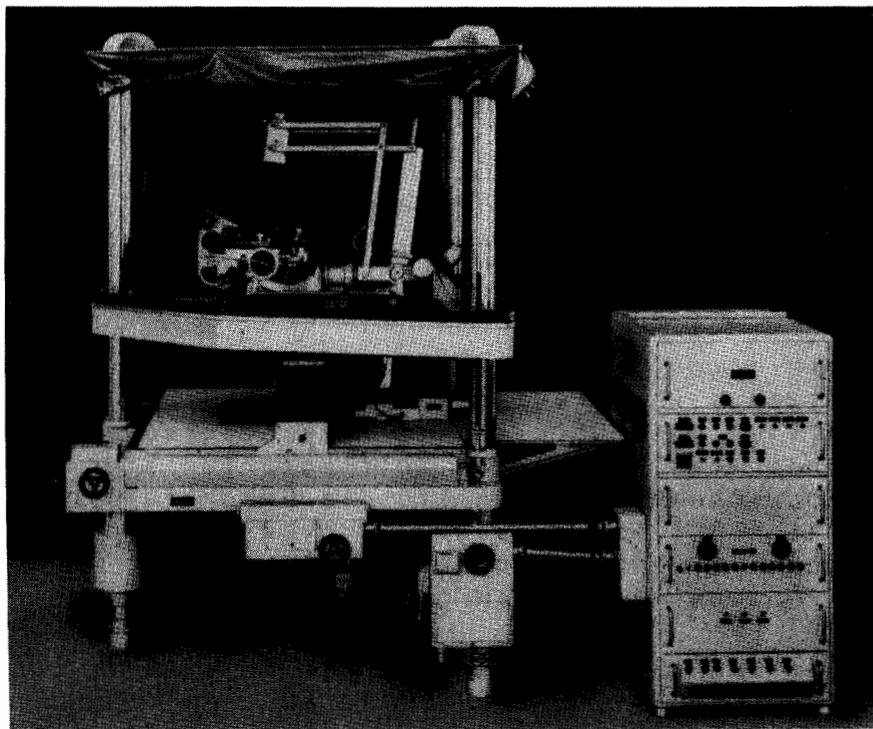
Die Abbildungen 3/5 (a)-(c) zeigen die Gerätekombination Zeiss Stereoplanigraph C 8 bzw. Planimat D 2 mit Speichergerät SG 1 sowie den Orthoprojektor GZ 1 mit Lesegerät LG 1. Eine Gravurplatte mit analog gespeicherten Höhenprofilen ist in Abb. 3/6 dargestellt.



(a)

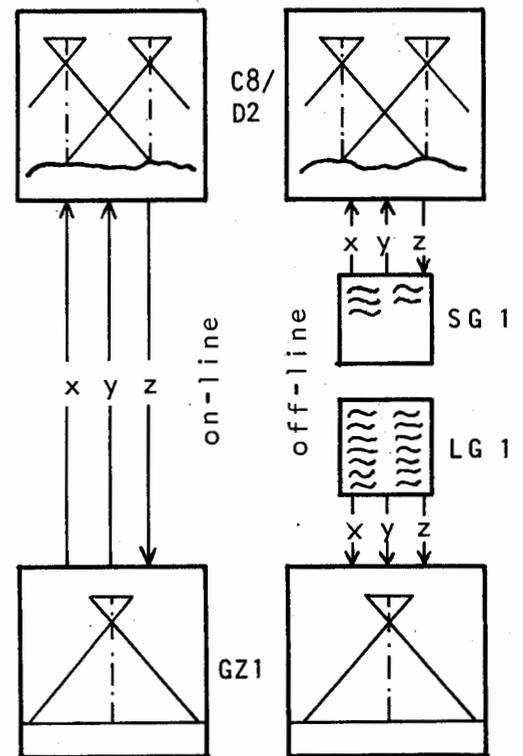


(b)



(c)

Stereoauswertegerät



(d) Orthoprojektor

Abb. 3/5 Orthoprojektionssystem Zeiss GZ 1 für off-line-Betrieb

- (a) Stereoplanigraph C 8 mit Speichergerät SG 1
- (b) Planimat D 2 mit Speichergerät SG 1
- (c) Orthoprojektor GZ 1 mit Lesegerät LG 1
- (d) Blockscha für die Betriebsarten on-line und off-line

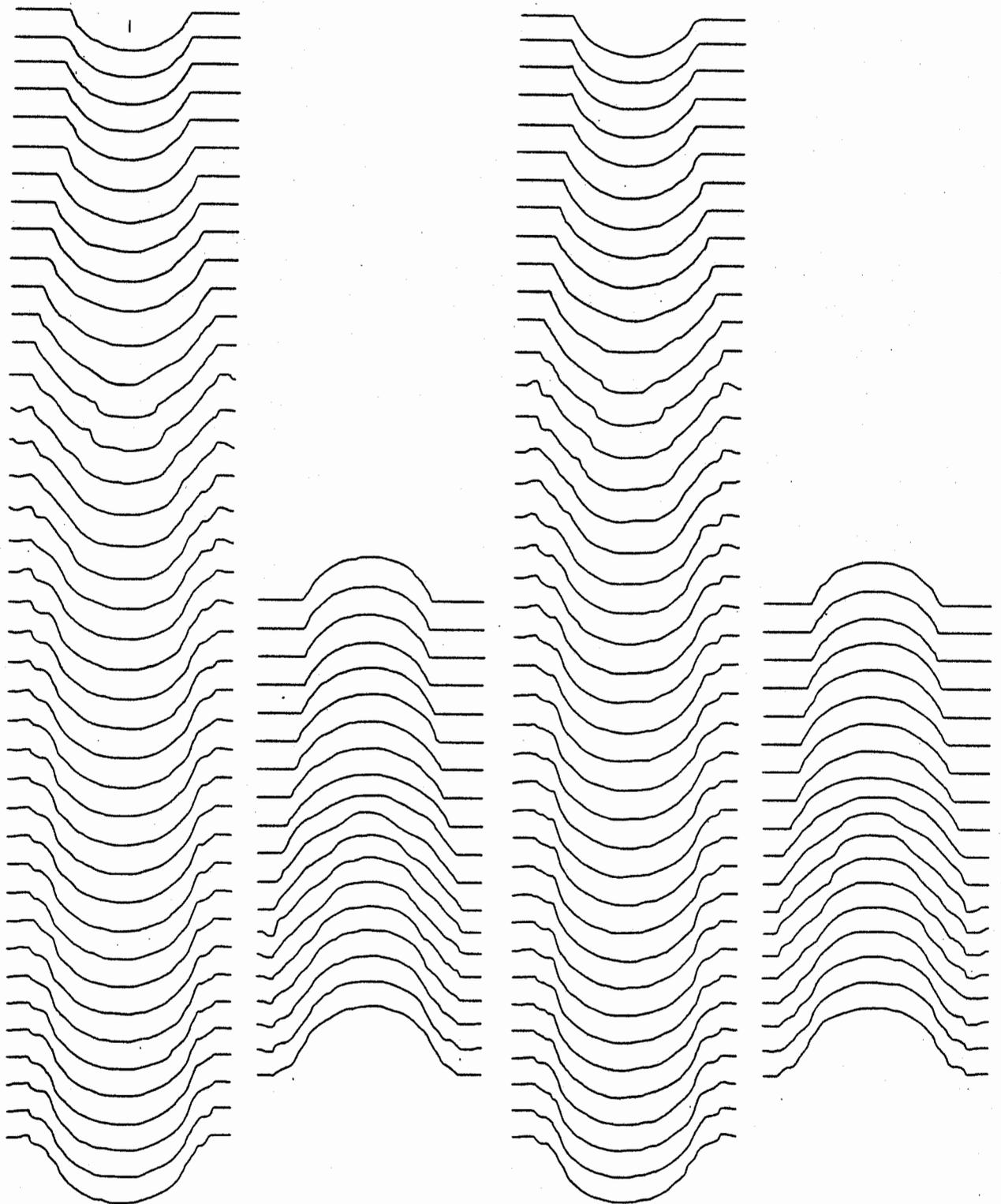


Abb. 3/6 Abbildung einer Gravurplatte mit Höhenprofilen,
aufgezeichnet am Speichergerät Zeiss SG 1.
(Das zugehörige Orthophoto befindet sich in Abb.B/9 im Anhang)
Objekt: Hauptkuppel der Klosterkirche Ottobeuren

Die bei off-line-Betrieb räumliche und zeitliche Trennung von Auswertegerät und Orthoprojektor ist mit zahlreichen Vorteilen verfahrenstechnischer und wirtschaftlicher Art verbunden (HOBBIE /52/53/, MEIER /91/), von denen aber im Hinblick auf Architektur-anwendungen nur drei Eigenschaften erwähnenswert erscheinen.

- a) Bei Zwischenspeicherung der Höhenprofile kann beim GZ 1 - System im Gegensatz zum on-line-Betrieb die Abtastgeschwindigkeit im Stereomodell kontinuierlich verändert werden, was eine optimale Modellannäherung in Streifenrichtung gewährleistet (HOBBIE /55, S. 152/).
- b) Die in Abschnitt 3.2.1 erwähnten verfahrensbedingten Höhenabweichungen zwischen Objektoberfläche und Approximationsfläche hängen außer vom Grad der differentiellen Entzerrung auch von der gewählten Streifenbreite ab (Abschnitt 6.1.1). Diese Fehler können daher bei bewegter Objektoberfläche nur klein gehalten werden, wenn die Streifenbreite ebenfalls klein ist. Das bedeutet aber auf der anderen Seite einen hohen Meßaufwand beim Abtasten des Stereomodells.

Mit Hilfe der GZ 1 - Zusatzeinrichtung "Elektrische Interpolation" ist es möglich, zwischen die vom Operateur abgetasteten Profile durch lineare Interpolation bis zu 5 Zwischenprofile einzuschalten (Abb. 3/7).

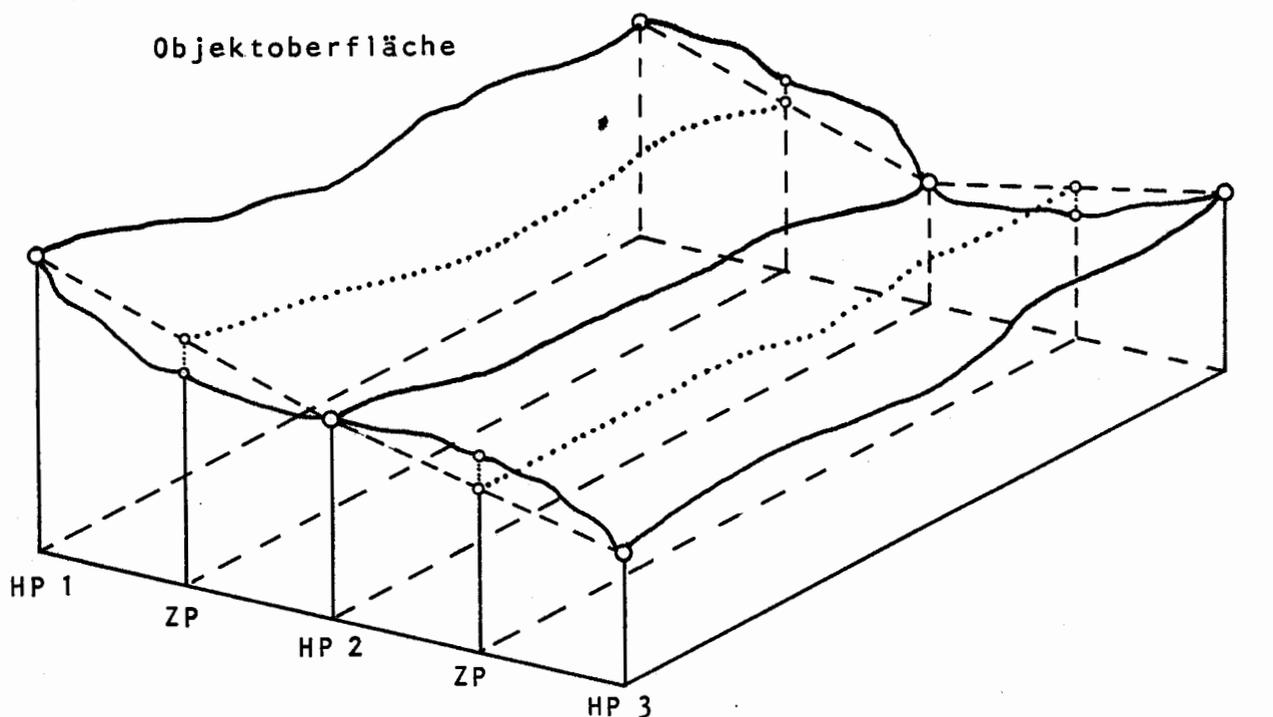
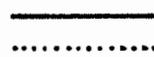


Abb. 3/7 Prinzip der "Elektrischen Interpolation";

HP 1, HP 2, HP 3: aufgezeichnete Höhenprofile

ZP: interpolierte, zusätzliche Zwischenprofile
zur Orthoprojektorsteuerung



Dadurch wird erreicht, daß bei der Orthoprojektion eine kleine Streifenbreite benutzt werden kann, obwohl das Abtasten des Modells in großen Profilabständen erfolgt. Allerdings werden die genannten Fehler durch die Reduktion der Streifenbreite nur verkleinert, jedoch nicht eliminiert.

- c) Eine differentielle Entzerrung 1. Ordnung (Objektannäherung durch eine Polyederfläche) ist beim Orthoprojektor GZ 1 unter Verwendung der "Optischen Interpolationseinrichtung 0-Int" möglich. Durch Neigung der Projektionsfläche wird eine zusätzliche Affinentzerrung innerhalb der Profilstreifen erreicht. Die bei Entzerrung 0. Ordnung auftretenden Höhenfehler bei der Objektannäherung können somit weitgehend ausgeschaltet werden. Die technische Realisierung der Optischen Interpolation ist in Abb. 3/8 (a) dargestellt.

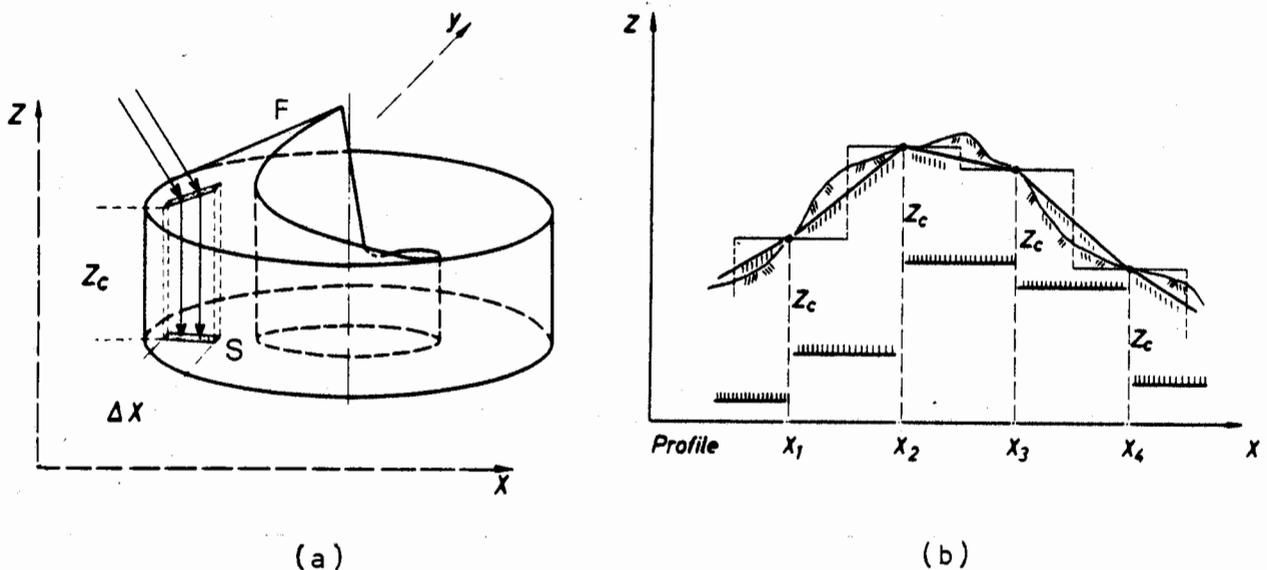


Abb. 3/8 Optische Interpolationseinrichtung "0-Int" nach (HOBBIE /52/)

- a) Ring aus Faseroptik (F) über der Spaltblende (S) des GZ 1
 b) Annäherung der Objektoberfläche durch Neigung der Projektionsebene (Z_c = konstante Höhe des Faseroptikrings)

Oberhalb der Spaltblende (S) befindet sich ein drehbarer Ring aus Faseroptik (F), dessen unterschiedlich geneigte Oberfläche als Projektionsfläche dient. Der Ring wird über das Lesegerät LG 1 so gesteuert, daß seine Oberflächenneigung der jeweiligen Objektquerneigung entspricht. Die Information über die Sollneigung kann aus nebeneinanderliegenden Höhenprofilen der Speicherplatte gewonnen werden. Die von der Projektionsfläche aufgefangenen Bildausschnitte werden von der Faseroptik umgeleitet und gelangen (affin entzerrt) in senkrechter Projektion auf die Filmebene.

Mit Hilfe der Optischen Interpolation können Objektneigungen bis $\pm 35^\circ$ berücksichtigt werden. Größere Querneigungen werden unter $\pm 35^\circ$ entzerrt. Der verbleibende Restfehler kann in der kartographischen Praxis in der Regel toleriert werden.

3.3 Fehler und Genauigkeit von Orthophotos

Bildhafte Darstellungen in Form von Photokarten können trotz ihrer wirtschaftlichen Herstellung und vollständigen Detailwiedergabe mit konventionellen Strichkartierungen nur konkurrieren, wenn die geometrische Qualität den Genauigkeitsanforderungen des Benutzers entspricht. Die Maßstäblichkeit und Genauigkeit von Orthophotos sowie die Homogenität der Bildaussage hängen von zahlreichen Fehlereinflüssen ab, die im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden sollen. Die Zahlenangaben sind von NEUBAUER /104/ übernommen. Eine ausführliche Diskussion dieser Parameter im Zusammenhang mit der Anwendung des Orthophotoverfahrens auf Architekturprobleme erfolgt in den Kapiteln 6 und 9.

3.3.1 Fehler des Geländemodells im Stereoauswertegerät

Die Genauigkeit eines im Stereoauswertegerät gebildeten Geländemodells wird durch Fehler der Aufnahmeoptik (Verzeichnung), Film- und Plattenfehler (Unebenheit, Schichtverzug), durch die Genauigkeit des Auswertesystems und die Qualität der Modellorientierung (relative und absolute Orientierung, Modellverbiegungen) beeinflusst. Die Lagefehler (σ_x , σ_y) liegen nach SCHWIDEFSKY-ACKERMANN /118, S. 239/ in der Größenordnung von 10 - 20 μm im Modell. Sie werden durch die Zuordnung von Stereoauswertegerät und Orthoprojektor direkt auf das Orthophoto übertragen. Die Höhenfehler σ_z des Geländemodells verfälschen dagegen die Projektionsweite bei der differentiellen Entzerrung. Unter der Annahme einer Höhen Genauigkeit von etwa 0,15‰ der Aufnahmeentfernung, einer mittleren Projektionsweite von 500 mm und einer durchschnittlichen Projektionsstrahlneigung von 30° ergeben sich nach NEUBAUER /104, S.64/ mittlere radiale Lagefehler von etwa 35 μm im Orthophoto.

3.3.2 Verfahrensfehler

Bei der differentiellen Entzerrung nach dem Streifenverfahren werden infolge der endlichen Elementausdehnung (Streifenbreite) nur die Profilkpunkte selbst lagerichtig abgebildet. Bei quer zur Streifenrichtung geneigtem Gelände verbleiben außerhalb der Profillinie Rest-Reliefversetzungen, die im Orthophoto zu Lagefehlern und Unstetigkeiten führen. Diese bereits in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.3 angesprochenen verfahrensbedingten Punktversetzungen werden als Verfahrens- oder Systemfehler bezeichnet.

Um eine Grundlage für die Untersuchungen in Kapitel 6.1 zu schaffen, sollen die Formeln zur Berechnung des Verfahrensfehlers bereits an dieser Stelle angegeben werden. Zur Erläuterung der hierbei verwendeten Bezeichnungen dient Abb. 3/9.

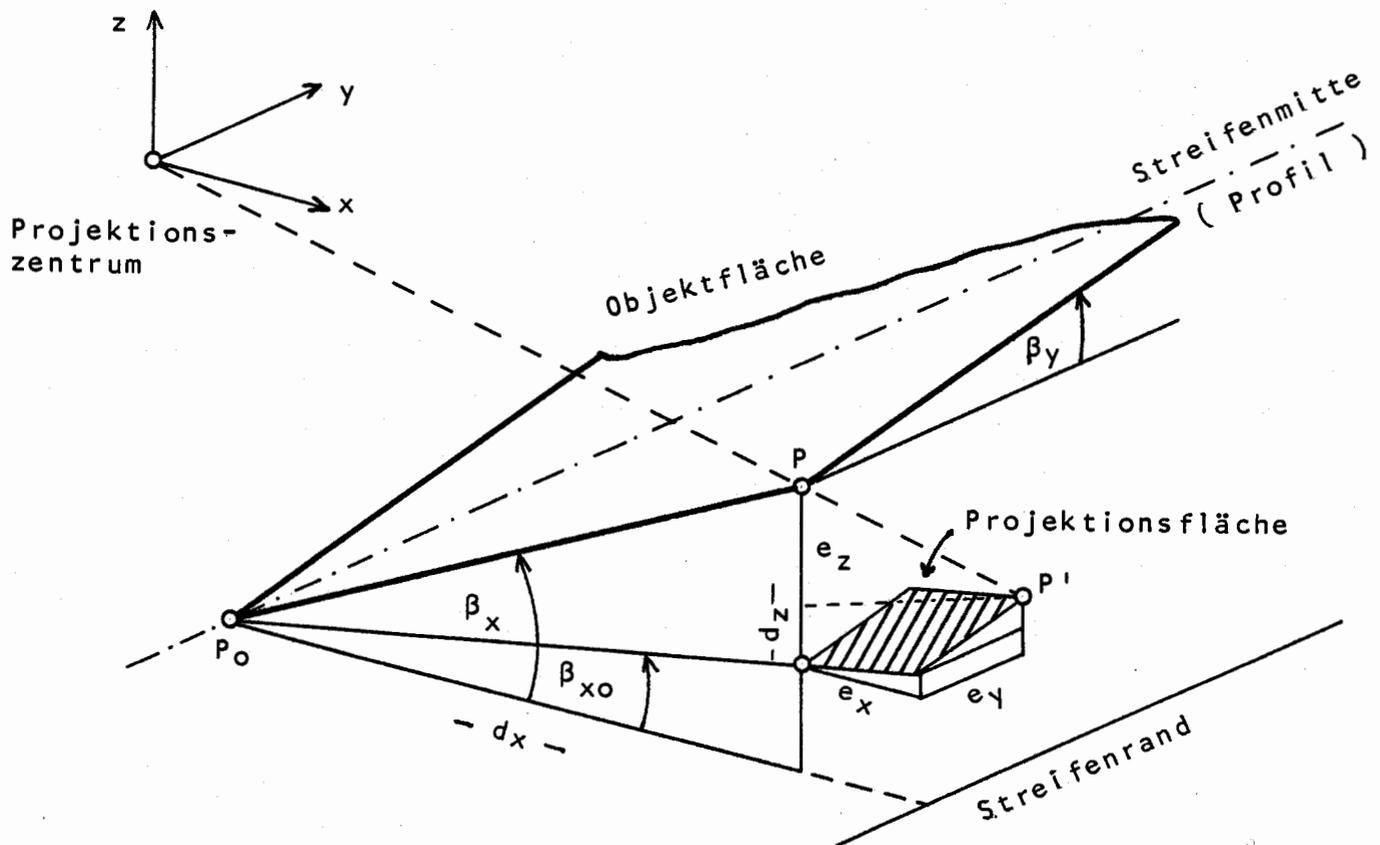


Abb. 3/9 Verfahrensfehlerkomponenten e_x , e_y , e_z eines Punktes P' nach Projektion auf eine um β_{x0} geneigte Ebene.

Es bedeuten:

P_0	(x, y, z)	Profilbezugspunkt
P	$(x + dx, y, z + dz)$	Objektpunkt
P'	$(x + dx + e_x, y + e_y, z + dz + e_z)$	Projizierter Punkt
dx	x-Abstand des Objektpunktes P von der Profillinie	
dz	Höhe des Objektpunktes P über dem Profilbezugspunkt P_0	
β_x	Objektneigung in x-Richtung (quer zur Streifenrichtung)	
β_y	Objektneigung in y-Richtung (in Streifenrichtung)	
β_{x0}	Neigung der Projektionsfläche in x-Richtung	

Nach HOBBIÉ /55, S.37/ ergeben sich die Verfahrensfehlerkomponenten e_x bzw. e_y eines im Orthophoto radial versetzten Punktes P' zu

$$e_x = - dx \frac{\frac{x}{z} (\tan \beta_x - \tan \beta_{x0})}{1 - \frac{x}{z} \tan \beta_x - \tan \beta_y} \quad (3,1a)$$

$$e_y = - dx \frac{\frac{y}{z} (\tan \beta_x - \tan \beta_{x0})}{1 - \frac{x}{z} \tan \beta_x - \frac{y}{z} \tan \beta_y} \quad (3,1b)$$

Als radialen Verfahrensfehler e_r erhält man mit

$$e_r = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$$

$$e_r = - dx \frac{\frac{r}{z} (\tan\beta_x - \tan\beta_{x_0})}{1 - \frac{x}{z} \tan\beta_x - \frac{y}{z} \tan\beta_y} \quad (3,1c)$$

Für differentielle Entzerrung 0. Ordnung (horizontale Projektionsfläche) gilt entsprechend mit $\beta_{x_0} = 0$:

$$e_x = - dx \frac{\frac{x}{z} \tan\beta_x}{1 - \frac{x}{z} \tan\beta_x - \frac{y}{z} \tan\beta_y} \quad (3,2a)$$

$$e_y = - dx \frac{\frac{y}{z} \tan\beta_x}{1 - \frac{x}{z} \tan\beta_x - \frac{y}{z} \tan\beta_y} \quad (3,2b)$$

$$e_r = - dx \frac{\frac{r}{z} \tan\beta_x}{1 - \frac{x}{z} \tan\beta_x - \frac{y}{z} \tan\beta_y} \quad (3,2c)$$

Die bei ungenügender Modellannäherung auftretenden Lageversetzungen im Orthophoto (Größenordnung 0,1 bis 1,0 mm) führen vor allem bei linienhaften Objekten, wie sie in der Architekturphotogrammetrie häufig sind, zu Unstetigkeiten in der Abbildung, insbesondere zu Klaffungen und Konturensprüngen an den Streifenrändern (siehe Abb. 6/9). Gleichzeitig entstehen im Orthophoto Bereiche, wo Details in benachbarten Streifen doppelt (Abb. 6/6) bzw. überhaupt nicht (Abb. 6/7) abgebildet werden. Eine Reduzierung dieser Fehler ist nach den Formeln (3,2) linear durch Verkleinern von dx , d.h. generell von der Streifenbreite $\Delta x (= 2dx_{\max})$ möglich. Da durch eine derartige Maßnahme die Auswertzeit aber annähernd proportional anwächst, ist die Festlegung der Streifenbreite eine besonders wichtige Aufgabe bei der Projektplanung. Über detaillierte Untersuchungen zum Verfahrensfehler und zur optimalen Streifenbreite bei der Umbildung architektonischer Aufnahmen wird in Abschnitt 6.1 berichtet.

3.3.3 Abtastfehler

Beim kontinuierlichen Abtasten eines Höhenprofils im Stereoauswertegerät werden durch den photogrammetrischen Operateur Höhenfehler verursacht, die von der Abtastgeschwindigkeit und den Geländeneigungen bzw. -krümmungen abhängen. Diese "dynamischen Abtastfehler" bewirken bei der differentiellen Entzerrung eine fehlerhafte Projektionsweite, die in Abhängigkeit vom projizierenden Winkel im Orthophoto zu Lageversetzungen führt.

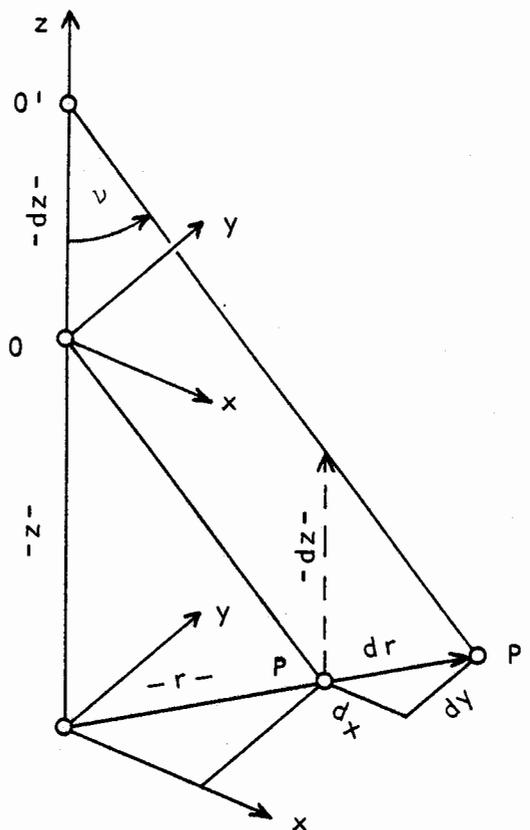


Abb. 3/10 Auswirkungen dx , dy , dr einer Projektionsweitenänderung dz

Es bedeuten:

- O Projektionszentrum auf Sollhöhe (z)
- O' Projektionszentrum auf fehlerhafter Höhe ($z + dz$)
- P Sollpunkt
- P' Projizierter Punkt
- ν Neigung des Projektionsstrahls

Nach Abb. 3/10 gilt:

$$dx = - \frac{x}{z} dz \quad (3,3a)$$

$$dy = - \frac{y}{z} dz \quad (3,3b)$$

und mit

$$r = \pm \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$dr = - \sqrt{dx^2 + dy^2} = - \frac{r}{z} dz \quad (3,3c)$$

Die Größe des dynamischen Höhenabtastfehlers sowie seine Abhängigkeit von der Objektneigung und der Abtastgeschwindigkeit können nur empirisch bestimmt werden. Eine Zusammenfassung verschiedener Untersuchungsergebnisse gibt HOBBLIE in /55, S.150/. Als Abschätzung kann für topographische Auswertungen (Basisverhältnis bei Weitwinkel 2:3) je nach Abtastgeschwindigkeit ein mittlerer Höhenfehler von 0,2 - 0,4 ‰ der Flughöhe genannt werden. Mit den in Abschnitt 3.3.1 angenommenen Werten ($z = -500$ mm, $\nu = 309$) erhält man eine mittlere Lageversetzung von $dr = 0,05$ bis $0,1$ mm im Orthophoto. Bei der Abtastung architektonischer Objekte können durch das meist kleine Basisverhältnis entsprechend große Höhenfehler (bis zu etwa 5 ‰ der Aufnahmeentfernung bei einem Basisverhältnis von 1:20) entstehen, wie in Abschnitt 6.3 gezeigt wird.

3.3.4 Ankopplungsfehler

Die Zuordnung zwischen Stereoauswertegerät bzw. Profilmessrichtung und Orthoprojektionsteil ist in der Regel mit Ungenauigkeiten behaftet. So treten Fehler bei der Übertragung der Orientierungsparameter ϕ , ω , κ zum Orthoprojektor auf, die sich jedoch bei der Paßpunktkontrolle auf der Projektionsfläche weitgehend eliminieren lassen. Bei mechanischem bzw. elektrischem Anschluß von Stereoauswertegerät und Orthoprojektor sind außerdem Kupplungsfehler in x , y und z sowie Schleppfehler in y und z möglich. Wie Tabelle 3/11 zeigt, liegen die Ankopplungsfehler in der Größenordnung von etwa 0,1 mm im Orthophoto. Sie werden nur geringfügig von der Geländeneigung beeinflusst.

3.3.5 Fehler des Orthoprojektors

Die Genauigkeit des Orthophotos hängt in entscheidendem Maße vom Justierzustand des Orthoprojektors ab. Besonderen Einfluß haben Fehler im z -Ablauf, Unebenheit der Projektionsfläche und Justierfehler an Spaltblende und Einstellmarke. Durch eine regelmäßige Überprüfung des Justierzustandes können diese Einflüsse klein gehalten werden. Nach NEUBAUER /104, S. 64/ liegt der durch Gerätefehler am Orthoprojektor verursachte Punktfehler in der Regel unter 0,1 mm im Orthophoto (Tab. 3/11).

3.3.6 Filmfehler

Bei der Orthophotoherstellung wird heute vorwiegend Polyesterfilm verwendet, der sich durch hohe Maßhaltigkeit auszeichnet. Trotzdem verbleiben geringe Fehler durch maßstäbliche, affine oder nicht-lineare Änderungen der photographischen Schicht oder des Emulsionsträgers. Eine ausreichende Planlage des Films kann durch statische Aufladung oder besondere Ansaugvorrichtungen erreicht werden. Die mittleren Punktfehler liegen bei Verwendung von Polyesterfilm bei etwa 50 μm , bezogen auf Filmformate von 50 x 60 cm^2 und 60 x 80 cm^2 (NEUBAUER /104/)

3.3.7 Bewegungsunschärfen

Bei der differentiellen Entzerrung mit kontinuierlicher Abbildung innerhalb der Profilstreifen tritt durch die Höhennachführung des Projektors während der Belichtung eine zusätzliche Bewegung der Projektionsstrahlen gegenüber dem Film auf. Diese "Bildwanderung" verursacht Unschärfen im photographischen Bild, die jedoch keinen Einfluß auf die geometrische Genauigkeit des Orthophotos ausüben. Nach HOBBIÉ /55, S. 51/ und NEUBAUER /104, S. 68/ ergibt sich der radiale Betrag der Bildwanderung zu

$$w_r = \frac{t \cdot \tan \beta_y \cdot \tan \nu_y}{1 - \tan \beta_y \cdot \tan \nu_y} \quad (3,4)$$

Hierin bedeuten:

t = Blendenausdehnung (Blendenbreite) in Profilirichtung (hier y -Richtung)
 β_y = Geländeneigung in Profilirichtung, ν = Neigung des Projektionsstrahls (radial)
 ν_y = Neigung des Projektionsstrahls in Profilirichtung

Bei der Orthoprojektion von Weitwinkelaufnahmen können bei einer Objektneigung von 50° (in Profilrichtung) und einer Blendenbreite von $t = 1$ mm in den Randbereichen des Orthophotos Bewegungsunschärfen von 3 mm auftreten. Nach HOBBIÉ /55, S. 54/ sind aber nur Werte bis zu etwa 0,5 mm im Orthophoto tolerierbar.

Die Bildwanderung w_r ist proportional abhängig von der Blendenbreite t . Sie läßt sich also durch Verkleinerung des Belichtungsspaltes (in Profilrichtung) entsprechend reduzieren. Eine Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit der Spaltblende ist nicht gegeben. Detaillierte Untersuchungen über die bei Architekturauswertungen auftretenden Bewegungsunschärfen (siehe z.B. Abb. 6/41) befinden sich in Abschnitt 6.2.

3.3.8 Wirkungsweise der Fehler

Die genannten Fehlergruppen wirken sich auf das Halbtonbild in zweierlei Hinsicht aus. Auf der einen Seite bestimmen sie die geometrische Genauigkeit des Orthophotos. Andererseits führen die durch Verfahrensfehler, Abtastfehler und Bildwanderung hervorgerufenen Lageversetzungen bzw. Bewegungsunschärfen zu erheblichen Störungen der Bildhomogenität.

Als Beispiel für die geometrische Orthophoto-Gesamtgenauigkeit sind die einzelnen Fehlereinflüsse (ohne Bildwanderung) in Tab. 3/11 für mittlere Geländeneigungen von 0° , 10° und 30° zusammengestellt. Die Werte stammen aus fehlertheoretischen Abschätzungen sowie umfangreichen experimentellen Untersuchungen (NEUBAUER /104/ und können als repräsentativ angesehen werden. Sie gelten für Entzerrung 0. Ordnung, Zentralprojektive Umbildung und für die Gerätekombination Zeiss C 8 - GZ 1 (on-line) bei einer mittleren Projektionsweite von 500 mm, einer Streifenbreite von 4 mm und einer festen Abtastgeschwindigkeit von 2,5 mm/sec. Bei Verwendung anderer Gerätesysteme sowie unter veränderten Voraussetzungen sind davon abweichende Einzelwerte zu erwarten, die Größenordnung des Gesamtmittels scheint aber nach bisherigen Erfahrungen (BLACHUT /77/, FÖRSTNER /33/, MEIER /89/) den angegebenen Zahlen nahezu kommen.

Art der Fehlereinflüsse	Mittlere Geländeneigung		
	0°	10°	30°
Fehler des Geländemodells	0,025	0,035	0,045
Verfahrensfehler	0	0,085	0,280
Abtastfehler	0,045	0,050	0,060
Ankopplungsfehler	0,075	0,080	0,085
Fehler des Orthoprojektors	0,049	0,054	0,089
Filmfehler	0,045	0,045	0,045
Gesamtfehler	0,11	0,15	0,32

Tab. 3/11 Mittlere Punktfehler (mm) im Orthophoto in Abhängigkeit von der Geländeneigung (nach NEUBAUER /104, S. 64/), Angaben siehe Text.

Ein mittlerer Gesamtfehler von ca. 0,2 mm im Orthophoto entspricht etwa der photogrammetrischen Kartiergenauigkeit bei Strichzeichnungen. Wie Tab. 3/11 zeigt, wirken sich die einzelnen Fehlergruppen auf die Orthophoto-Gesamtgenauigkeit nur geringfügig aus.

Von größerer Bedeutung als die geometrische Genauigkeit ist dagegen der bildhafte Einfluß von Verfahrensfehlern, Abtastfehlern und Bewegungsunschärfen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erwähnt wurde, führen Verfahrensfehler zu Unstetigkeiten in der Abbildung. So treten insbesondere an den Streifenrändern Klaffungen, Konturensprünge, Doppelabbildungen oder Abbildungsverluste auf. Bei topographischen Auswertungen (Flachland/Mittelgebirge, mittlere Geländeneigungen $\leq \pm 30^\circ$) können diese Fehler durch differentielle Entzerrung 1. Ordnung (z.B. mit Hilfe der "Optischen Interpolation") oder durch die Wahl einer kleinen Streifenbreite (z.B. begünstigt durch "Elektrische Interpolation") weitgehend unterdrückt werden.

Die durch Höhenabtastfehler verursachten Unstetigkeiten zwischen benachbarten Profilstreifen lassen sich bei niedriger Abtastgeschwindigkeit ebenfalls klein halten, falls keine abrupten Sprünge im Objektrelief auftreten.

Für die Bildwanderung gelten ähnliche Zusammenhänge wie für die Verfahrensfehler. Bei mäßig geneigter Geländeoberfläche (bis etwa 20°) und unter Verwendung von Blendenbreiten < 1 mm bleiben die Bewegungsunschärfen im Orthophoto unter 0,5 mm und werden damit nicht als störend empfunden.

Für topographische Anwendungen liegen konkrete Empfehlungen zur Wahl der Projektparameter (Aufnahmebrennweite, Bildmaßstab; Streifenbreite, Abtastgeschwindigkeit, Blendenbreite) für Aufnahme und Auswertung vor (BRUCKLACHER /11/, HOBBIE /55/, WALDHÄUSL /137/). Bei Beachtung dieser Kriterien ist es in der Regel möglich, Orthophotos von ausreichender Genauigkeit und homogener Bildqualität herzustellen.

3.4 Problematik der Orthophoto-Anwendung in der Architektur

Das Verfahren der differentiellen Entzerrung gilt heute im topographisch-kartographischen Anwendungsbereich als etabliert. Neben der vorwiegenden Produktion von Orthophotokarten in allen Maßstäben (KRAUSS /78/, VOSS /136/, WINKELMANN /139/, van ZUYLEN /148/) findet auch die Methode der Hochzeichnung aus Halbtonbildern Verwendung (BECK /4/, /KÖNIG /73/, STROBEL /131/). Die Entwicklung neuer Technologien und Geräte zur differentiellen Entzerrung ist noch nicht abgeschlossen. Die allgemeine Tendenz geht in die Richtung von off-line-Systemen und digital gesteuerten Orthoprojektoren (z.B. O.M.I., Rom /106/, WILD, Heerbrugg /138/).

Bereits vor fünf Jahren wurde auf den möglichen Einsatz des Orthophotoverfahrens in der Architekturphotogrammetrie hingewiesen. CARBONNELL /15/20/ bezeichnete diese neue Anwendung als interessant, wegen starker Diskontinuitäten des Reliefs an architektonischen Objekten aber auch als besonders schwierig. Er befürwortete die Untersuchung eines eventuellen Einsatzes dieser

Methode für Architekturzwecke. Ebenfalls positive Erwartungen wurden von HARDEGEN /46/ und SCHOLL /114/ geäußert. Daneben standen aber auch Bedenken, weil ein glatter und stetiger Oberflächenverlauf in der Architektur nur selten gegeben ist. MAUVELSHAGEN /88/ versprach sich für die Zukunft eine verstärkte Anwendung dieses besonders wirtschaftlichen Verfahrens und empfahl, in zentralen Instituten der Denkmalpflege Gerätesysteme zur Orthoprojektion einzurichten.

Neben diesen Ankündigungen gab es in der Zwischenzeit auch erste Versuche, die wegen des notwendigen Geräteinsatzes vorwiegend an Hochschulinstituten oder bei den Geräteherstellern selbst durchgeführt wurden. Eine Zusammenstellung der aus diesen Versuchen hervorgegangenen Orthophotos (Abb. A/1 bis A/12) befindet sich im Anhang (A) dieser Arbeit.

In Verbindung mit dem Institut für Photogrammetrie der Universität Karlsruhe entstanden bei der Firma Wild/Heerbrugg zwei Orthophotos von einem Ausschnitt der "Römischen Mauer" in Regensburg (Abb.A/1). Die Arbeiten wurden am Wild A 8 / PPO 8 (Abb. 8/4) ausgeführt. DOEHLER /24/ hob die wirtschaftliche Produktion, die gute Genauigkeit und den hohen Informationsgehalt des Orthophotos hervor. HOEHLE /57/ berichtete ausführlich über diese Versuche. Er forderte für derartige Anwendungen eine variable Abtastgeschwindigkeit, einen Stop-Mechanismus zum Anhalten des Profillaufs, kurze und schmale Spaltblenden sowie weite Vergrößerungsbereiche am Orthoprojektor.

Vom Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität München wurde im Rahmen der Vermessung der "Roten Halle" in Pergamon/Türkei ein Orthophoto von einem Teil der Fassade hergestellt (Abb. A/2). Die Modellabtastung und Projektion erfolgte am Orthoprojektionssystem Zeiss Planimat - GZ 1 des Landesvermessungsamtes Stuttgart. Als Probleme bezeichnete STEPHANI /129/ die Einschränkungen durch die Modellbereiche der für Luftbildauswertungen konzipierten Geräte sowie das Nachfahren von plötzlichen Vorsprüngen am Objekt.

Am Photogrammetrischen Institut der Universität für Bergbau und Metallurgie in Krakau/Polen wurden an der Gerätekombination Jenoptik Topocart - Orthophot (Abb. 8/5) bisher mehrere Architekturorthophotos erzeugt (Abb. A/3 bis A/6). SITEK /125/126/ und JACHIMSKI /59/61/ berichteten über gute Erfahrungen mit dieser Methode, vor allem auch bei der Hochzeichnung von Strichbildern aus Orthophotos. Angaben über Genauigkeit und Zeitaufwand befinden sich in /125/. Als Schwierigkeit wurde das Abtasten von hervorstehenden Objektteilen, Fenster- und Türrahmen erwähnt.

Die Kuppel der Kirche Sta.Maria del Fiore/Florenz wurde von der Gerätefirma Officine Galileo am Orthoprojektor Orthophoto-Simplex (Abb. 8/3) in einem entzerrten Halbtonbild dargestellt (Abb. A/7). FERRI und FONDELLI /28/ sprachen von einer wertvollen Ergänzung der Stereokartierung, vor allem bei bemalten Flächen.

Im Auftrag des Ingenieurbüros De Waal/Holland entstand bei der Firma Hansa-Luftbild/Münster ein Orthophoto der Decke des Züricher Opernhauses (Abb. A/8). Bei der Auswertung am Zeiss-Stereoplanigraph C 8 / GZ 1, off-line, traten Probleme mit dem z-Bereich des Orthoprojektors sowie Bewegungsunschärfen bei der Belichtung auf (Angaben aus persönlicher Mitteilung).

Abb. A/9 zeigt ein Orthophoto von der Decke der Nationalbibliothek in Wien. Die Orthoprojektion erfolgte am Zeiss Planimat - GZ 1 des Instituts für Angewandte Geodäsie in Frankfurt.

Vom Geodätischen Institut der Universität Belgrad wurde mit dem Gerätesystem Wild A 8 - PPO 8 ein Orthophoto des Dizdar-Turmes der Festung Kalemegdan in Belgrad (Abb. A/10) hergestellt. VOJNOVIĆ and MARČETA /135/ bezeichneten das Orthophotoverfahren als geeignete Ergänzung zur konventionellen Stereokartierung.

Eine neue Darstellungsform ist durch den Einsatz digital gesteuerter Orthoprojektoren gegeben. KRAUS und TSCHANNERL /76/ berichteten über den Versuch einer Zylinderflächen-Abwicklung. Für die Projektion stand das off-line-System Wild Avioplan OR 1 (Abb. 8/6) zur Verfügung. Die Abbildungen A/11 und A/12 zeigen die Halbtondarstellungen des in die Ebene ausgebreiteten Deckengewölbes des Wiener Schottenstiftes.

JACHIMSKI /61/ versuchte die Abwicklung einer Zylinderfläche (Deckenfresco, 17. Jahrhundert) im on-line-Verfahren mit der Geräteausrüstung Jenoptik Topocart-Orthophot durch streifenweises Verändern der Kammerkonstante. In seinem Aufsatz betonte er die Vorteile bei der Herstellung und Interpretation von kombinierten Strich-Halbton-Karten.

Die bisherigen Versuche zur differentiellen Entzerrung von Architekturaufnahmen waren ermutigend. Die erwarteten Vorteile der Methode bezüglich der Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit der Darstellung scheinen, soweit aus den Angaben ersichtlich ist, weitgehend bestätigt zu werden.

Andererseits treten gegenüber der topographischen Anwendung des Orthophotoverfahrens die in Abschnitt 3.3.8 angesprochenen bildhaften und geometrischen Fehler in verstärktem Maße auf. Das liegt vor allem an der Oberflächenstruktur architektonischer Objekte, die sich von einer Geländeoberfläche durch Unstetigkeiten, senkrechte Vorsprünge und Vertiefungen sowie durch vorgelagerte Details sehr wesentlich unterscheidet. Diese Abweichungen von einem stetigen Flächenverlauf treten bei den in der Regel kurzen Aufnahmeentfernungen (2 m bis 20 m) in ihrer Wirkung auf die zentralperspektive Abbildung noch stärker in Erscheinung. Das bedeutet, daß vor allem Verfahrensfehler, Abtastfehler und Bewegungsunschärfen größere Beträge annehmen als bei topographischen Orthophotos.

Eine zweite Problematik für die architektonische Anwendung des Orthophotoverfahrens kommt durch die Konzeption der Orthoprojektionsgeräte für ausschließlich luftphotogrammetrische Zwecke hinzu. Insbesondere bereitet die Wiederherstellung der inneren Orientierung sowohl bei den zur Steuerung der Differentialentzerrung verwendeten Stereoauswertegeräten als auch bei den Orthoprojektoren selbst Schwierigkeiten. So lassen sich zum Beispiel kurze Aufnahmebrennweiten (unter 85 mm), wie sie bei terrestrischen Kammer häufig verwendet werden, nur an wenigen Geräten direkt einstellen. Auch das Zentrieren der Filme bzw. Photoplatten (gebräuchliche Formate: 9 x 12 cm², 13 x 18 cm²) auf den Bildträgern wirft Probleme auf, weil die in die Trägerplatten (einheitliches Format: 23 x 23 cm²) eingravierten Paßlinien nicht bis zu den Rahmenmarken dieser Meßbilder reichen.

Der Modell-z-Bereich in Stereokartiergeräten ist in der Regel ebenfalls auf die Auswertung von Luftbildern abgestimmt, d.h. es wird von Höhenunterschieden im Gelände ausgegangen, die etwa 50 % der relativen Flughöhe nicht überschreiten. Bei der Auswertung von Architekturaufnahmen können daher Schwierigkeiten bei der Unterbringung der Modellhöhe im z-Bereich auftreten. Auch ist in einigen Geräten die Realisierung eines kleinen Basis-Verhältnisses (z.B. am Wild A 8 : $\vartheta < 1/5,4$) durch Beschränkungen in der Basiseinstellung ($b_{\min} = 65 \text{ mm}$) und im z-Bereich ($z_{\max} = 350 \text{ mm}$) nicht möglich (Siehe Abschnitt 5.2.4).

Die angesprochenen Probleme stellen eine direkte Anwendung der "konventionellen" Orthophoto-Technik sowie den Einsatz handelsüblicher Differentialentzerrungsgeräte für die Umbildung von Architektur-Aufnahmen zunächst in Frage. Auf der anderen Seite demonstrieren jedoch die angegebenen Beispiele (Abbildungen A/1 bis A/12) eine prinzipielle Eignung der Methoden und Geräte für derartige Aufgaben. Im Hinblick auf eine Reduzierung der genannten Fehlereinflüsse und auf einen planmäßigen Verfahrensablauf ist daher eine nähere Untersuchung notwendig. Dazu gehört die Erstellung von Richtlinien für den architekturphotogrammetrischen Aufnahmeprozess (Wahl der Aufnahmekammer, Aufnahmeanordnung, Beleuchtungsfragen) sowie für die orthophotographische Auswertung, insbesondere für die Festlegung von Streifenbreite, Blendenbreite und Abtastgeschwindigkeit. Diese Untersuchung wird Gegenstand der nachfolgenden Kapitel sein.

4. Die photogrammetrische Aufnahme für die Herstellung von Architektur-Bildplänen

4.1 Wahl der Aufnahmekammer

In der Photogrammetrie werden aus Genauigkeits- bzw. Wirtschaftlichkeitsgründen Kammer unterschiedlicher Bildwinkel eingesetzt. Da bei modernen Luftbildkamern das Bildformat auf $23 \times 23 \text{ cm}^2$ standardisiert ist, beschränkt sich die Wahl des Bildwinkels auf die Wahl der Bildweite.

Für terrestrisch-photogrammetrische Arbeiten stehen dagegen Kammer unterschiedlicher Bildformate und Bildweiten zur Verfügung, so daß bei der Entscheidung über die zu verwendende Aufnahmekammer beide Parameter in Betracht zu ziehen sind.

Die Bildweite (als geometrischer Abstand zwischen dem bildseitigen Objektivknotenpunkt und dem Bildhauptpunkt) hängt von der jeweiligen Fokussierentfernung der Kammer ab und ist daher eine veränderliche Größe. Demgegenüber ist die Brennweite ein physikalischer Begriff. Sie bezieht sich auf das Objektiv und bleibt unabhängig von der Fokussierentfernung. Da Bildweite und Brennweite im allgemeinen nur wenig (im Millimeterbereich) voneinander abweichen, eignet sich die Brennweite als objektiv-konstanter Näherungswert für die Bildweite. Im folgenden wird daher die Bezeichnung Brennweite verwendet.

4.1.1 Bildformate, Brennweiten, Bildwinkel

Das Bildformat terrestrischer Aufnahmekammern ist weitgehend auf die handelsüblichen Platten- bzw. Filmformate abgestimmt. Gebräuchliche Größen sind 6×6 , 8×8 , 10×15 , vor allem aber $6,5 \times 9$, 9×12 und $13 \times 18 \text{ [cm}^2\text{]}$. Die Wahl von Hoch- oder Querformat (soweit wählbar) hängt von der jeweiligen Höhen- und Breitenausdehnung des aufzunehmenden Objekts ab. Auf die spätere Einpassung der Bilder in Stereoauswertegeräten und Orthoprojektoren hat diese Entscheidung geringen Einfluß, da alle terrestrischen Bildformate innerhalb des quadratischen Luftbild-Standardformates von $23 \times 23 \text{ cm}^2$ zu liegen kommen, falls keine Bildvergrößerung zur Brennweitenangleichung notwendig wird. Durch eine direkte Verwendung der Aufnahmenegative im Auswertegerät können Kopierprozesse vermieden werden. Das gilt in besonderem Maße für Bildformate von $13 \times 18 \text{ cm}^2$ und Brennweiten von 10, 15 oder 19 cm, die an den meisten Geräten mit mechanischer und zum Teil auch optischer Projektion unmittelbar verifizierbar sind. Daher ist es zweckmäßig, bei Kenntnis des zur Verfügung stehenden Auswertegerätes das einlegbare Bildformat bereits bei der Wahl der Aufnahmekammer mit zu berücksichtigen.

Die gebräuchlichen Brennweiten liegen zwischen 45 mm und 200 mm. Sie müssen, wie bereits erwähnt, immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Bildformat gesehen werden. Für einige Einzel- und Stereomeßkamern sind in Tab. 4/1 die Platten- bzw. Filmformate, die nutzbaren Bildformate, die Brennweiten sowie die über die

Bilddiagonale gerechneten maximalen Öffnungswinkel (2α) zusammengestellt. Zum Vergleich der Bildwinkel von terrestrischen Kamern und Luftbildkamern wurden die jeweiligen Brennweiten (f) auf eine Bilddiagonale von 32,5 cm ($\hat{=}$ Diagonale beim Format 23 x 23 cm²) umgerechnet. Diese reduzierten Vergleichsbrennweiten sind mit f_1 bezeichnet und in Spalte 7 von Tab. 4/1 aufgeführt.

Aus Tab. 4/1 ist ersichtlich, daß für die Aufgaben der terrestrischen Photogrammetrie hauptsächlich Meßkamern mit Öffnungswinkeln von ca. 70° (sogenannte Zwischenwinkelkamern) zur Verfügung stehen. Auch das Angebot an Normal- und Weitwinkelkamern (ca. 50° bzw. 90°) ist vielseitig. Extrem große oder kleine Bildwinkel wurden in der Architekturphotogrammetrie bisher kaum eingesetzt.

Hersteller	Kammer	Platten- bzw. Film- format (cm x cm)	Nutzbares Bild- format (cm x cm)	Brenn- weite f (mm)	Maximaler Öffnungs- winkel $2\alpha^\circ$	Vergleichs- brennweite f_1 (mm)	Bemerkungen			
							SW	E	H/Q	12 ⁺⁾
Wild Hasselblad	P 31/200	10,2 x 12,7	8,3 x 11,6	200	39,6	451,8	SW	E	H/Q	12 ⁺⁾
	MK 70/100	6 x 6	5,3 x 5,3	100	41,1	433,9		E	H=Q	
Hasselblad Galileo Zeiss Jenoptik	MK 70/80	6 x 6	5,3 x 5,3	80	50,2	347,1	NW	E	H=Q	
	FTG - 1b	10 x 15	9 x 13	155	54,0	318,8		E	Q	
	TMK 12	9 x 12	8 x 10	120	56,2	304,7		E	H	
	Phototheo	13 x 18	12 x 16,6	190	56,7	301,7		E	Q	
Hasselblad Galileo Galileo Wild Wild Nikon	MK 70/60	6 x 6	5,3 x 5,3	60	64,0	260,3	ZW	E	H=Q	15 ⁺⁾ 10 ⁺⁾
	Verostat	9 x 12	7 x 10,5	100	64,5	257,7		S	Q	
	Veropiast	13 x 18	12 x 17	150	69,5	234,4		S	Q	
	P 31/100	10,2 x 12,7	8,3 x 11,7	100	71,8	223,6		E	H/Q	
	P 32,C 40	6,5 x 9	6 x 8	64	76,4	205,5		E,S	H/Q,Q	
TS 120	6,5 x 9	6 x 8	60	79,6	195,1		S	H		
Jenoptik Jenoptik Zeiss	SMK	9 x 12	8 x 8	56	90,6	161,0	WW	S	H=Q	
	UMK10/1318	13 x 18	12 x 16,6	99	91,9	157,2		E	H/Q	
	TMK,SMK 6	9 x 12	8 x 10	60	93,7	152,3		E,S	H	
Wild Prototyp ¹⁾	P 31/45	10,2 x 12,7	9,2 x 11,8	45	117,9	97,8	UWW	E	H/Q	
	AMK 7/1824	18 x 24	16 x 22	70	125,5	83,6		E	H	

Tab. 4/1 Übersicht über die gebräuchlichsten terrestrischen Aufnahmekamern

E Einzelkammer S Stereokammer NW Normalwinkel
H Hochformat Q Querformat ZW Zwischenwinkel
SW Schmalwinkel WW Weitwinkel UWW Überweitwinkel

+)
1) Hauptpunktverschiebung, Betrag in (mm)
Eigenbaukammer, Dresden (MEYER /96/)

4.1.2 Abhängigkeit verschiedener Fehlergrößen von Brennweite und Bildwinkel

Die Entscheidung über die Wahl der Kammer hängt von den Aufnahmebedingungen sowie von der geplanten Weiterverarbeitung des Bildmaterials ab. So ist (nach HOBBIÉ /55, S.55/) im Hinblick auf die orthophotographische Herstellung von Bildplänen und Photokarten die Verwendung schmalwinkliger (d.h. langbrennweitiger) Aufnahmekammern angebracht. Die Untersuchungen aus /55/ über den Einfluß der Brennweite auf die geometrische und bildhafte Genauigkeit topographischer Orthophotos können hier zu Grunde gelegt werden. Eine direkte Übertragung der Aussagen auf die Architektur-Photogrammetrie erscheint dabei möglich.

Zur Verdeutlichung sollen drei in ihrem Bildwinkel extrem unterschiedliche Aufnahmekammern betrachtet werden. Die für die Beispiele angenommenen Aufnahme- und Auswertedaten sind in Tab. 4/2 zusammengestellt.

Kammer	Wild P 31/45	Zeiss TMK 6	Zeiss TMK 12
Brennweite	45 mm	60 mm	120 mm
Nutzbare Bildformat	9,2 x 11,8 cm ²	8 x 10 cm ²	8 x 10 cm ²
Maximaler Bildwinkel	125,5° (UWW)	93,7° (WW)	56,2° (NW)
Aufnahmeentfernung	4,5 m	6 m	12 m
Bildmaßstab	1:100	1:100	1:100
Orthophotomaßstab	1:25	1:25	1:25

Tab. 4/2 Aufnahme- und Auswertedaten für die nachfolgenden Beispiele bei Verwendung von Kammern unterschiedlicher Bildwinkel

a) Modellgenauigkeit

Die Genauigkeit der Raumkoordinaten eines im Stereoauswertegerät gebildeten Modells ist, abgesehen von gerätetechnischen Einflüssen, von den Fehlern der Aufnahmeoptik (Verzeichnung) und den Filmfehlern (Deformation, Unebenheit) abhängig. Diese Faktoren stehen nach MEIER /90/ und STARK /128/ im Zusammenhang mit der Aufnahmebrennweite. Die Lagegenauigkeit (σ_x, σ_y) im Modell nimmt jedoch mit wachsendem Bildwinkel nur geringfügig ab. Da außerdem die mittleren (x, y)-Koordinatenfehler bei Luftbildaufnahmen in der Größenordnung von etwa 10 μ m im Bildmaßstab liegen, und auch für terrestrische Aufnahmen entsprechende Werte zu erwarten sind (siehe Abschnitt 9.1.2), ist von dieser Seite der Einfluß der Brennweite auf die Genauigkeit des Orthophotos zu vernachlässigen.

Es verbleibt noch die Abhängigkeit des Höhenfehlers dz (in Aufnahme- richtung) vom Bildwinkel. Aus der Beziehung

$$z = \frac{b \cdot c}{x' - x''} \quad (4,1)$$

für den stereophotogrammetrischen Normalfall (z = Aufnahme- bzw. Projektionsentfernung, b = Aufnahmebasis, c = Bildweite, x' bzw. x'' = Bildkoordinaten) erhält man durch Differentiation nach x' bzw. x'' und mit $dx' = dx'' = dk$ (mittlerer Bildkoordinatenfehler) für den Höhenfehler

$$dz = \frac{z}{b} \cdot \frac{z}{c} \cdot \sqrt{2} \cdot dk \quad (4,2)$$

Der Quotient z/b stellt das reziproke Basisverhältnis $1/\delta$ dar, der Faktor z/c die Bildmaßstabszahl m_B .

Unter der Annahme eines konstanten Bildkoordinatenfehlers dk , eines festen Bildmaßstabs $M_B = 1/m_B$ sowie einer konstanten Basis b (was bei gleichem Bildformat einer konstanten Längsüberdeckung entspricht) erhält man eine proportionale (theoretische) Abhängigkeit des Höhenfehlers dz von der Höhe z und damit vom Bildwinkel der Aufnahmekammer ($dz_{NW} : dz_{UWW} = 3,6 : 1$).

Nach Gleichung (3,3c) ergibt ein Höhenfehler dz des Projektors bei der optischen Umbildung einen radialen Punktlagefehler von

$$dr = - r \frac{dz}{z} \quad .$$

Die proportionale Abhängigkeit dz/z fällt also (bei gleicher Objektfläche, d.h. konstantem Radialabstand r) bei der Orthoprojektion wieder heraus, so daß eine Abhängigkeit des radialen Punktfehlers vom Bildwinkel zumindest theoretisch nicht gegeben ist.

Nach den Untersuchungen von MEIER /90/ und STARK /128/ liegt jedoch die empirische Abhängigkeit des Höhenfehlers vom Bildwinkel unter dem theoretischen Wert, d.h. die Höhengenaugigkeit für Normalwinkelkammern ist besser als die theoretische Erwartung ($dz_{NW} : dz_{UWW} \approx 2 : 1$). Dadurch kommt eine gewisse Abhängigkeit des Punktfehlers vom Bildwinkel ins Spiel, so daß bei Verwendung schmalwinkliger Aufnahmekammern mit einer besseren Orthophotogenaugigkeit gerechnet werden kann. Allerdings liegen nach HOBBIE /55, S. 33/ die Höhenfehler im Modell bei Einzelpunktmessung zwischen $10 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$. Da die Auswirkung der Höhenfehler auf die Lagegenauigkeit der Orthophotos gering ist, kommt der ebenfalls geringe Einfluß des Bildwinkels nicht explizit zum Tragen.

b) Abtastfehler

Die Modellgenauigkeit wird bei der differentiellen Entzerrung vom dynamischen Höhenabtastfehler (Abschnitt 3.3.3) überlagert. Der Abtastfehler liegt bei Luftbildauswertungen in der Größenordnung von $30 - 60 \mu\text{m}$ (HOBBIE /55, S. 34/) und hängt unter anderem von den Objektneigungen bzw. -krümmungen sowie von der Abtastgeschwindigkeit ab. Über einen Zusammenhang mit dem Bildwinkel der Aufnahmekammer, d.h. mit der Aufnahmeentfernung liegen keine Angaben vor. In erster Näherung ist jedoch eine der statischen Modellhöhenmessung ähnliche Proportionalität zwischen Abtastfehler und Aufnahmeentfernung zu erwarten (siehe Abschnitt 6.2).

c) Verfahrensfehler

Der bei der Orthoprojektion auftretende Verfahrensfehler (Abschnitt 3.3.2) hängt nach den Gleichungen (3,1) vom Bildformat und der Aufnahmebrennweite, d.h. vom projizierenden Winkel ab. Für den radialen Verfahrensfehler e_r am Streifenrand gilt mit

$$dx = \frac{\Delta x}{2} \quad (\Delta x = \text{Streifenbreite})$$

bei differentieller Entzerrung 0. Ordnung ($B_{x_0} = 0$) nach Gleichung (3,2c)

$$e_r = - \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\frac{r}{z} \tan \beta_x}{1 - \frac{x}{z} \tan \beta_x - \frac{y}{z} \tan \beta_y} \quad (4,3)$$

Die Koordinatenwerte x , y , z sowie der Radialabstand $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ beziehen sich gemäß Abb. 3/9 auf das Projektionszentrum des zur optischen Entzerrung verwendeten Projektors.

Unter der Annahme mittlerer Objektneigungen von $\beta_x = 30^\circ$ und $\beta_y = 0^\circ$ sowie einer Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm ergibt sich aus Gleichung (4,1) der maximale radiale Verfahrensfehler e_r am Streifenrand für die drei Beispiele aus Tab. 4/2 zu:

Kammer	P 31/45 (UWW)	TMK 6 (WW)	TMK 12 (NW)
e_r (mm)	0,60	0,44	0,26

Tab. 4/3 Verfahrensfehler e_r (mm) im Orthophoto in Abhängigkeit vom maximalen Bildwinkel der Aufnahmekammern aus Tabelle 4/2

Aus Tab. 4/3 ist ersichtlich, daß sich der orthophotographische Verfahrensfehler mit abnehmendem Bildwinkel bzw. zunehmender Brennweite der Aufnahmekammer verkleinert.

d) Reliefversetzung

Die beim Orthoprojektionsprozeß innerhalb eines Profilstreifens liegende Objektinformation wird bei der Höhenabtastung nicht berücksichtigt. Sie unterliegt daher weiterhin den Verzerrungen der Zentralperspektive, insbesondere der Reliefversetzung. Das bedeutet, daß Objektteile, die aus der abgetasteten Fläche herausragen, auch im Orthophoto als "umgeklappt", d.h. radial versetzt erscheinen. Nach Gleichung (2,4) ist diese Punktverschiebung von der Brennweite abhängig. In Tab. 4/4 sind die Versetzungsbeträge Δr im Orthophoto (1:25) für verschiedene Vorsprünge Δz am Objekt in Abhängigkeit vom Bildwinkel der Aufnahmekammern (aus Tab. 4/2) angegeben.

Kammer		P 31/45 (UWW)	TMK 6 (WW)	TMK 12 (NW)
$\Delta z = 1 \text{ cm}$	Δr	0,7	0,4	0,2
$\Delta z = 5 \text{ cm}$	(mm)	3,3	2,2	1,1

Tab. 4/4 Reliefversetzung Δr (mm) im Orthophoto (1:25) in Abhängigkeit vom maximalen Bildwinkel der Aufnahmekammern aus Tab. 4/2

Bei Weitwinkel- und Überweitwinkelkammern ist der Betrag der Versetzung Δr am Objekt größer als der Höhenunterschied Δz , da der projizierende Winkel α größer als 45° ist. Der radialen Punktversetzung kann also durch Verwendung langbrennweitiger Kammerm bzw. durch Auswertung in zentralen Bildbereichen entgegengewirkt werden.

e) Bildwanderung

Bei der differentiellen Entzerrung mit kontinuierlicher Abbildung entstehen bei in Profilrichtung geneigter Objektoberfläche durch die zusätzliche Höhenbewegung des Projektors Bewegungsunschärfen (Kapitel 3.3.7 und 6.2). Diese Bildwanderung ist nach Gleichung (3,4) ebenfalls vom projizierenden Winkel abhängig. Für die drei Beispiele ergibt sich mit $\beta_v = 15^\circ$ und einer Blendenbreite von $t = 1 \text{ mm}$:

Kammer	P 31/45 (UWW)	TMK 6 (WW)	TMK 12 (NW)
w_r (mm)	0,57	0,35	0,16

Tab. 4/5 Bildwanderung w_r (mm) im Orthophoto in Abhängigkeit vom maximalen Bildwinkel der Aufnahmekammern aus Tab. 4/2

Wie Tab. 4/5 zeigt, läßt sich auch die Bewegungsunschärfe im Orthophoto mit abnehmendem Bildwinkel bzw. zunehmender Brennweite der Aufnahmekammer reduzieren.

f) Folgerungen aus den Abschnitten a) bis e)

Aus den Beispielen geht hervor, daß die Genauigkeit von Bildplänen allgemein und von Orthophotos im besonderen von der Wahl der Aufnahmebrennweite bzw. des Öffnungswinkels der Kammer abhängt. Verfahrens- und Abtastfehler, Umklappungen und Bewegungsunschärfen lassen sich durch eine gezielte Kameraauswahl erheblich verringern. Für die Herstellung von Photokarten sollten also möglichst lange Brennweiten bzw. kleine Öffnungswinkel verwendet werden. Stehen jedoch keine entsprechenden Aufnahmekammern zur Verfügung, so ist bei der Auswertung der Bildbereich so klein zu wählen, daß er dem Aufnahmebereich einer Langbrennweitigen Kammer gleichkommt. Diese Maßnahme widerspricht einer wirtschaftlichen Projektplanung, ist aber zur Einhaltung der geforderten Genauigkeit und im Hinblick auf eine homogene Bildaussage der Photokarte notwendig.

4.1.3 Tiefenschärfebereich

Nur wenige terrestrische Meßkammern sind bei der Aufnahme auf verschiedene Objektentfernungen fokussierbar (durch Objektivauszug: Jenoptik UMK, Galileo Veroplast/Verostat; durch Zwischenringe: Wild P 31; durch Vorsatzlinsen: Zeiss SMK/TMK). Die übrigen Kammern werden vom Hersteller entsprechend ihrer geplanten Verwendungsmöglichkeiten auf eine feste Aufnahmeentfernung eingestellt. Die Scharfabbildung von Gegenständen, die außerhalb der Fokussierebene liegen, kann in beiden Fällen nur durch eine weitgehende Ausnutzung des Tiefenschärfebereichs erfolgen. Dieser Bereich ist bei starker Objektivabblendung ($< 1:11$) in der Regel jedoch so groß, daß bei der Aufnahme architektonischer Objekte kaum Unschärfen zu befürchten sind, sofern bei fest fokussierten Kammern die Aufnahmeentfernung der Fokussierweite, bzw. bei fokussierbaren Kammern die Fokussierweite der mittleren Aufnahmeentfernung angepaßt wird.

Beispiel für den Tiefenschärfebereich der terrestrischen Meßkammer Wild P 32:

Feste Fokussierung auf $Z = 25 \text{ m}$

Tiefenschärfe bei Blende 8: 7,3 m bis ∞ } für einen Zerstreuungskreis
Tiefenschärfe bei Blende 22: 3,3 m bis ∞ } vom Durchmesser $< 50 \mu\text{m}$

Ist die Aufnahmeentfernung zum Objekt durch begrenzte örtliche Verhältnisse vorgegeben, so sollte eine Kammer gewählt werden, deren Tiefenschärfebereich die Objektausdehnung beinhaltet. Gerade bei der Herstellung von Photokarten muß auf eine maximale Bildschärfe besonderer Wert gelegt werden. Da Kopierprozesse bei der Auswertung die Bildqualität in der Regel verschlechtern, ist es wichtig, daß bereits das bei der Aufnahme gewonnene Ausgangsmaterial eine hohe Auflösung besitzt.

4.1.4 Neigungsmöglichkeiten

Die meisten terrestrischen Aufnahmekammern können mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung gegenüber der Horizontalebene geneigt werden. Dadurch ist es möglich, bei der Aufnahme auch besonders hoch- oder tiefgelegene Objektbereiche zu erfassen. Die Neigungen Ω lassen sich je nach Kammertyp stufenweise oder kontinuierlich einstellen. Zur Reduktion der geneigten Aufnahmen auf die Objektbezugsebene stehen bei graphischen Auswertungen spezielle Transformationsgetriebe (Neigungsrechner) zur Verfügung.

Im Hinblick auf die Orthophotoherstellung sollten jedoch große Kammerneigungen vermieden werden, weil einerseits die Bildqualität durch die starke Entzerrung vermindert wird, und weil zum anderen nur wenige Orthoprojektions-Gerätesysteme zur Umbildung derartiger Aufnahmen eingerichtet sind.

Die Neigungsmöglichkeit von terrestrischen Meßkammern stellt somit kein Kriterium für die Kammerwahl im Hinblick auf die Orthophotoherstellung dar.

4.2 Aufnahmeanordnung

In engem Zusammenhang mit der Wahl der Meßkammer steht die Planung der Aufnahmeanordnung. Diese Planung wird in der Regel durch gegebene oder vorgeschriebene Aufnahmeverhältnisse sowie durch die verfügbaren Kammern beeinflusst bzw. eingeschränkt.

So werden (abgesehen von den Gegebenheiten am Objekt) das Basisverhältnis, die Aufnahmeentfernung, die Kammerorientierung und die Modellgröße den Parametern Brennweite, Öffnungswinkel und Tiefenschärfebereich angepaßt.

4.2.1 Aufnahmeentfernung

In Abschnitt 4.1.2 wurde für die Herstellung von Photokarten die Forderung nach schmalwinkligen bzw. langbrennweitigen Kammern ausgesprochen. Bei vorgegebenem Bildmaßstab wird also eine entsprechend große Aufnahmeentfernung notwendig. Sind am Objekt starke Tiefenunterschiede (in Aufnahmerichtung) vorhanden, so sollte mit Rücksicht auf den z-Bereich des Auswertesystems ebenfalls eine große Aufnahmeentfernung gewählt werden. Andererseits darf aber aus Gründen der photographischen Auflösung und Bildqualität der Bildmaßstab wiederum nicht zu klein sein. Die Aufnahmeentfernung ist außerdem auf den Tiefenschärfe-Bereich der zur Verfügung stehenden Kammer abzustimmen. Diese Optimierungsaufgabe wird durch die örtlichen Verhältnisse am Objekt meist erschwert.

4.2.2 Basisverhältnis

Fehlertheoretische Untersuchungen und praktische Erfahrungen (MEYER /93/, RASLAN /110, S. 35/, FINSTERWALDER-HOFMANN /32, S.159/) haben gezeigt, daß das Basisverhältnis bei terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen zwischen den Grenzen

$$1/20 < \vartheta < 1/4$$

liegen soll.

Wird für eine bestimmte Aufgabe eine hohe Abstandsgenauigkeit (in Aufnahmerichtung) gefordert, so ist entsprechend Gleichung (4,2)

$$dz \sim \frac{1}{\vartheta}$$

ein großes Basisverhältnis (z.B. $\vartheta = 1/5$) zu wählen. Eine weitere Steigerung bis zu Werten, die in der Luftbildphotogrammetrie üblich sind ($\vartheta_{UWW} = 1/1$, $\vartheta_{WW} = 2/3$, $\vartheta_{NW} = 1/3$), ist nur möglich, wenn die relativen Tiefenunterschiede am Objekt klein sind. Um bei der Auswertung von Architekturaufnahmen stark gegliederter Fassaden oder reichhaltig dekorierten Innenräume bei der Stereobetrachtung ein Zerfallen des räumlichen Eindruckes durch übermäßige x-Parallaxen zu verhindern, sollte hier das Basisverhältnis klein gehalten werden.

Die Länge der Aufnahmebasis wird also zweckmäßigerweise der Struktur des aufzunehmenden Objekts angepaßt. Der mittlere Erfahrungswert für das Basisverhältnis liegt zwischen $1/8$ und $1/10$.

Bei einigen Stereoauswertegeräten, die zur Modellerzeugung für die Orthoprojektion verwendet werden, ist das einstellbare Basisverhältnis erheblichen Beschränkungen unterworfen. Zum Beispiel beträgt der minimale Wert

beim Gerätesystem Wild A 8 / PPO 8 $\vartheta = 1/5,4$

und beim Zeiss Ortho-3-Projektor $\vartheta = 1/3,5$.

Derartige Zwangsbedingungen sind gegebenenfalls bei der Stereoaufnahme mit zu berücksichtigen.

4.2.3 Äußere Orientierung der Meßkammern

Zur vereinfachten Aufnahme und Auswertung terrestrisch-photogrammetrischer Modelle stehen spezielle, für den "Normalfall" eingerichtete Geräte zur Verfügung. Stereomeßkammern mit fester Basis und dazu senkrechten, parallelen Aufnahmeachsen (Zeiss SMK 40/120, Wild C 40/120, Jenoptik SMK 40/120) sowie Stereokartiergeräte ohne Orientierungsmöglichkeit (Zeiss Terragraph, Wild A 40) beschleunigen den Arbeitsablauf und rationalisieren das Verfahren.

Auch bei der Herstellung von terrestrischen Orthophotos kann im Normalfall ausgewertet werden. Die relative Orientierung der Meßbilder beschränkt sich dabei auf minimale Korrekturen an den durch die Nullung der Ableseuhren bereits vorhorizontierten Bildträgern. Andererseits besitzen sämtliche für die Orthoprojektion in Frage kommenden Gerätesysteme Orientierungsmöglichkeiten für ϕ , ω und κ , so daß eine direkte Forderung nach vororientierten Modellen im Sinne des Normalfalls für die Orthophotoherstellung nicht besteht. Trotzdem sollte bei der Aufstellung der Meßkammern darauf geachtet werden, daß keine Neigungen größer als ca. $\pm 5^\circ$ auftreten, weil die Freiheitsgrade der meisten Stereoauswertegeräte in diesem Bereich zu Ende gehen. Das gleiche gilt für die Ausrichtung der Aufnahmebasis parallel zur Objektfläche.

4.2.4 Anzahl der Modelle

Bei der stereophotogrammetrischen Aufnahme nahezu ebener Objekte hängt die Modellgröße und damit die Anzahl der Modelle vom gewünschten Bildmaßstab und der gewählten Überdeckung ab. Während bei Luftaufnahmen die Basislänge über den ganzen Flugstreifen hin konstant gehalten wird, um eine gleichmäßige Überdeckung (z.B. $p = 60\%$) und einen kontinuierlichen Nettomodellanschluß zu gewährleisten, ist in der terrestrischen Photogrammetrie der seitliche Abstand der Aufnahmebasen auf Grund der stärkeren Längsüberdeckung meist größer als die Basis selbst (Abb. 4/6). Für eine Längsüberdeckung von beispielsweise $p = 90\%$ ist die Basislänge $b = 0,1 \cdot s$, wobei s die dem Bildformat in Basisrichtung entsprechende Objektstrecke darstellt. Die Entfernung des rechten Standpunktes der Standlinie A zum linken Standpunkt der Standlinie B beträgt in diesem Fall dagegen $e = 0,8 \cdot s$, wenn von einem exakten Modellanschluß ohne Sicherheitsüberdeckung ausgegangen wird.

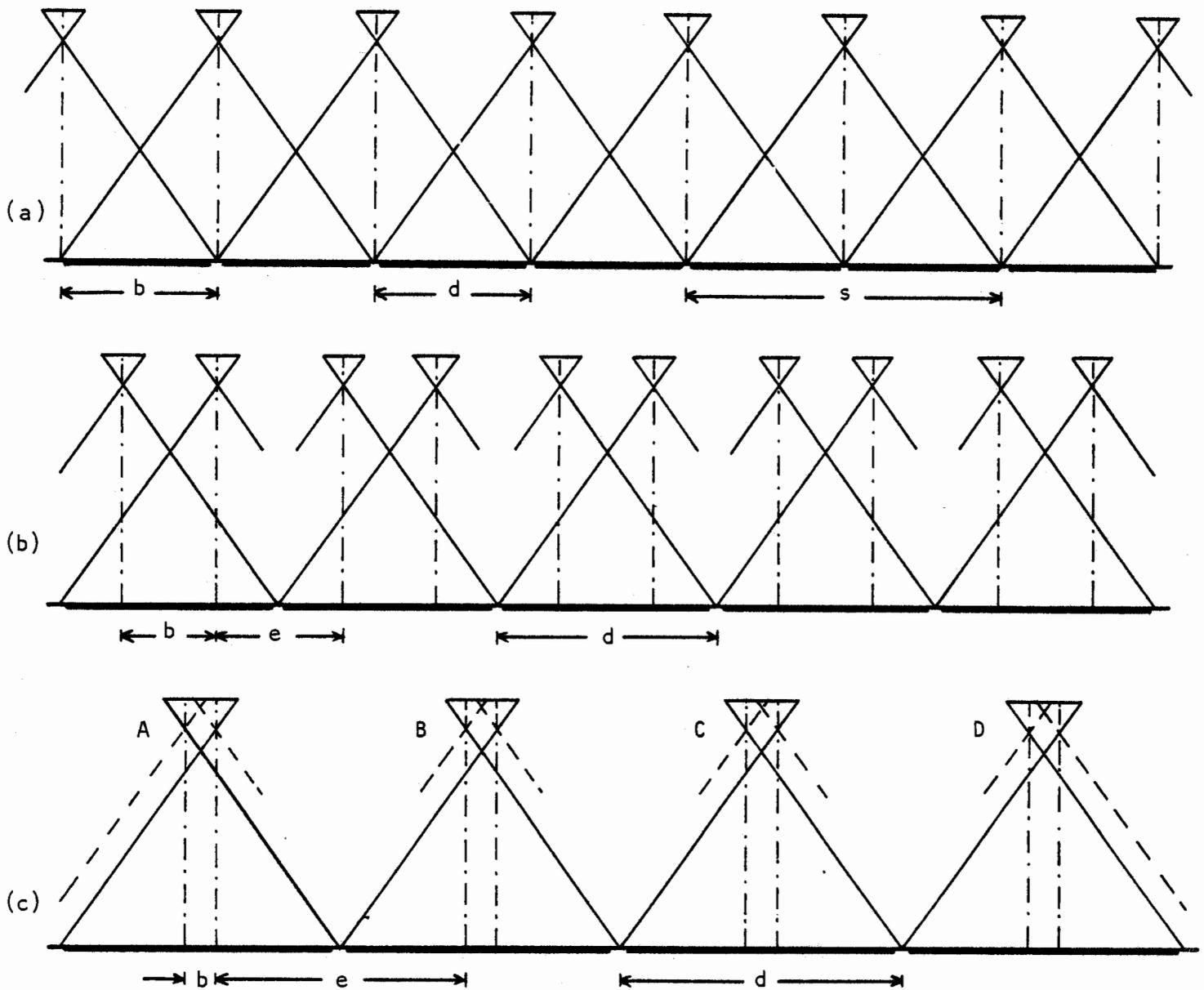


Abb. 4/6 Modellbreite und Anzahl der Modelle bei einer Längsüberdeckung von 50 %, 70 % und 90 %, ohne Sicherheitsrand

(a) $p = 50 \%$ $d = 0,5 s$ $e = 0$ $b = 0,5 s$ $n = 7$

(b) $p = 70 \%$ $d = 0,7 s$ $e = 0,4 s$ $b = 0,3 s$ $n = 5$

(c) $p = 90 \%$ $d = 0,9 s$ $e = 0,8 s$ $b = 0,1 s$ $n = 4$

p Längsüberdeckung (%)
 s Bildformat, bezogen auf
das Objekt

b Aufnahmebasis
 Aufnahmekammer

d Modellbreite
 e Seitlicher Abstand der
Aufnahmestandlinien
 n Anzahl der Modelle
(hier bezogen auf eine Objekt-
breite von ca. $3,5 s$)

Aus Abb. 4/6 ist ersichtlich, daß sich bei größerer Längsüberdeckung die Anzahl der Modelle vermindert. Eine Aufnahmeanordnung mit möglichst wenigen aneinandergrenzenden Modellen (+ Sicherheitsrand) ist daher vom aufnahme- und auswertetechnischen Standpunkt aus am wirtschaftlichsten. Diese Konstellation kann durch eine starke Überdeckung der Einzelbilder der Modelle, d.h. durch ein kleines Basisverhältnis erreicht werden.

Bei der Planung der Aufnahmeanordnung ist jedoch nicht nur die Wirtschaftlichkeit (im obigen Sinne) maßgebend. Gerade für die Herstellung von Bildplänen sind im Hinblick auf die Vermeidung von Unstetigkeiten und Punktversetzungen die spezifischen Objekt-daten mit zu berücksichtigen. Dazu gehören die Ausdehnung des Objekts in Breite und Höhe, die Tiefengliederung sowie die dekorative Ausstattung.

Bei nahezu ebenen Objektfronten (Fassaden, Wände) wird die Anordnung der Modelle zweckmäßigerweise den Objektausdehnungen so angepaßt, daß mit einer kleinstmöglichen Modellanzahl die gesamte Fläche abgedeckt wird. Bei Objekten mit starker Tiefengliederung durch Vorsprünge, Gesimse, Säulen oder Stuckornamentik sollte von der oben genannten Minimal-Anordnung abgewichen werden (Abb.4/7), weil hier die geometrischen Gesichtspunkte (Verfahrensfehler, Reliefversetzung, Bildwanderung) dominierend sind.

Vorsprünge oder herausragende Objektteile verursachen auf Grund der Zentralperspektive Reliefversetzungen, Verdeckungen und sichttote Räume. Diese Fehler sind (ebenso wie die Verfahrensfehler und die Bildwanderung) abhängig vom projizierenden Winkel (siehe Abschnitt 4.1.2), d.h. vom Radialabstand des jeweiligen Gegenstandes von der Aufnahmeachse. Daraus ergibt sich die Empfehlung, daß an den Bildrändern keine aus der Bezugsebene herausragenden Objektteile abgebildet werden sollen. Dieser Forderung kann, wie Abb. 4/7 zeigt, durch eine entsprechende Verschiebung bzw. seitliche Begrenzung der Modelle weitgehend entsprochen werden.

In jedem Fall sollte also bei der Aufnahme darauf geachtet werden, daß Objektvorsprünge in die Mitte eines Bildes zu liegen kommen (Abb. 4/7 (b), schraffierte Flächen). Dieses Bild wird dann im Orthoprojektor zur Belichtung des Orthophotos verwendet. Stehen für die Auswertung genügend Aufnahmen bzw. Modelle zur Verfügung, so ist es meist angebracht, nur den Zentralteil eines Bildes zur Umbildung heranzuziehen, was einer Verengung des Öffnungswinkels entspricht.

Zwischen der gewünschten Homogenität und Genauigkeit eines Orthophotos einerseits und der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens andererseits muß hinsichtlich der Aufnahme- und Modellanzahl ein Kompromiß gefunden werden. Dabei sollte die geometrisch und bildmäßig richtige Darstellung des Objekts dominierend sein.

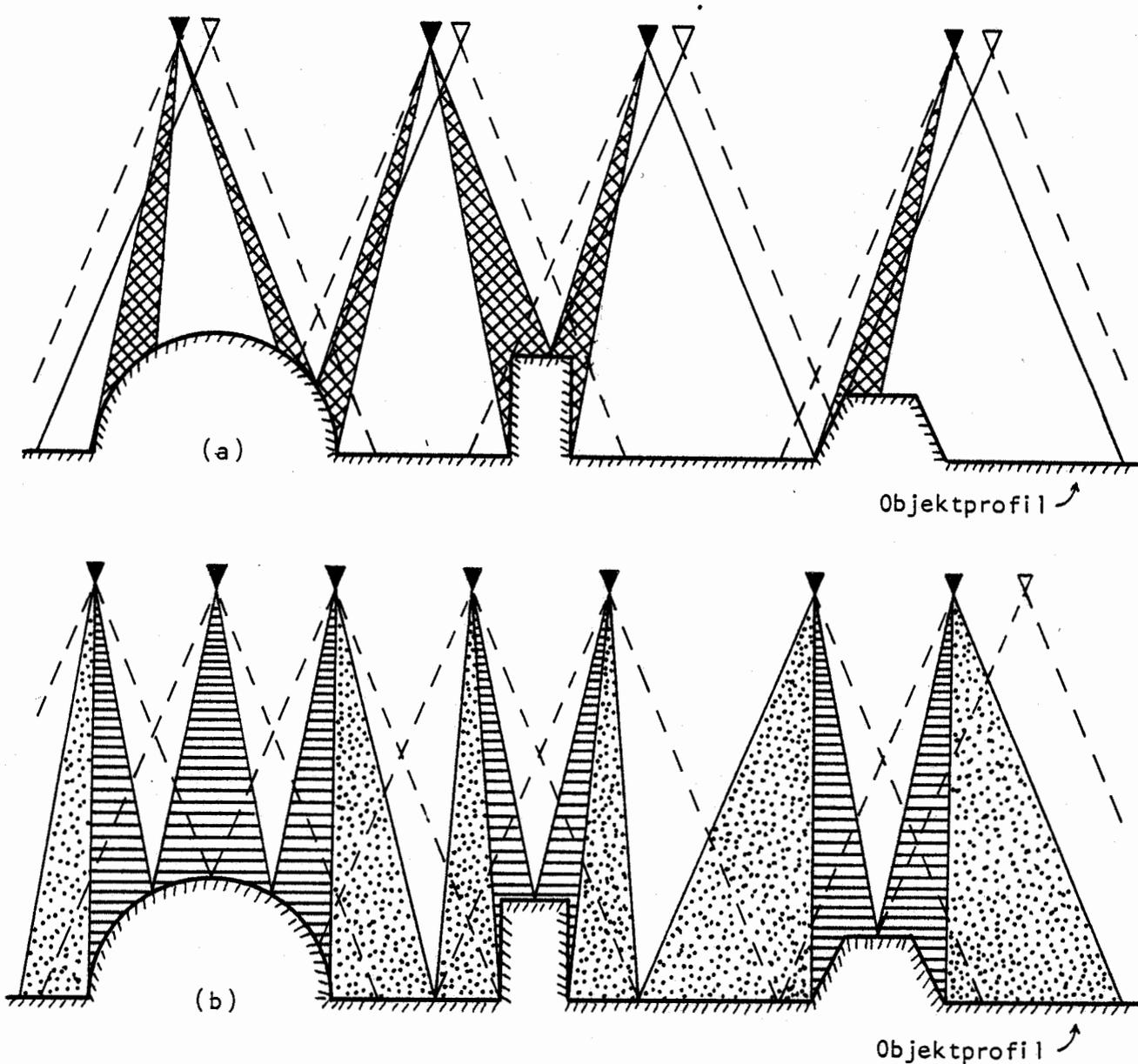


Abb. 4/7 Zwei mögliche Modellarrangements in Abhängigkeit von der Objektstruktur

- ▽ Aufnahmekammer
- ▼ Zur Orthoprojektion verwendetes Bild
- (a) Geometrisch ungünstige Modellarrangement:
8 Aufnahmen, 4 Orthophotos
Vorsprünge im Bildrandbereich
- (b) Geometrisch günstige Modellarrangement:
8 Aufnahmen, 7 Orthophotos
Vorsprünge im zentralen Bildbereich
- Flache Zonen im Bildrandbereich

4.3 Vorbereitungen zur Aufnahme

4.3.1 Paßpunkte

Für die absolute Modellorientierung im Orthoprojektions-Steuergerät sind terrestrische Paßpunkte notwendig. Dieselben Punkte können bei einer späteren Bildmontage auch zur Einpassung bzw. Zuordnung der Teilbilder verwendet werden. Die örtliche Vermessung von Paßpunkten erfolgt in der Regel durch Vorwärtsschnitt, Polaraufnahme oder Bogenschnitt sowie durch Nivellement und trigonometrische Höhenbestimmung.

Als terrestrische Paßpunkte dienen gut identifizierbare, diskrete Punkte am aufzunehmenden Objekt. Oft ist die unmittelbare Verwendung von Detailstrukturen möglich, wobei aber darauf geachtet werden muß, daß die Eindeutigkeit der Punkte bei der terrestrischen Vermessung von verschiedenen Standpunkten aus sowie bei der photogrammetrischen Aufnahme in beiden bzw. allen Bildern auch bei unterschiedlicher Beleuchtung und Perspektive gewährleistet ist. Verzierungen, Beschläge oder Mauerritzen sind geeignete natürliche Paßpunkte. Stehen derartige Strukturpunkte nicht zur Verfügung, so können am Objekt in Abhängigkeit von der Modellanzahl und der Modellausdehnung künstliche Paßpunkte angebracht werden. Die Art und Größe dieser Signale richtet sich nach dem Bildmaßstab, dem endgültigen Maßstab der Photokarte, dem verwendeten Photomaterial sowie nach der Anzahl der Kopierprozesse und nach der Beleuchtung bei der Aufnahme. Als zweckmäßig erscheinen Ringmarken (BERLING /6/, JÄNSCH /62/, LÖSCHNER /84/) oder selbstklebende Punkte mit 5 - 50 mm Durchmesser, deren Farbe bzw. Tönung auf den Untergrund abzustimmen ist, wobei der Kontrast möglichst groß gewählt werden sollte. Bei Verwendung weißer bzw. heller Punkte auf dunklem Grund oder dunkler Punkte auf hellem Grund ist zu beachten, daß die Überstrahlung der hellen Flächen einen entscheidenden Einfluß auf die Sichtbarkeit und Meßbarkeit der Paßpunkte im Bild ausübt.

Da die Paßpunkte außer zur Modellorientierung meist auch zur späteren Orthophotoeinpassung herangezogen werden, sollten Signale verwendet werden, die auch nach mehreren Kopierprozessen noch sichtbar sind, deren Größe oder Form aber den ästhetischen Ausdruck der Photokarte nicht beeinträchtigt.

In vielen Fällen bewährt sich eine Probeaufnahme zur Auswahl von Signalen unterschiedlicher Form und Farbe, um eine optimale Anpassung an das Objekt und an die Aufnahmeverhältnisse zu gewährleisten.

4.3.2 Vorkehrungen am Objekt

Dient die photogrammetrische Aufnahme der Herstellung von Bildplänen und Photokarten, so ist das darzustellende Objekt für die Abbildung und Wiedergabe in einen "Sollzustand" zu versetzen. In Kartierungen und Plänen werden in der Regel nur baulich wichtige oder kunsthistorisch wertvolle Entwurfs- und Gestaltungselemente wiedergegeben. Dazu gehören unter Umständen nicht das Mobiliar, Lampen, Vorhänge und Teppiche sowie Beschläge, Haken oder Schilder. Das bedeutet, daß vor der Aufnahme spezielle Vorkehrungen in Form von Räumarbeiten oder Demontagen erforderlich sind.

4.4 Lichtverhältnisse, Beleuchtung

Entscheidenden Einfluß auf die Qualität photographischer Produkte haben die Lichtverhältnisse, die zur Zeit der Aufnahme im Freien oder in geschlossenen Räumen herrschen. Ist als Ergebnis der photogrammetrischen Arbeit eine Strichdarstellung in Form einer Stereokartierung vorgesehen, so genügen bisweilen Aufnahmen guter bis mittlerer photographischer Qualität zur Detailerkennung und linienweisen Umsetzung am Stereoauswertegerät. Für die Herstellung und spätere Direktverwendung von Photokarten sollten jedoch extrem hohe Ansprüche an die Güte der Aufnahmen gestellt werden. Neben der Wahl geeigneter Photomaterialien und der Abstimmung von Schicht-Empfindlichkeit, Blende und Belichtungszeit ist auf eine vorteilhafte Beleuchtung des Objekts Wert zu legen. Reichen die natürlichen Lichtverhältnisse hierfür nicht aus, so müssen Scheinwerfer oder Blitzlicht eingesetzt werden.

Homogen geschwärzte Bilder entstehen im Freien bei diffusem Licht und bedecktem Himmel. Direkte Sonneneinstrahlung verursacht harte Kontraste und starke Schlagschatten, die nicht nur den Ausdruck des Bildes stören, sondern auch bisweilen Detailstrukturen verdecken.

Aufnahmen in Innenräumen erfordern meist künstliche Beleuchtung. Für Blitzlichtaufnahmen können handelsübliche Elektronenblitzgeräte (z.B. Fabrikate: Braun, Metz, Rollei) größerer Reichweite verwendet werden. Eine zweite Möglichkeit ist die Benutzung von Halogenscheinwerfern (diverse Fabrikate, Leistungsaufnahme bis etwa 2000 Watt), wie sie bei Studioaufnahmen zum Einsatz kommen. Beide Hilfsmittel unterscheiden sich jedoch sehr wesentlich bezüglich Ausleuchtung, Handhabung und Aufwand, worauf im folgenden näher eingegangen werden soll.

Eine gleichmäßige Raumausleuchtung kann bei Blitzlicht nur selten erreicht werden. Die Wirkung des Blitzes auf die verschiedenen Bereiche des Raumes ist sehr schwer abzuschätzen. Auch Spiegelungen und Überstrahlungen sind wenig kontrollierbar. Die so entstehenden Aufnahmen weisen daher meist harte Konturen und hohe Kontraste auf. Eine gleichmäßige oder für manche Zwecke geplant betonte Beleuchtung (z.B. zum Ausgleich des Lichtabfalls in den Randbereichen von SMK-Aufnahmen) ist dagegen unter Verwendung von Halogenscheinwerfern möglich, die während der Aufnahme verschwenkt werden. Weiche Konturen und ausgeglichene Übergänge der Graustufen machen die Meßbilder gleichzeitig zu ästhetisch befriedigenden Photographien und zur geeigneten Grundlage für die Herstellung von Photokarten.

Der Qualitätssteigerung durch die Verwendung von Scheinwerfern steht die einfachere Handhabung von Blitzgeräten gegenüber. Die kurzen Belichtungszeiten bei geblitzten Aufnahmen stellen keine allzu großen Anforderungen an die Stabilität der Kameraaufstellung, was bei federndem Parkett oder Teppichboden und hoch ausgefahrener Kammer von Bedeutung sein kann. Allerdings hat die Erfahrung bei der Bauaufnahme "Schloß Linderhof" gezeigt, daß unter ca. 200 Innenraumaufnahmen bei Belichtungszeiten von mindestens zehn Sekunden und äußerst ungünstiger Kameraaufstellung keine sichtbaren Bewegungsunschärfen auftraten. Die genannten Schwierigkeiten sind daher als nicht allzu kritisch zu beurteilen.

Elektronenblitzgeräte arbeiten im Batteriebetrieb und sind somit unabhängig von Netzanschlüssen. Halogenlampen erfordern auf Grund ihrer hohen Leistungsaufnahme (bis 2000 Watt) eine gut abgesicherte Stromzufuhr, was in älteren Bauwerken nicht immer gewährleistet ist. Die intensive Wärmeabgabe und das Nachglühen von Halogenscheinwerfern können gerade in historischen Räumen für Teppiche und Vorhänge eine besondere Brandgefahr darstellen.

Trotz der erheblichen Vorteile von Blitzgeräten in der Handhabung erscheinen Halogenlampen durch die gezieltere Raumausleuchtung und die damit verbundene bessere Bildqualität besonders im Hinblick auf die Herstellung von Photokarten geeigneter zu sein.

Auch bei Verwendung von künstlichen Lichtquellen ist zu beachten, daß keine Schlagschatten entstehen. Bei glänzendem Wanddekor oder bei Spiegeln können Reflexionen der Scheinwerfer oder Blitzgeräte den Bildkontrast beeinträchtigen und Überstrahlungen hervorrufen. Störende Reflexionen treten meist durch einander gegenüberliegende Spiegel auf. Hier ist es angebracht, die Spiegelflächen vor der Aufnahme mit schwarzem Papier abzukleben. Ist dies nicht möglich, so werden bei der Bildplanbearbeitung umfangreiche Retuschen notwendig.

Die Herstellung von Photokarten erfordert also gegenüber der Stereokartierung auch in Bezug auf die Beleuchtung und die dadurch entstehenden Probleme eine gewissenhaftere Planung und Durchführung der Aufnahme, wobei praktische Erfahrung besonders wichtig ist.

5. Vorbereitungen zur orthophotographischen Auswertung von Architektur-Bildplänen

5.1 Aufbereitung des Bildmaterials, Kontrastausgleich

Das bei der Aufnahme gewonnene Bildmaterial (Filme oder Platten) wird als erstes einem photographischen Entwicklungsprozeß unterzogen, der aus dem eigentlichen Entwickeln, dem Fixieren und dem Auswässern besteht. Die Art der Verarbeitung (Temperatur und Konzentration der Flüssigkeiten, Dauer der Behandlung) richtet sich in der Regel nach den von den Materialherstellern für die jeweiligen Emulsionen und Chemikalien angegebenen Empfehlungen.

Beispiel: Photoplatten: Agfa/Perutz Silbereosin, 12 DIN
Entwicklung: Tetenal Ultrafin, Zeit: 7,5 min
Fixieren: Agfa Acidofix, Zeit: 10 min
Wässern: Zeit: 20 min

Sollen die Filme oder Photoplatten als Grundlage zur Herstellung von Bildplänen dienen, so ist auf saubere Dunkelkammerarbeit besonderer Wert zu legen. Beim Trocknen der photographischen Schicht entstehen oft Wasserflecken, die aber durch einen entsprechenden Wasserzusatz (z.B. Mirasol von Tetenal) verhindert werden können. Der Trockenprozeß erfolgt zweckmäßigerweise bei stehenden oder schwach geneigten Platten (bzw. hängenden Filmen) und leichter Luftzufuhr.

Terrestrische Aufnahmen weisen in der Regel starke Kontraste auf. Das liegt zum einen an der Beleuchtung des Objekts. Sonnenbestrahlung erzeugt an Gebäudefassaden helle Lichtpartien, die von Zonen harter Schlagschatten unterbrochen werden. Auch bei künstlichem Licht, vor allem bei Blitzaufnahmen, können große Helligkeitsunterschiede entstehen. Ein zweiter Faktor ist die Emulsion der feinzeichnenden Photoplatten, die die natürlichen Kontraste in der Regel noch verstärkt. Das für die Orthoprojektion zu verwendende Bild sollte daher, wenn möglich, einem Kontrastausgleich unterzogen werden.

Der Kontrastausgleich kann nach SCHWEISSTHAL /115, S. 35/ und SCHWIDEFSKY-ACKERMANN / 118, S. 84/ in einem Umbildeprozeß (Vergrößerungsgerät) durch manuelles Abdunkeln ("Abwedeln") der im Negativ hellen Bereiche, sowie durch partielles Nachbelichten der dunklen Bereiche, im Kontaktverfahren nach dem Prinzip der "Unschärfer Maske" oder auch elektronisch durchgeführt werden. Zum Kopieren der kleinen Vorlagen (Plattenformate 6 x 6 bis 13 x 18 cm²) erscheinen die elektronischen Systeme (z.B. Log-Etronics, Milligan) am geeignetsten. Bei diesen Geräten wird das Negativ von dem Lichtpunkt einer Kathodenstrahlröhre zeilenweise abgetastet. Eine Photozelle steuert die Intensität der zur Belichtung des Positivs verwendeten Lichtquelle in Abhängigkeit von der Dichte des Negativs.

Gerade für die Bildplanherstellung ist ein ausgeglichenes und homogenes, aber dennoch informationsreiches Halbtonbild eine entscheidende Voraussetzung.

5.2 Vorüberlegungen zur Auswertung

5.2.1 Bildformat, Kammerkonstante

Die weitgehende Standardisierung der Bildformate auf $23 \times 23 \text{ cm}^2$ und der Kammerkonstanten auf 85, 153 und 305 mm hat in der Aerophotogrammetrie zur Entwicklung spezieller Geräte zur Auswertung von Luftbildern geführt (z.B. Wild A 8, Zeiss Planimat D 2). Sonderkonstruktionen zur linienhaften Verarbeitung terrestrischer Aufnahmen mit kurzen Brennweiten und kleinen Bildformaten decken den Bereich der terrestrischen Stereokartierung ausreichend ab (z.B. Wild A 40, Zeiss Terragraph, Jenoptik Technocart). Die Universalität früherer Gerätetypen (z.B. Wild A 7, Zeiss C 8) wurde also zugunsten spezieller Modelle aufgegeben. In gleicher Weise sind die Orthoprojektoren auf Luftbildformate ($23 \times 23 \text{ cm}^2$) und entsprechende Bildweiten (85, 153, 305 mm) standardisiert, soweit sie nicht auf dem Prinzip analytischer Plotter beruhen. Diese Verlagerung impliziert nun aber Probleme für die Herstellung von Orthophotos aus terrestrischen Aufnahmen mit Hilfe von Geräten, die ausschließlich auf Luftbilder eingerichtet sind.

So treten bereits bei der Wiederherstellung der inneren Orientierung Schwierigkeiten auf. Das Bildformat terrestrischer Kammern ist in der Regel kleiner als das Luftbildformat. Daher ist ein Zentrieren der Filme oder Photoplatten auf den üblichen Bildträgern nicht unmittelbar möglich. Auch die Bildweite terrestrischer Kammern weicht in den meisten Fällen stark von den im Gerät einstellbaren Werten ab. Bei ungünstiger Konfiguration stimmen weder Bildformat noch Kammerkonstante mit den Gegebenheiten von Profilsteuergerät und Orthoprojektor überein.

Die zur Behebung dieser Schwierigkeiten erforderlichen Maßnahmen sind in Abb. 5/1 in einem Flußdiagramm dargestellt. Dabei kennzeichnet die hervorgehobene Linie den einfachen Fall, daß das Bild auf der Trägerplatte direkt zentriert werden kann ($s' = s$), und daß auch die Bildweite unmittelbar am Gerät einstellbar ist ($c' = c$).

Reichen die Einpaßlinien der Bildträger nicht bis zu den Rahmenmarken der Meßbilder, so wird entweder eine Umbildung ($s \rightarrow \bar{s}$), das heißt, eine Vergrößerung der Photoplatten (Filme) notwendig (Abschnitt 5.2.3), oder es müssen die Bilder nach einem besonderen Zentrierverfahren auf den Trägerplatten ausgerichtet werden. Im folgenden sind drei Möglichkeiten der Zentrierung angegeben.

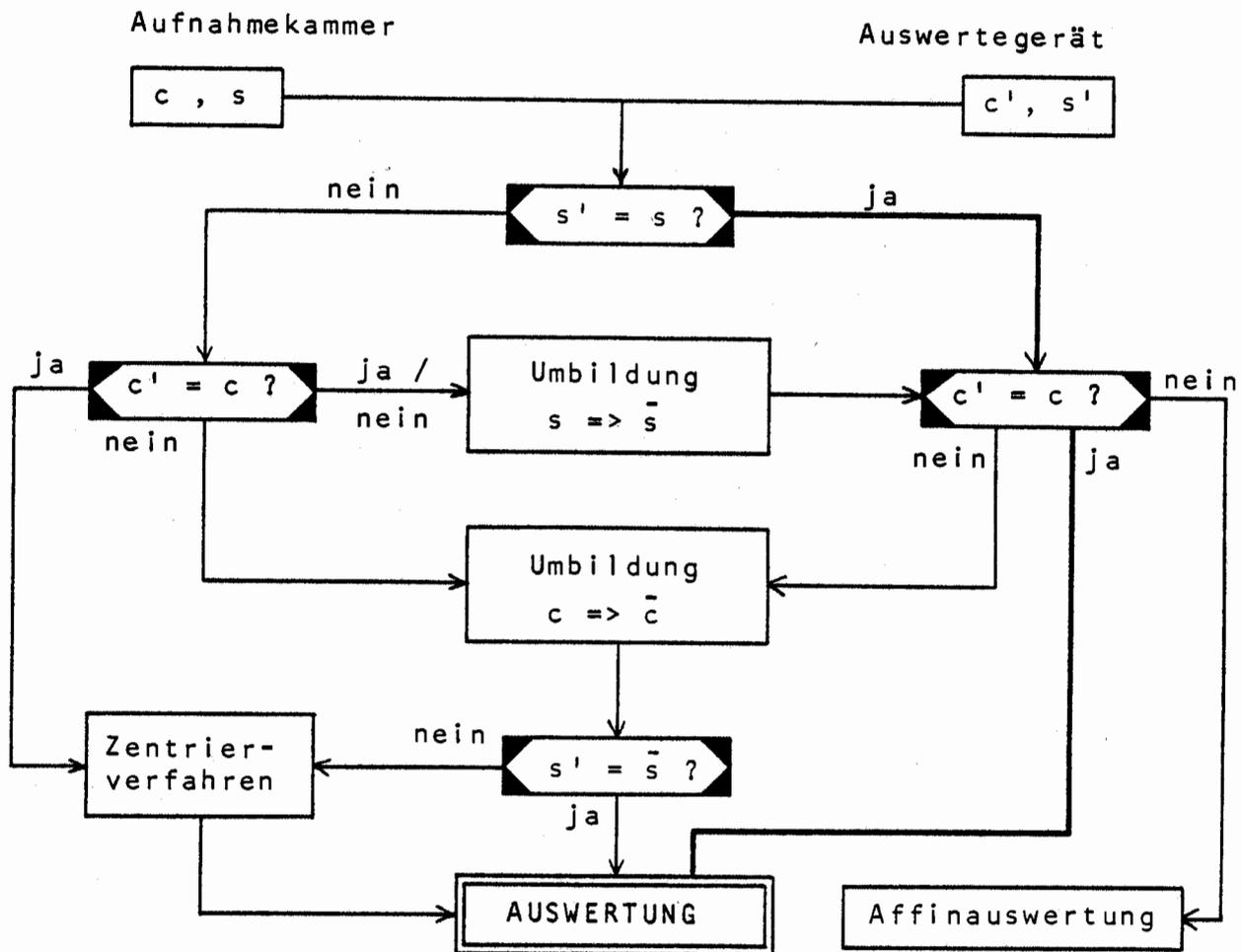


Abb. 5/1 Maßnahmen zur Anpassung von Bildformat und Bildweite terrestrischer Aufnahmekammern an Stereoauswertegeräte und Orthoprojektoren

- c Bildweite der Aufnahmekammer
- s Bildformat der Aufnahmekammer
- c' Einstellbare Bildweite am Auswertegerät
- s' Zentrierbares Bildformat am Auswertegerät
- c̄ Bildweite nach der Umbildung
- s̄ Bildformat nach der Umbildung

1. Der Bildträger wird auf dem Leuchttisch eines Koordinatographen mit Hilfe der gravierten Rahmenstriche parallel zu den Koordinatenachsen ausgerichtet. Durch Drehen und Verschieben kann dann die Photoplatte auf die Achsen des Koordinatographen und damit auf den Bildträger eingepaßt werden.
2. Eine indirekte Zentrierung ist möglich, wenn um die Photoplatte herum eine Maske aus dünnem Film (oder Folie) gelegt wird, der mit Einpaßlinien versehen ist. Die Maske sollte von den Einpaßlinien der Bildträger bis zu den Rahmenmarken der Photoplatten reichen und im Bildteil der Aufnahmen ausgespart sein. Die Fokussierung am Gerät kann auf die Schicht der Photoplatte eingestellt werden, so daß keine Beeinträchtigung der Auswertung zu erwarten ist.

3. Sind in den Bildträgern Mittenkreuze eingraviert, so lassen sich die Photoplatten darauf zentrieren. Zuvor ist jedoch die Markierung der Bildmitten notwendig. Die Bestimmung des Mittelpunktes erfolgt zweckmäßigerweise an einem Koordinatographen, Komparator oder Punktübertragungsgerät. Der eingestellte Punkt kann in die Schicht gebohrt oder geschlagen werden. Die beim Einlegen der Platten mit Sicherheit auftretende Kantung wird im Zuge der relativen Orientierung beseitigt. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Zerstörung des Bildinhaltes in Plattenmitte, was besonders im Orthophoto unangenehm sein kann.

Ist die Aufnahmekammerkonstante c am Stereoauswertegerät bzw. am Orthoprojektor nicht direkt einstellbar, so können die Aufnahmen auch mit einer davon abweichenden Bildweite c' affin ausgewertet werden, wenn entsprechende geometrische Korrekturen bei der inneren und äußeren Orientierung vorgenommen werden. Eine zweite Möglichkeit der Bildweitenanpassung ist durch eine maßstäbliche Umbildung der Aufnahmen auf eine am Gerät einstellbare Bildweite \bar{c} gegeben. Beide Verfahren werden im folgenden näher beschrieben:

5.2.2. Affinauswertung

Bei der Affinauswertung erfolgt die Projektion der Bilder mit einer von der Aufnahme-Kammerkonstanten c verschiedenen Bildweite c' , d.h. mit veränderter innerer Orientierung. Für die Orthoprojektion kommen dabei je nach Aufnahmekammer und zur Verfügung stehendem Steuer- und Projektionssystem zwei Möglichkeiten in Betracht:

1. Affine Modellbildung - affine Orthoprojektion

Ist die Aufnahmebildweite c weder am Stereoauswertegerät noch am Orthoprojektor einstellbar, und wird von einer generellen Umbildung der Aufnahmen (Abschnitt 5.2.3) abgesehen, so kommt nur die Gesamt-Affinauswertung in Frage. In diesem Fall haben sowohl das Stereomodell als auch die Orthoprojektion affine Verhältnisse. Diese Konstellation tritt z.B. bei allen Orthoprojektionssystemen auf, bei denen kein 3. Projektor vorhanden ist, d.h. wo der umzuprojizierende Bildausschnitt direkt aus einem der Stereobilder im Auswertegerät entnommen wird (z.B. Galileo Orthophoto - Simplex, Jenoptik Topocart - Orthophot, Wild A 8 - PPO 8). Ebenso ist eine Affinauswertung bei Gerätesystemen in Betracht zu ziehen, wo der 3. Projektor eine "Kopie" der Auswertekammern des Steuergerätes darstellt (z.B. Zeiss Ortho-3-Projektor, Zeiss Stereoplanigraph C 8 - GZ 1).

2. Nicht affine Modellbildung - affine Orthoprojektion

Diese kombinierte Auswertetechnik ist möglich, wenn am Stereoauswertegerät eine direkte, also nicht affine Modellbildung vollzogen werden kann, und nur am Orthoprojektor ein affines Strahlenbündel erzeugt wird. Die reine Affinprojektion kommt ausschließlich bei Geräten mit 3. (separatem) Projektor in Frage. Zum Beispiel können terrestrische Aufnahmen am Zeiss Planimat mit entsprechendem Kammerzubehör direkt ausgewertet werden. Die Orthophotoherstellung am GZ 1 erfolgt aber in affiner Projektion.

Liegen strenge Nadiraufnahmen ($\phi = 0, \omega = 0$) vor, so bewirkt die Deformation der Strahlenbündel (infolge Veränderung der inneren Orientierung) unterschiedliche Maßstäbe für den Grundriß und die Höhe des gebildeten Modells (siehe Abb. 5/2).

Sonstige Verzerrungen oder auch γ -Parallaxen treten in diesem Fall nicht auf (FINSTERWALDER /31/, HOBBIE /51/, RINNER/111/).

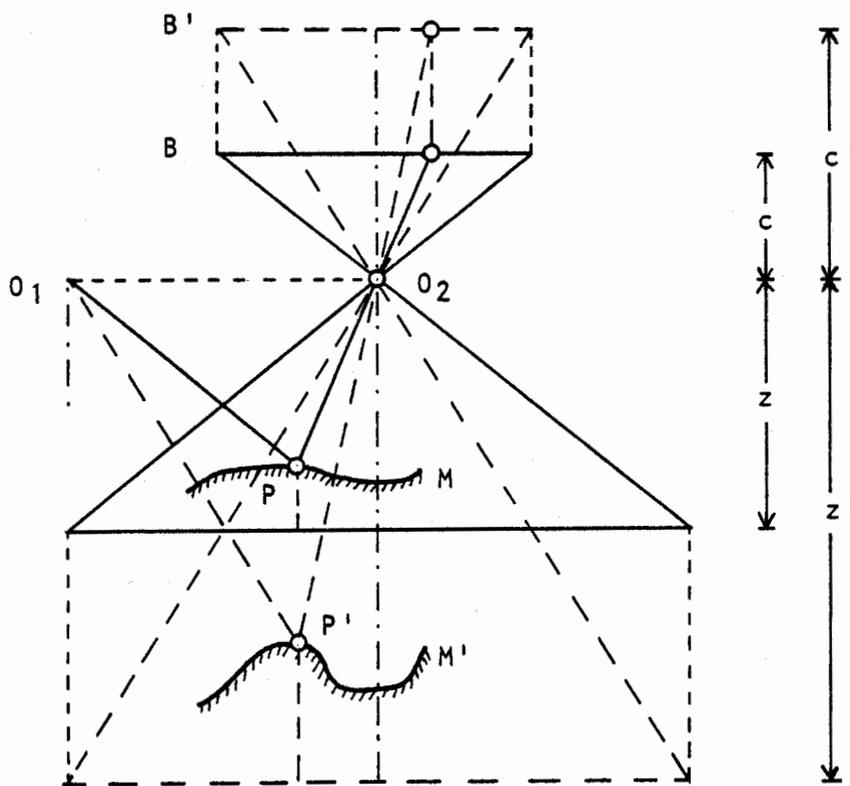


Abb. 5/2 Affinprojektion von Nadiraufnahmen im Stereo-Auswertegerät

c	Aufnahmebildweite	c'	Auswertebildweite
z	Projektionsentfernung	z'	Projektionsentfernung bei Affinauswertung
O_1, O_2	Projektionszentren		
M	Stereomodell	M'	Affines Stereomodell

Das Modell

$$M = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

geht bei der Affinprojektion von Nadiraufnahmen über in das Modell

$$M' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ k \cdot z \end{pmatrix}, \quad (5,1)$$

wobei der Faktor

$$k = \frac{c'}{c} \quad (5,2)$$

das Verhältnis der Auswertebildweite c' zu der Aufnahmebildweite c darstellt. Er wird als Affinitätsfaktor bezeichnet.

Ist die Aufnahme­richtung gegenüber der Objekt­bezugsebene um den Winkel ν geneigt, so ist keine klare Trennung von Grundriß- und Höhenmaßstab mehr möglich, da die Dehnung oder Stauchung des Strahlenbündels in Aufnahme­richtung erfolgt. Infolge der schrägen Projektion tritt also eine Deformation des Grundrisses auf.

Nach FINSTERWALDER /31, S. 11/ und HOBBIE /51/ kann auch bei geneigten Aufnahmen ein fehlerfreies Affinmodell (nach Gleichung (5,1)) erzeugt werden, wenn die innere und äußere Orientierung der Bilder bei der Auswertung wie folgt verändert werden:

$$c' = k \cdot c \frac{\cos \nu'}{\cos \nu} \approx k \cdot c - \dots \quad (5,3a)$$

$$\nu' = \arctan(k \cdot \tan \nu) \approx k \cdot \nu + \dots \quad (5,3b)$$

$$e = c' \cdot \tan \nu' - c \cdot \tan \nu \approx c \cdot \nu(k^2 - 1) + \dots \quad (5,3c)$$

$$\frac{l'}{l} = \frac{\cos \nu'}{\cos \nu} \approx 1 + \frac{\nu'^2}{2} (k^2 - 1) - \dots \quad (5,3d)$$

In den Gleichungen (5,3) bedeuten:

- | | | | |
|----------------|--|--------|------------------------------------|
| c | Aufnahmebildweite | c' | Auswertebildweite |
| ν | Aufnahmebildneigung | ν' | Einzustellende Auswertebildneigung |
| e | Bilddezentrierung (Hauptpunktverschiebung) parallel zur Bildhauptsenkrechten (BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 21/) | | |
| $\frac{l'}{l}$ | Affine Bildlängung (Dehnung des zu projizierenden Bildes parallel zur Bildhauptsenkrechten) | | |
| k | Affinitätsfaktor | | |

Für kleine Bildneigungen (Senkrechtaufnahmen) kann nach HOBBIE /51/ mit den angegebenen Näherungsformeln gerechnet werden.

Die Einstellung der Bildweite c' und der Projektionsneigung ν' bereitet im allgemeinen keine Schwierigkeiten. Dagegen erfordert die Berücksichtigung der Bilddezentrierung ein aufwendiges Einpaßverfahren mit Hilfe eines Koordinatographen oder Komparators (FINSTERWALDER /31, S. 48/). Sind die Bildneigungen ν nicht a priori bekannt, so müssen die Bilder zuerst zentrisch in das Stereoauswertegerät eingelegt, und die Neigungen durch Orientierung in 1. Näherung bestimmt werden, bevor die Bilddezentrierung erfolgen kann.

Es stellt sich auf Grund dieser Erschwernisse die Frage, unter welchen Genauigkeitseinbußen auf eine Bilddezentrierung verzichtet werden kann. Nach HOBBIE /51/ ergibt sich im Orthophoto bei nicht berücksichtigter Dezentrierung ein Lagefehler Δd (bezogen auf den Bildmaßstab von

$$\Delta d = \frac{\Delta z}{z} \cdot c \cdot v \cdot (k^2 - 1) \quad (5,4)$$

Dieser Lagefehler hängt von den relativen Objekthöhenunterschieden $\Delta z/z$ (in Aufnahme­richtung), von der Bildneigung v sowie vom Affinitätsfaktor k ab.

Als Beispiel sind die Lagefehler, die bei Affinprojektion einer Zeiss TMK-Aufnahme ($c = 60$ mm) mit einer Auswertebildweite von $c' = 150$ mm am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 auftreten, für Bildneigungen bis $0,59$ und relative Höhenunterschiede bis $\pm 35\%$ in einem Diagramm (Abb. 5/3) dargestellt.

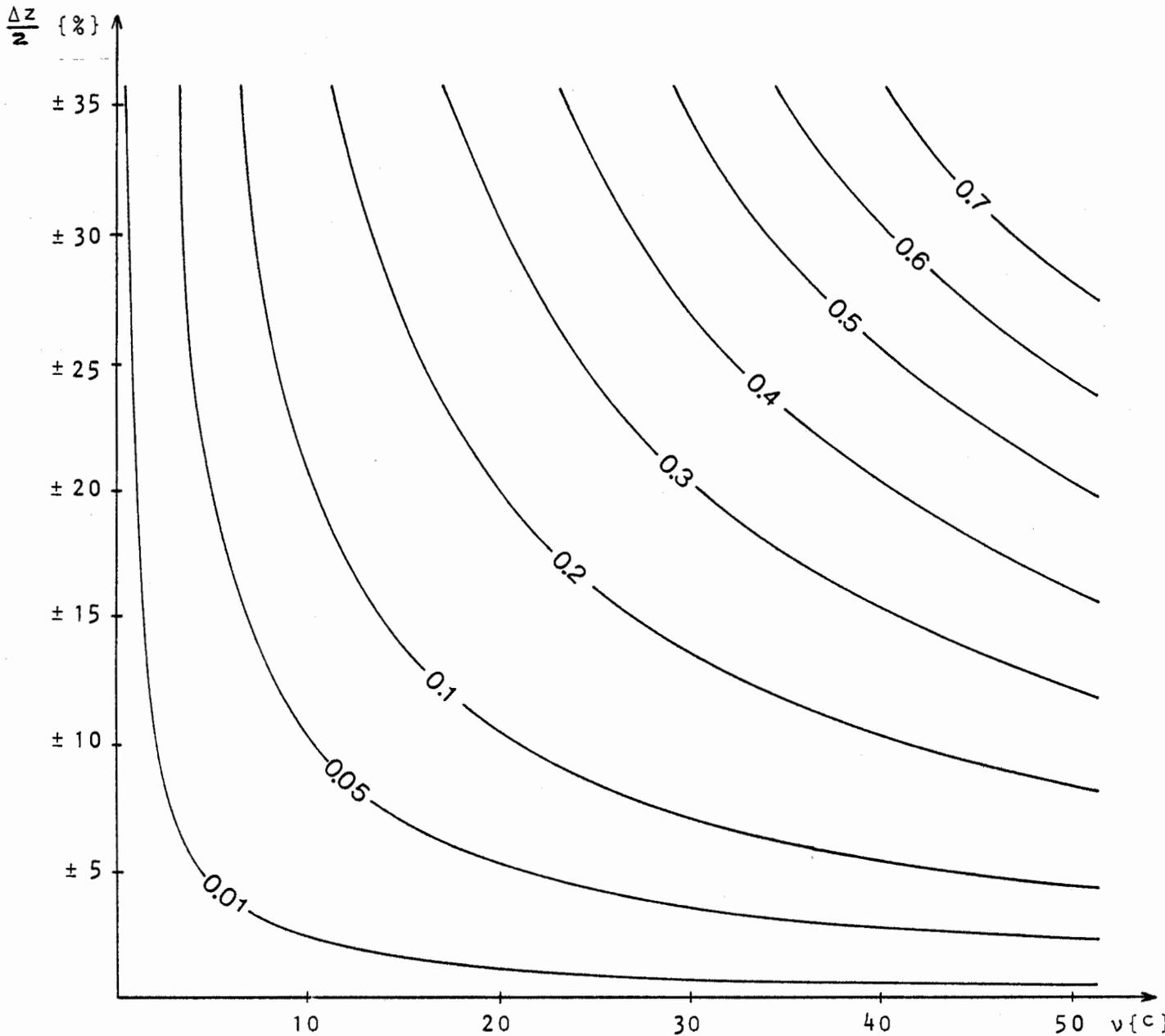


Abb. 5/3 Maximale Lagefehler Δd (mm) bei Vernachlässigung der Bilddezentrierung in Abhängigkeit von der Bildneigung v (c) und den relativen Objekthöhenunterschieden $\Delta z/z$ (%) für den Affinitätsfaktor $k = 2,5$, bezogen auf den Bildmaßstab.

Aus Abb. 5/3 ist ersichtlich, daß bei Orthoprojektion mit einem Affinitätsfaktor von $k = 2,5$ mm bei geringen Objekthöhenunterschieden (z.B. $\pm 10\%$) und kleinen Bildneigungen (z.B. 10°) auf eine Bilddezentrierung verzichtet werden kann, wenn eine Fehlerschranke von beispielsweise $0,05$ mm (im Bildmaßstab) eingehalten werden soll.

Neben der Bilddezentrierung ist zur Korrektur der Projektionsstrahlenbündel eine affine Bildlängung nach Gleichung (5,3d) erforderlich. Diese Dehnung des Bildinhalts parallel zur Bildhauptsenkrechten (BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 21/) ist aber mit vertretbarem Aufwand derzeit instrumentell nicht durchführbar. Daher entstehen bei der Orthoprojektion affine Lagefehler, die sich nach HOBBIÉ /51/ zu

$$\Delta l = l \left(\frac{\cos v}{\cos v'} - 1 \right) \approx l \frac{v^2}{2} (k^2 - 1) \quad (5,5)$$

berechnen lassen. Die Fehler hängen vom Abstand l der jeweiligen Bildpunkte von der Bildhauptwaagerechten (BUCHHOLTZ-RÜGER /13, S. 21/), von der Bildneigung v sowie vom Affinitätsfaktor k ab. Zum Beispiel ergeben sich bei einer Bildneigung von $v = 49$ und einem Affinitätsfaktor von $k = 2,5$ bereits Lagefehler von $\Delta l = 2$ mm auf eine Strecke von $l = 20$ cm. Es tritt also eine affine Verkürzung des Bildinhalts im Orthophoto im Verhältnis von 1:100 auf.

Wird dagegen im Stereoauswertegerät und entsprechend auch im Orthoprojektor keine absolute Orientierung der Bilder durchgeführt, so erscheint das Objekt im Orthophoto um den Faktor

$$\frac{s'}{s} = \frac{1}{\cos v} \approx 1 + \frac{v^2}{2} \quad (5,6)$$

verkürzt. Der relative Streckenfehler beträgt in diesem Fall nur

$$\frac{\Delta s}{s} \approx \frac{v^2}{2} \quad (5,7)$$

im Vergleich zu

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{v^2}{2} (k^2 - 1)$$

aus Gleichung (5,5). Bei Vernachlässigung einer Bildneigung von $v = 49$ ergibt sich also eine affine Verkürzung im Orthophoto von nur etwa 1:500. Aus den Gleichungen (5,5) und (5,7) folgt, daß bei einem Affinitätsfaktor von $k > 1,4$ (d.h. bei $k^2 - 1 > 1$) auf eine absolute Orientierung der Bilder verzichtet werden sollte. Abgesehen von den geringeren Affinfehlern im Orthophoto entfällt in diesem Fall auch die aufwendige Dezentrierung des Meßbildes. Die Umgehung der absoluten Orientierung ist allerdings nur möglich, wenn keine Höhenauswertung vorgesehen ist.

Der Unterschied zwischen der Affinprojektion mit absoluter Orientierung (und mit Bilddezentrierung, aber unter Vernachlässigung der affinen Bildlängung l'/l) und der Affinprojektion ohne absolute Orientierung, d.h. bei Vernachlässigung der Bildneigung ν , soll an einem praktischen Beispiel verdeutlicht werden:

Das in Abb. B/1 im Anhang dargestellte Fachwerkhaus wurde mit der Stereomeßkammer Zeiss SMK 120 ($c = 60$ mm) aus einer Entfernung von ca. 14 m aufgenommen. Der Bildmaßstab betrug etwa 1:250. Die Ausrichtung der Basis gegenüber der Fassade erfolgte auf $\Delta\phi = 3,59^\circ$. An der Gerätekombination Zeiss Planimat - GZ 1 wurden zwei Orthophotos in affiner Projektion ($k = 2,5$) hergestellt.

Im ersten Fall wurde das Stereomodell im Planimat nach der relativen Orientierung in seiner räumlichen Lage belassen (Normalfall, $\phi' = \phi'' = \omega' = \omega'' = 0$). Die Hausfassade erschien also um $3,59^\circ$ gegenüber der Fläche $z = 0$ im Auswertegerät geneigt. Der bei der Orthoprojektion entstandene Affinfehler in x-Richtung betrug 13 mm auf 8,90 m, d.h. 1,5 %. Eine ebene Ähnlichkeitstransformation von 60 Orthophotopunkten auf die entsprechenden Objektpunkte ergab einen mittleren Koordinatenfehler von 7 mm am Objekt.

Für die zweite Orthophotoauswertung wurde das Modell am Planimat absolut orientiert. Das zu projizierende Bild wurde im Orthoprojektor um $e = 17,42$ mm exzentrisch eingelegt, die Bildneigung ergab sich nach Gleichung (5,3b) zu $\Delta\phi' = 2,5 \cdot 3,59 = 8,759^\circ$. Bereits bei der Paßpunktkontrolle im Orthoprojektor zeigte sich eine Verkürzung des projizierten Bildes parallel zur Bildhauptsenkrechten von umgerechnet 7 cm auf 8,90 m am Objekt, was einer Affinität von 8 % entspricht. Der mittlere Koordinatenfehler nach einer ebenen Ähnlichkeitstransformation der 60 Orthophotopunkte auf das Objekt betrug 15 mm. Die Einpaßgenauigkeit reduzierte sich nach einer ebenen Affintransformation auf ebenfalls 7 mm, wie im Fall der ersten Auswertung. Die Affinität ergab sich aus den Transformationsparametern zu 8,2 %.

Auch dieser praktische Versuch hat gezeigt, daß eine Affinprojektion mit absolut orientierten Bildern bei einem Affinitätsfaktor von $k = 2,5$ schlechtere Ergebnisse liefert als eine Auswertung ohne Berücksichtigung der äußeren Orientierung.

Die Notwendigkeit zusätzlicher optischer und feinmechanischer Einrichtungen zur Bilddezentrierung, der Genauigkeitsverlust durch Vernachlässigung der affinen Bildlängung sowie der erhebliche Mehraufwand beim Einlegen der Bilder lassen eine sinnvolle Anwendung des Verfahrens auch bei günstigeren Affinitätsfaktoren als zweifelhaft erscheinen. Durch die Verwendung langer Brennweiten bei der Aufnahme erhöht sich die Chance einer direkten Auswertung und nicht-affinen Orthoprojektion. Stehen keine entsprechenden Aufnahmekammern zur Verfügung, so können die Meßbilder vor der eigentlichen Auswertung optisch umgebildet werden.

5.2.3 Optische Umbildung

Die Angleichung von Aufnahmebrennweite und Bildformat an die im Stereoauswertegerät bzw. im Orthoprojektor verifizierbaren Größen kann, wie bereits in Abschnitt 5.2.1 angesprochen wurde, durch optische Umbildung der Original-Meßbilder erfolgen. In den meisten Fällen wird eine Vergrößerung der Brennweiten von 45,60 oder 100 mm auf 150 mm (Luftbild-Weitwinkelkammer) bzw. eine Vergrößerung der Bildformate von 6x6, 9x12 oder 13x18 cm² auf das Luftbild-Standardformat von 23x23 cm² in Frage kommen. Bei Verwendung langbrennweitiger Aufnahmekammern ist auch eine Verkleinerung der Brennweiten von 190 bzw. 200 mm auf 150 mm denkbar.

Die Umbildung kann an einem speziellen Umbildeggerät (z.B. Wild U 4A, Zeiss Reduktor), an einem Vergrößerungsgerät (z.B. Wild VG 1) oder an einem photogrammetrischen Entzerrungsgerät (z.B. Jenoptik Rectimat, Wild E4, Zeiss SEG V) durchgeführt werden. Amateurphotographische Vergrößerungsgeräte sollten für derartige Umbildungen wegen der großen Objektivverzeichnung (bis zu 100 µm), der meist unzureichenden Planlage des Emulsionsträgers sowie wegen der nicht immer gewährleisteten Parallelität von Bild- und Projektionsebene nicht verwendet werden.

Bei der optischen Umbildung mit Hilfe eines photogrammetrischen Umbilde-, Vergrößerungs- oder Entzerrungsgerätes entstehen (nach Abschnitt 9.1.3) Fehler in der Größenordnung von etwa 5 - 10 µm, welche die Orthophoto-Gesamtgenauigkeit nur geringfügig verschlechtern. Dagegen treten bei der Affinprojektion infolge Vernachlässigung der affinen Bildlängung je nach Bildneigung und Affinitätsfaktor Fehler in der Größenordnung von etwa 50 - 500 µm (bezogen auf den Bildmaßstab) auf. Trotz des Mehraufwandes (2 Planfilme oder Diaplatten 24x30 cm²: ca. DM 10.- pro Modell, der Zeitaufwand für die Vergrößerung kann etwa dem der Bilddezentrierung gleichgesetzt werden) erscheint die optische Umbildung gegenüber der Affinauswertung aus Genauigkeitsgründen als vorteilhafter.

5.2.4 Modellbereiche

Ein wichtiger Faktor bei der Wahl der Aufnahmeanordnung ist die Kenntnis der Modellbereiche des zu verwendenden Auswertegerätes. Dabei spielen die Modellgrenzen für x und y in den meisten Fällen eine untergeordnete Rolle, vor allem dann, wenn zur Orthoprojektion vorwiegend zentral gelegene Bildteile herangezogen werden (Abschnitt 4.2.4). Während bei topographischen Auswertungen selten relative Geländehöhenunterschiede von mehr als 20 % auftreten, entspricht die Architekturaufnahme bisweilen einer Hochgebirgsbefliegung bei Geländeausdehnungen von über 50 % der Aufnahmeentfernung. Derartige Höhenunterschiede beanspruchen den z-Bereich topographischer Stereo-Auswertegeräte und Orthoprojektoren bis an die Grenzen, in vielen Fällen wird eine zonenweise Auswertung in verschiedenen Modellmaßstäben notwendig. Abb. 5/4 zeigt die konstruktionsbedingten Beschränkungen des vertikalen Modellbereichs am Gerätesystem Zeiss-Stereoplanigraph C 8 - Orthoprojektor GZ 1 im on-line-Betrieb.

Als praktisches Beispiel sollen hier die gerätetechnischen Begrenzungen bei der Auswertung des in Abb. B/9 im Anhang dargestellten Orthophotos der Hauptkuppel Ottobeuren angeführt werden. Das Stereomodell wurde am Zeiss Planimat gebildet, die Orthoprojektion erfolgte am GZ 1 im off-line-Betrieb. Durch entsprechende Zahnradsätze am Speichergerät SG 1 konnte eine 2,5-fache Vergrößerung vom Modell zum Orthophoto erreicht werden. Die Kuppelmitte war 34 m von der Aufnahmekammer entfernt, die Kapitelle der die Kuppel umgebenden Säulen lagen 20 m oberhalb der Projektionszentren. Obwohl die Kapitelle nicht zur Entzerrungszone gehörten, mußten sie für die Orientierung sowie für eine Teilkartierung mit in den z-Bereich aufgenommen werden.

Mit Rücksicht auf die minimale Projektionsentfernung von 335 mm im Orthoprojektor GZ 1 konnte der Orthophotomaßstab nicht kleiner als 1:59,7 sein. Auf der anderen Seite war die maximale Objektentfernung im Modell durch den Höhenbereich des Planimat auf 240 mm begrenzt. Der größtmögliche Orthophotomaßstab betrug daher 1:56,7. Durch die erheblichen Beschränkungen in den z-Bereichen der Geräte ergab sich nur ein äußerst geringer Spielraum für die Wahl von Modell- und Orthophotomaßstab.

Nicht alle Orthoprojektionssysteme besitzen ähnlich große z-Bereiche. Deshalb ist im Hinblick auf eine problemlose Auswertung eine sorgfältige Planung der Aufnahmeanordnung erforderlich. Das gilt ganz besonders dann, wenn mehrere Orthophotos eines Raumes oder einer Fassade zu einem Mosaik zusammengefügt werden sollen. Hier ist ein einheitlicher Modellmaßstab bzw. Orthophotomaßstab anzustreben, um zusätzliche Kopierarbeiten zu vermeiden.

Es ist zweckmäßig, an den Grenzen der Modellbereiche geringe Sicherheitsabstände freizulassen. Zum Beispiel bewirkt das Erreichen der Endlagenkontakte beim Orthoprojektor Zeiss GZ 1 über Alarmschaltung eine Abkopplung der Motoren und damit eine vorzeitige Beendigung der Orthoprojektion.

Bei Affinauswertung verändert sich der notwendige z-Bereich mit dem Affinitätsfaktor k . Ein Überschreiten der Modellgrenzen kann aber in der Regel durch entsprechende Anpassung des Modellmaßstabes verhindert werden.

In unmittelbarem Zusammenhang mit dem z-Bereich eines Stereo-Auswertegerätes steht die einstellbare Modellbasis, d.h. das realisierbare Basisverhältnis. Einige Auswertegeräte erlauben eine Verkleinerung der Basiskomponente b_x bis auf 0 mm, so daß die in der terrestrischen Photogrammetrie vorkommenden Basisverhältnisse von ca. 1:10 oder 1:20 ohne Schwierigkeiten eingestellt werden können. Probleme treten beim Orthophotosystem Wild A 8 - PPO 8 auf. Hier beträgt das kleinstmögliche Basisverhältnis etwa 1:5, beim Zeiss Ortho-3-Projektor sogar nur 1:3,5. Diese Geräte dürften also nur bei minimaler Tiefengliederung des Objekts zur Orthophotoherstellung geeignet sein, wenn mit entsprechend großer Aufnahmebasis gearbeitet werden kann.

5.2.5 Auswertemaßstäbe

Bei der Herstellung von Orthophotokarten aus terrestrischen Aufnahmen werden in der Regel folgende Maßstabsgruppen durchlaufen:

- Bildmaßstab der Aufnahme z.B. 1:250
- Maßstab der Bildvergrößerung (Umbildung) 1:100
- Modellmaßstab im Stereoauswertegerät 1:30
- Orthophotomaßstab 1:15
- Maßstab der (kombinierten) Photokarte 1:50

Das Verhältnis von Bildmaßstab und Kartenmaßstab stellt in der Luftbildphotogrammetrie eine wichtige Planungsgröße dar und wird in der Regel nach den Kriterien Genauigkeit, Bildqualität (Auflösungsvermögen) und Wirtschaftlichkeit festgelegt. Der Bildmaßstab sollte nach BRUCKLACHER /11/, HOBBIÉ /55/ und KÖNIG /73/ nicht kleiner als 1/6 des Photokartenmaßstabes sein. Das optimale Maßstabsverhältnis liegt bei etwa 1:3 bzw. 1:4. Diese Richtwerte gelten aber vorwiegend für den topographischen Anwendungsbereich und lassen sich nicht oder nur in beschränktem Maße auf die terrestrische Photogrammetrie übertragen. Der Bildmaßstab von Architekturaufnahmen ist in erster Linie von der Brennweite der zur Verfügung stehenden Kammer sowie von den durch örtliche Gegebenheiten oft stark beeinflussten Aufnahmeentfernungen abhängig und ist dadurch eine nur selten frei wählbare Planungsgröße.

Der Maßstab einer Bildvergrößerung zur Angleichung von Bildweite oder Bildformat an das Auswertegerät wird durch das Verhältnis zwischen Aufnahme- und Auswertebildweite bzw. Aufnahme- und Auswertebildformat bestimmt. Der Vergrößerungsfaktor bei der Umbildung von SMK - Aufnahmen ($c = 60$ mm) für die Auswertung am Gerätesystem Zeiss C 8 - GZ 1 ($c = 150$ mm) beträgt zum Beispiel $v = 2,5$.

Wie bereits im Abschnitt 5.2.4 gezeigt wurde, bewegt sich der Modellmaßstab bei terrestrischen Auswertungen infolge der Beschränkungen durch die z-Bereiche von Stereoauswertegerät und Orthoprojektor in engen Grenzen. Das Verhältnis von Modellmaßstab und Orthophotomaßstab ist gerätebedingt und kann bei einigen Auswertesystemen in vorgegebenen Schritten variiert werden. Um den Einfluß von Verfahrensfehlern (Abschnitt 6.1) und Bewegungsunschärfen (Abschnitt 6.2) im Orthophoto klein zu halten, sollte der Maßstab der Orthoprojektion und damit bereits der Modellmaßstab möglichst groß gewählt werden.

Insgesamt gesehen läßt das Verfahren dem Bearbeiter wenig Freiheit für individuelle Planung. Der Einfluß auf die einzelnen Maßstäbe ist gering, so daß sich an den Orthoprojektionsprozeß in jedem Fall eine reproduktionstechnische Weiterverarbeitung anschließen muß, um das Orthophoto auf den gewünschten Photokartenmaßstab zu bringen. Derartige Umbildungen sind in der kartographischen Praxis wegen des damit verbundenen Mehraufwandes und einer gefürchteten Einbuße an Bildqualität unerwünscht - aber dort meist auch nicht erforderlich, weil im Gesamtarbeitsablauf von der Befliegung bis zur Orthophotoherstellung ein weiterer Spielraum für die Maßstabswahl gegeben ist.

5.3 Orientierung

5.3.1 Innere Orientierung

Die Wiederherstellung der inneren Orientierung im Stereoauswertegerät bzw. im Orthoprojektor geschieht durch das Einlegen und Zentrieren der Meßbilder sowie durch das Einstellen der Aufnahme-kammerkonstante. Zur inneren Orientierung gehört weiterhin die Berücksichtigung (Kompensation) der Objektivverzeichnung.

Die Möglichkeiten der Bildzentrierung wurden bereits im Abschnitt 5.2.1 beschrieben. Ist die Aufnahme-kammerkonstante am Auswertegerät nicht direkt einstellbar, so können die Bilder entweder vor der Auswertung optisch umgebildet oder affin projiziert werden. Aus Genauigkeitsgründen (Abschnitt 5.2.3) ist der optischen Umbildung gegenüber der Affinauswertung der Vorzug zu geben.

Die maximale Verzeichnung der Aufnahme- und Umbildeobjektive (z.B. für die Kammer: Wild P 31, P 32, Zeiss SMK, TMK; für die Umbildeggeräte: Wild VG 1, E 4, U4A, Zeiss SEG V, Reduktor) liegt nach Angaben der Gerätehersteller bei jeweils etwa $\pm 5 - 10 \mu\text{m}$. Sie kann bei graphischen und photographischen Arbeiten in der Architekturphotogrammetrie unberücksichtigt bleiben.

5.3.2 Relative Orientierung

Für die relative Orientierung terrestrischer Aufnahmen können die aus der Luftphotogrammetrie geläufigen optisch-mechanischen Verfahren in der Regel nicht übernommen werden, weil sich terrestrische Stereomodelle durch ihre große Längsüberdeckung und starke Höhengliederung, bisweilen auch durch Unvollständigkeit in den Randbereichen oder durch das Auftreten "gefährlicher Flächen" sehr wesentlich von Luftbild-Modellen unterscheiden.

Der Überdeckungsbereich architekturphotogrammetrischer Aufnahmen ist bei Basisverhältnissen von $1/20 < \vartheta < 1/4$ meist (vor allem bei Weitwinkelaufnahmen) erheblich größer als 60 % des Bildformates. Zum Beispiel ergibt sich unter Verwendung einer Weitwinkelmeßkammer Zeiss TMK 6 ($c = 60 \text{ mm}$, nutzbares Bildformat $8 \times 10 \text{ cm}^2$) bei einem Basisverhältnis von $\vartheta = 1/5$ eine Längsüberdeckung von $p = 85 \%$. Diese Konstellation ist in Abbildung 5/5 dargestellt.

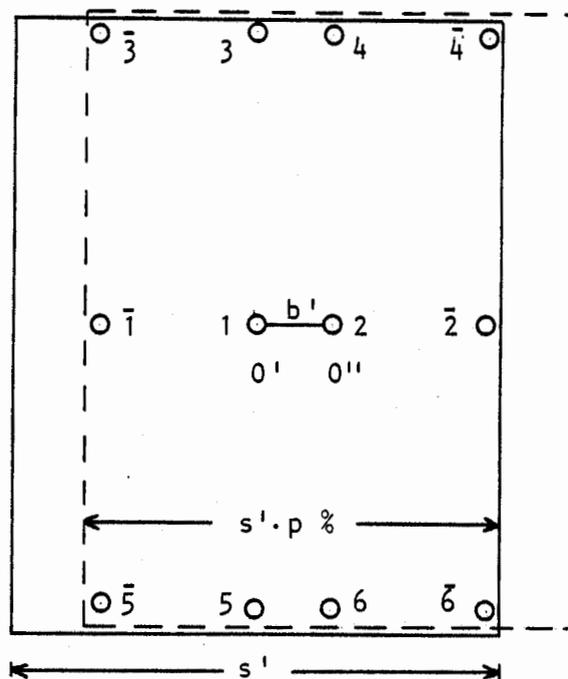


Abb. 5/5 Modellbereich einer Zeiss TMK 6 - Aufnahme
bei einem Basisverhältnis von $\nu = 1/5$

Wie aus Abb. 5/5 ersichtlich ist, liegen die Projektionszentren O' und O'' der beiden Bilder nahezu in Modellmitte. Bei einer Drehung κ' oder Neigung ϕ' des linken Bildes um das Projektionszentrum O' werden die eingetragenen Punkte $\bar{1}$, $\bar{3}$ und $\bar{5}$ am Bildrand des rechten Bildes in y -Richtung mitverändert, was beim optisch-mechanischen Standard-Orientierungsverfahren nach O. v. Gruber (SCHWIDEFSKY-ACKERMANN /118, S. 160/) nicht der Fall ist. Dieser Umstand macht einen in Abhängigkeit vom Grad der Überdeckung modifizierten Orientierungsablauf notwendig. Die Anzahl der Iterationen wird dabei mit Sicherheit höher sein als beim Gruber'schen Standardverfahren.

Form und Ausdehnung terrestrischer Objekte haben einen entscheidenden Einfluß auf den Ablauf der relativen Orientierung. An schmalen und hohen bzw. breiten und niedrigen Objekten stehen selten genügend Punkte zur Verfügung, die zur Elimination der Vertikalparallaxen geeignet wären. Bei derartigen, unvollständigen Modellen ist die optisch-mechanische Bestimmung der Orientierungsparameter nur mit verminderter Genauigkeit möglich. Das ist aber auf der anderen Seite hinreichend, wenn ausschließlich dieser (für die Orientierung verwendete Objektausschnitt) zur Auswertung kommen soll.

Bei starker Tiefengliederung des Objekts muß der Grad der ω -Überkorrektur gesondert ermittelt werden. Der Überstellungskoeffizient läßt sich nach KASPER /66/ graphisch bestimmen.

Bei annähernd regelmäßig gekrümmten Objektflächen, wie sie in der Architekturphotogrammetrie häufig vorkommen, ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens "gefährlicher Flächen" größer als bei der Luftaufnahme. Als "gefährliche Flächen" gelten nach HOFMANN /58/ orthogonale Regelflächen 2. Grades, wobei der "gefährliche Zylinder" als senkrechter Kreiszyylinder am bekanntesten ist.

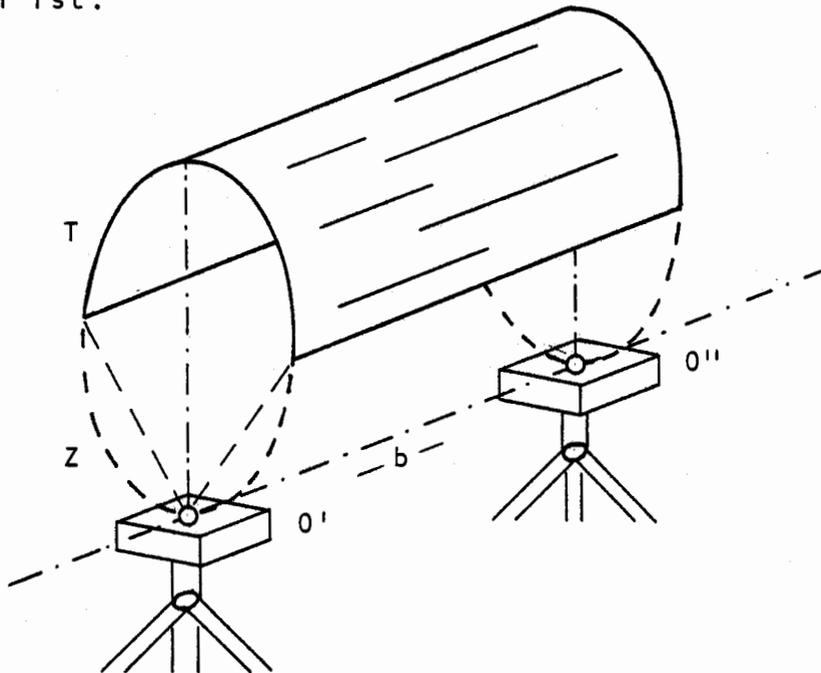


Abb. 5/6 Beispiel eines gefährlichen Zylinders (Z) bei der Zenit-Aufnahme eines Tonnengewölbes (T)

O' , O'' Projektionszentren
 b Aufnahmebasis

In Abb. 5/6 ist die Aufnahme eines Tonnengewölbes mit horizontaler Basis und nach oben gerichteten Kammern dargestellt. Die Normalebene durch die Projektionszentren O' und O'' senkrecht zur Basis schneidet aus dem Gewölbe Kreise aus, auf denen die Projektionszentren selbst liegen. Dadurch wird die relative Orientierung unbestimmt.

Als gefährliche Fläche kann auch die gekrümmte Wand eines Innenraumes bezeichnet werden, wenn die Aufnahmebasis vertikal steht. Ist die Mehrdeutigkeit der relativen Orientierung zu befürchten, so können bereits bei der Aufnahme die Entfernung oder Richtung zum Objekt entsprechend verändert werden. Sind am Objekt genügend Paßpunkte vorhanden, so ist der gefährliche Ort durch die absolute Orientierung des Modells und die damit verbundene Kontrolle der Modelldeformationen weitgehend abgesichert (SCHWIDEFSKY - ACKERMANN /118, S.165/). Die durch starke Längsüberdeckung, unvollständige Modelle oder gefährliche Flächen verursachten Probleme treten natürlich nur dann auf, wenn eine relative Orientierung tatsächlich durchzuführen ist. Steht zur photogrammetrischen Aufnahme eine Stereomeßkammer zur Verfügung, so kann bei entsprechendem Justierzustand der Kammer und des Auswertegerätes auf eine relative Orientierung verzichtet werden. Der "stereophotogrammetrische Normalfall" läßt sich durch Nullung der Ablesuhren am Gerät mit ausreichender Genauigkeit wiederherstellen.

In allen anderen Fällen ist eine numerische Bestimmung der Orientierungsparameter (aus gemessenen Vertikalparallaxen) mit Hilfe eines Tischrechners der optisch-mechanischen Orientierung am Gerät vorzuziehen.

5.3.3 Absolute Orientierung

Das durch die relative Orientierung gebildete Modell wird bei der absoluten Orientierung in eine räumliche Beziehung zum Objekt gebracht. Zur Lösung dieser räumlichen Ähnlichkeitstransformation, die schrittweise am Stereoauswertegerät oder auch rein rechnerisch vollzogen werden kann, sind (zur Befriedigung von 7 unabhängigen Parametern) mindestens 2 Lagepaßpunkte für die Maßstabsangleichung sowie 3 Höhenpaßpunkte für die Höhenangleichung erforderlich. Unter "Höhen" sind hier die Objektstrecken parallel zur Aufnahme­richtung zu verstehen.

Die Maßstabsanpassung geschieht in der Regel durch Vergleich räumlicher Modell- und Objektstrecken. Die (in der terrestrischen Photogrammetrie meist bekannte) Länge der Aufnahmebasis sollte nur in Ausnahmefällen, d.h. wenn keine Paßstrecken zur Verfügung stehen, für die Basiseinstellung im Gerät verwendet werden.

Die "Höheneinpassung" des Modells erfolgt über (mindestens 3, möglichst 4) gut identifizierbare Paßpunkte am Modellrand. Bisweilen eignen sich am Objekt befestigte Lotschnüre zum teilweisen Einrichten des Modells.

Unter Umständen können von der Aufnahme her bekannte Elemente der äußeren Orientierung (z.B. Querneigung ω durch Libellen) für die Modelleinpassung herangezogen werden, falls nicht genügend Paßpunkte vorhanden sind. In jedem Fall ist aber der Weg über geodätisch bestimmte Paßpunkte und Paßstrecken vorzuziehen, weil dadurch Gerätefehler, Justierfehler oder Modelldeformationen (evtl. als Folgefehler der relativen Orientierung) aufgedeckt werden können.

6. Modellabtastung in Profilen, Orthoprojektion

6.1. Streifenbreite und Profilabstand

Der wichtigste Parameter bei der streifenweisen differentiellen Entzerrung ist die Streifenbreite. Sie bestimmt die Herstellungszeit des Orthophotos und damit die Wirtschaftlichkeit der photographischen Verarbeitungstechnik. Auf der anderen Seite beeinflusst sie über den Verfahrensfehler (Abschnitt 3.3.2) die Genauigkeit und die graphische Homogenität der Photokarte. Der Festlegung einer für bestimmte Umbildungen zweckmäßigen Streifenbreite muß daher eine detaillierte Untersuchung des orthophotographischen Verfahrensfehlers vorausgehen.

Als Verfahrensfehler wird hier gemäß Definition aus Abschnitt 3.3.2 und in Übereinstimmung mit HOBBIÉ /55/ und NEUBAUER /104/ derjenige Lagefehler bezeichnet, der bei ungenügender Annäherung der Projektionsfläche an die (quer zur Streifenrichtung) geneigte Modell- bzw. Geländeoberfläche im Orthophoto entsteht. Höhenabtastfehler (Abschnitt 3.3.3) und Bewegungsunschärfen (Abschnitt 3.3.7) sind in gewisser Weise ebenfalls verfahrensabhängig, jedoch erscheint die Benennung "Verfahrensfehler" wegen der leichteren Beeinflussbarkeit dieser beiden Fehlergrößen im orthophotographischen Prozeß hierfür nicht angebracht. Im folgenden wird daher an der obigen Definition festgehalten.

6.1.1 Verfahrensfehler, Unstetigkeiten im Orthophoto

6.1.1.1 Eigenschaften des Verfahrensfehlers

Der bei der differentiellen Entzerrung nach dem Streifenverfahren auftretende radiale Verfahrensfehler e_r im Orthophoto ist nach Abb. 3/9 bzw. Gleichung (3,1c) abhängig

- a) von der örtlichen Neigung β_x der Objektfläche
quer zur Streifenrichtung
- b) von der örtlichen Neigung β_y der Objektfläche
in Streifenrichtung
- c) vom Tangens (r/z) bzw. (x/z), (y/z) des projizierenden Winkels, d.h. von der Lage des Profilbezugspunktes $P_0(x, y, z)$ gegenüber dem Projektionszentrum $O(x = 0, y = 0, z = 0)$
- d) vom mathematischen Entzerrungsprinzip, d.h. vom Grad bzw. der Neigung (β_{x0}) der Approximationsfläche im Streifen
- e) vom Abstand dx der Orthophotopunkte von der jeweiligen Streifenmitte (Profil), wobei dx maximal die halbe Streifenbreite, also $\Delta x/2$, erreichen kann.
- f) Der auf das Objekt bezogene Verfahrensfehler ist außerdem vom Orthophotomaßstab abhängig.

Das Verhalten des Verfahrensfehlers im Orthophoto ist größtenteils systematisch. Das gilt erstens für die Abhängigkeit vom projizierenden Winkel. Für Orthophotopunkte, die in den einzelnen Profilstreifen jeweils am Streifenrand liegen, wächst der Verfahrensfehler systematisch (in 1. Näherung proportional)

mit dem Tangens des projizierenden Winkels. Zweitens besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Verfahrensfehler und dem Punkt-
abstand dx von der jeweiligen Profillinie (Streifenmitte). Dieser Abstand bewegt sich pro Streifen zwischen $-\Delta x/2$ und $+\Delta x/2$ (Streifenränder). Der Verfahrensfehler hat daher an den Streifenrändern betragsmäßig sein Maximum. In Streifenmitte ($dx = 0$) ist der Verfahrensfehler $e_x = e_y = e_r = 0$, weil hier theoretisch die Objektfläche mit der Approximationsfläche (abgesehen vom Höhenabstastfehler) übereinstimmt.

Die Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von den Objektneigungen (β_x, β_y) richtet sich nach der Oberflächenform des aufgenommenen Objekts. Während die Neigungen einer Geländeoberfläche entsprechend der geomorphologischen Geländestruktur (zumindest im großflächigen Bereich) in der Regel ständig wechseln, liegt bei architektonischen Objekten häufig ein gleichmäßiger Oberflächenverlauf vor. Das bedeutet, daß der Verfahrensfehler bei der Entzerrung von Architektur-Aufnahmen meist auch bezüglich der Objektneigung systematischen Charakter aufweist.

6.1.1.2 Einfluß des Verfahrensfehlers auf die Genauigkeit des Orthophotos

Der Verfahrensfehler tritt als (radialer) Lagefehler auf und beeinflusst dadurch die Genauigkeit des Orthophotos. Dieser Einfluß auf die Genauigkeit soll hier näher untersucht werden.

Der mittlere Fehler über die gesamte Orthophotofläche ergibt sich durch entsprechende Summation der streifenweisen Verfahrensfehler. Daher ist zuerst der mittlere Fehler im einzelnen Streifen von Interesse. Zur Verdeutlichung des linearen Fehlerverlaufs innerhalb eines Profilstreifens dient Abb. 6/1.

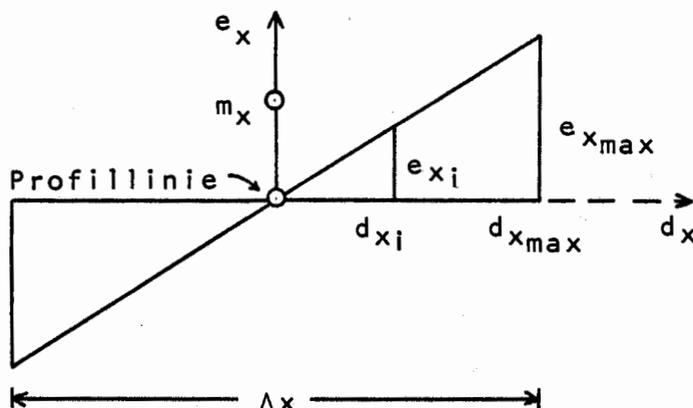


Abb. 6/1 Verlauf des Verfahrensfehlers innerhalb eines Profilstreifens

- e_{xi} Verfahrensfehler an beliebiger Stelle dx_i im Streifen (x-Komponente)
- $e_{x_{max}}$ maximaler Verfahrensfehler am Streifenrand bei $dx_{max} = \frac{\Delta x}{2}$
- m_x mittlerer Verfahrensfehler im Streifen
- Δx Streifenbreite

Der mittlere Verfahrensfehler m_x in einem beliebigen Streifen läßt sich durch Integration der linearen Funktion

$$e_{x_i} = \frac{e_{x_{\max}}}{\Delta x/2} \cdot dx_i \quad (6,1)$$

über die gesamte Streifenbreite bestimmen.

Es gilt:

$$m_x^2 = \frac{1}{\Delta x} \int_{-\Delta x/2}^{+\Delta x/2} \left(dx_i \frac{e_{x_{\max}}}{\Delta x/2} \right)^2 dx \quad (6,2)$$

$$m_x^2 = \frac{4 dx_i^3 \cdot e_{x_{\max}}^2}{3 \cdot \Delta x^3} \Bigg|_{-\Delta x/2}^{+\Delta x/2}$$

$$m_x = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e_{x_{\max}} \quad (6,3)$$

Mit

$$e_r = \frac{r}{x} e_x$$

ergibt sich entsprechend

$$m_r = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e_{r_{\max}} \quad (6,4)$$

Auf ähnliche Weise kann die Bestimmung des mittleren Verfahrensfehlers im ganzen Orthophoto erfolgen. Ist die Objektoberfläche zum Beispiel eine um den Winkel β_x quer zur Streifenrichtung geneigte Ebene, so besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen dem streifenweisen Verfahrensfehler m_{r_i} (an einer beliebigen Stelle im Orthophoto) und dem dazugehörigen Radialabstand r_i (Gleichung 3,1c). Dieser Zusammenhang ist in Abb. 6/2 dargestellt.

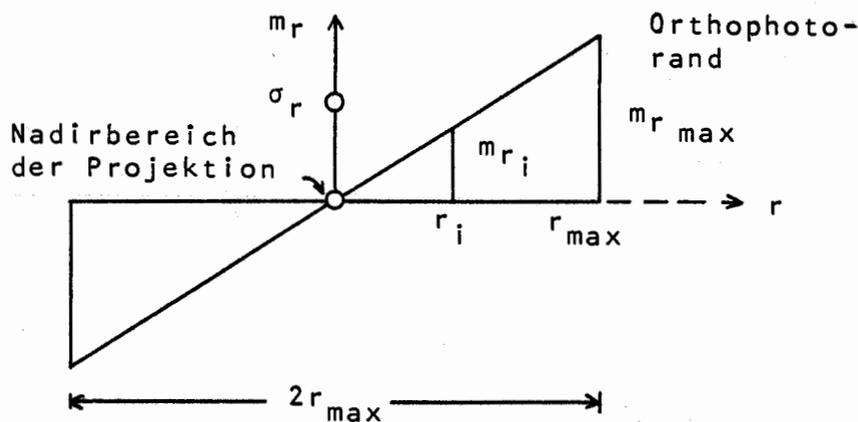


Abb. 6/2 Linearer Verlauf des mittleren streifenweisen Verfahrensfehlers m_{r_i} im Orthophoto (für eine geneigte Ebene)

m_{r_i}	radialer Verfahrensfehler im Streifen i
$m_{r_{max}}$	maximaler Verfahrensfehler am Orthophotorand (r_{max})
σ_r	mittlerer Verfahrensfehler im ganzen Orthophoto
$2r_{max}$	Diagonale im (rechteckigen) Orthophoto

Der mittlere radiale Verfahrensfehler σ_r im Orthophoto ergibt sich durch Integration des streifenweisen Verfahrensfehlers.

$$m_{r_i} = r_i \cdot \frac{m_{r_{max}}}{r_{max}} \quad (6,5)$$

Es gilt

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2r_{max}} \int_{-r_{max}}^{+r_{max}} \left(r_i \cdot \frac{m_{r_{max}}}{r_{max}} \right)^2 dr \quad (6,6)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{r_i^3 \cdot m_{r_{\max}}^2}{6 \cdot r_{\max}^3} \left| \begin{array}{l} +r_{\max} \\ -r_{\max} \end{array} \right.$$

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot m_{r_{\max}} \quad (6,7)$$

Wird der mittlere Verfahrensfehler $m_{r_{\max}}$ des äußersten Profilstreifens aus Gleichung (6,4) in Gleichung (6,7) eingesetzt, so ergibt sich der mittlere Fehler im gesamten Orthophoto zu

$$\sigma_r = \frac{1}{3} \cdot e_{r_{\max}} \quad (6,8)$$

wobei $e_{r_{\max}}$

der absolute Maximalfehler (am Streifenrand) des von der Bildmitte ($\hat{=}$ Hauptpunkt der Aufnahme) am weitesten entfernten Orthophotopunktes ist.

Diese Ableitung gilt jedoch nur, wenn die Objektfläche eine geneigte Ebene darstellt. NEUBAUER /104/ verwendet für Geländeoberflächen ähnliche Beziehungen. An die Stelle der konstanten Neigung tritt aber in diesem Fall eine mittlere Geländeneigung, die für die jeweilige Landschaftsform repräsentativ ist. Für systematisch gekrümmte Oberflächen architektonischer Objekte gilt die Formel (6,8) jedoch nicht. Bei einfachen Flächen 2. Grades (Zylinder, Kugel, Kegel) müßte die lineare Beziehung (6,5) durch eine entsprechende Gleichung 2. Grades ersetzt werden.

Der Einfluß des Verfahrensfehlers auf die Genauigkeit des Orthophotos soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden.

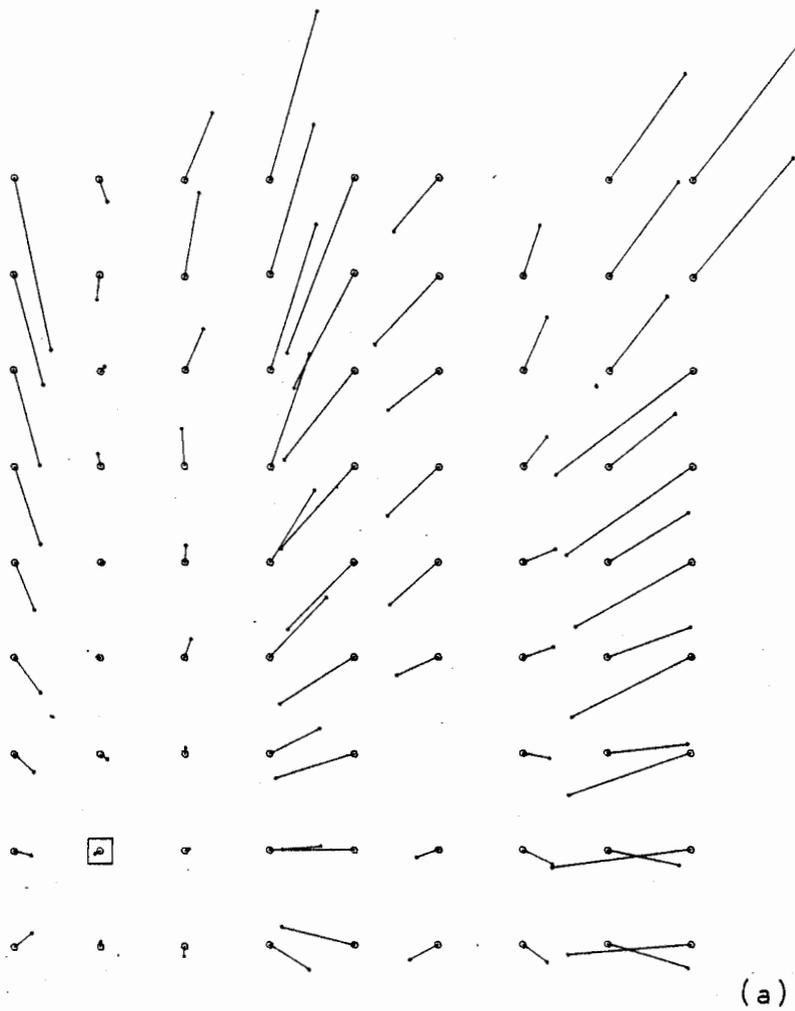
Die Angaben stammen aus einer Genauigkeitsuntersuchung (HELMLE /50/), die mit Hilfe eines Testfeldes durchgeführt wurde (siehe auch Abschnitte 9.1.1 und 9.1.5). Das Testfeld der Größe $5 \times 5 \text{ m}^2$ bestand aus einem quadratischen Raster mit 81 Kontrollpunkten, die an einer vertikalen Ebene angebracht waren. Ein Stereopaar wurde im Winkel von 30° zur Ebene (Aufnahmebasis verschwenkt) aufgenommen. Von einem der Bilder wurde ein Orthophoto hergestellt, wobei die Streifenrichtung parallel zu den Schichtlinien der Fläche gelegt wurde. Damit ergab sich quer zur Streifenrichtung eine Objektneigung von 30° . Die Streifenbreite der differentiellen Entzerrung betrug $\Delta x = 4 \text{ mm}$. Das erhaltene

Orthophoto wurde am Komparator Zeiss PSK 2 punktweise ausgemessen. Der Vergleich (Helmert-Transformation) der Orthophotopunkte mit den Kontrollpunkten ergab die in Abb. 6/3 (a) dargestellten Fehlerbeträge (mittlerer Koordinatenfehler: 0,17 mm, Maximalfehler: 0,46 mm im Orthophoto). Die Fehlervektoren zeigen ein stark systematisches Verhalten. Sie verlaufen fast ausnahmslos in Richtung auf den (in der Abbildung gekennzeichneten) Objekthauptpunkt. Die Vorzeichen wechseln jedoch gebietsweise.

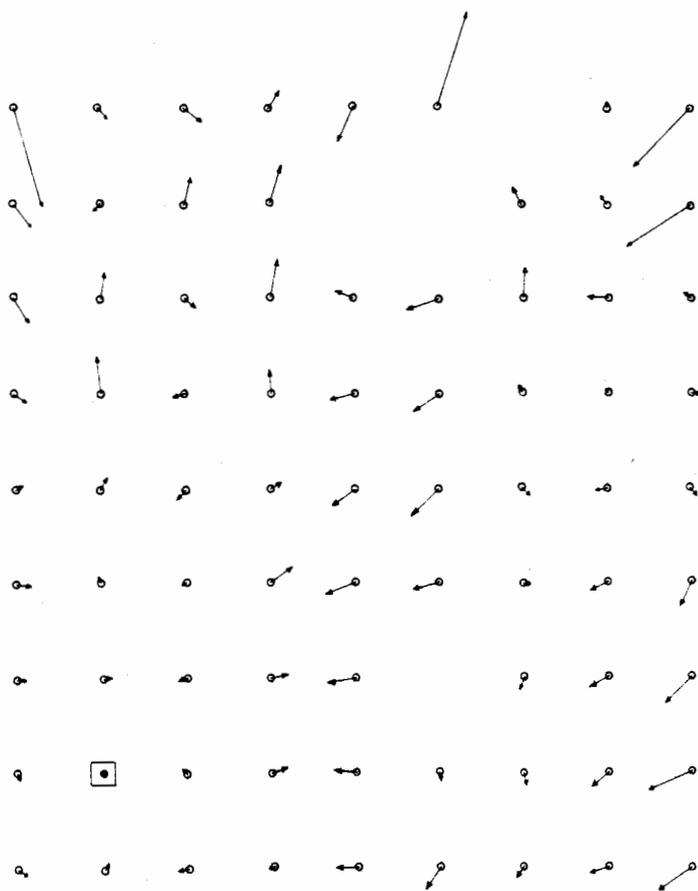
Da die Profilabtastung für die Orthophotoherstellung entlang der Schichtlinien erfolgte, konnte der Höhenabtastfehler klein gehalten werden. Die radialen Lagefehler im Orthophoto müssen also auf Verfahrensfehler zurückzuführen sein. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden die Verfahrensfehler für die einzelnen Kontrollpunkte nach Gleichung (3,2c) berechnet. Die dafür notwendigen Abstände dx der Punkte von der jeweiligen Profillinie sowie die Radialabstände r wurden mit einem Glasmaßstab aus dem Orthophoto entnommen. Durch vektorielle Subtraktion dieser einzeln berechneten Verfahrensfehler von den Fehlern aus der Helmert-Transformation ergaben sich die in Abb. 6/3 (b) dargestellten Restfehler. Die Systematik konnte also weitgehend eliminiert werden. Die noch verbliebenen Punktfehler lassen auf geringe Abtastfehler schließen.

Der mittlere Koordinatenrestfehler ging durch Abzug des Verfahrensfehleranteiles (etwa 0,16 mm) von 0,17 mm auf 0,06 mm zurück. Die Elimination der Verfahrensfehler aus dem Orthophoto kann natürlich nur rechnerisch vollzogen werden.

Bei der differentiellen Entzerrung nicht ebener Objektflächen werden sich entsprechend veränderte Werte für den Verfahrensfehler einstellen (siehe Abschnitt 6.1.2). Für die Abschätzung der generellen Größenordnung erscheint jedoch ein mittlerer Verfahrensfehler von etwa 0,1 bis 0,3 mm im Orthophoto als realistisch.



(a)



(b)

Abb. 6/3

Vektordiagramme zum
Verfahrensfehler,
Testfeldauswertung;
Objektfläche:
Ebene, $\beta_x = 30^\circ$

Streifenbreite: $\Delta x = 4 \text{ mm}$
im Orthophoto (1:50) bzw.
20 cm am Objekt

- (a) Lagefehler im
Orthophoto
- (b) Restfehler nach Abzug
des Verfahrensfehler-
anteils

Objektmaßstab
1 m

Vektormaßstab
im Orthophoto 0,4 mm

□ Hauptpunkt am Objekt

↑↓ Streifenrichtung

6.1.1.3 Unstetigkeiten im Orthophoto als Folge des Verfahrensfehlers

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, beeinflusst der Verfahrensfehler die Lagegenauigkeit im Orthophoto. Bei graphischen Darstellungen, insbesondere bei Halbtonbildern, ist jedoch die mittlere Genauigkeit (wenn sie innerhalb bestimmter vorgegebener Toleranzen (z.B. 0,2 - 0,3 mm) liegt) von untergeordneter Bedeutung, weil die Lagefehler nicht unmittelbar in Erscheinung treten. Das gilt bei Orthophotoauswertungen für die radialen Punktversetzungen innerhalb der Profilstreifen.

An den Streifenrändern zeigen sich dagegen optisch störende Unstetigkeiten durch das Aufeinandertreffen betraglich ungefähr gleicher, im Vorzeichen jedoch entgegengesetzter Lagefehler. Die Folge davon sind Abbildungsverlust oder Doppelabbildungen (Abb. 6/4) sowie Klaffungen (Konturensprünge) in den Streifenrandbereichen (Abb. 6/9).

Diese Unstetigkeiten sind am größten bei differentieller Entzerrung 0. Ordnung (Abbildung 3/2a), wenn die quer zur Streifenrichtung geneigte Objektfläche durch eine horizontale Projektionsfläche ersetzt wird.

Doppelabbildungen entstehen, wenn das Objekt vom Aufnahmenadir weg geneigt ist, Detailverlust tritt bei der Abbildung von Oberflächen auf, die zur Bildmitte hin abfallen. Wie aus Abb. 6/4 ersichtlich ist, wird im Fall (a) das zwischen den Punkten P und Q liegende Objektstück in beiden Profilstreifen (1 und 2) abgebildet, während im Fall (b) der Flächenteil zwischen R und S weder im Streifen 1 noch im Streifen 2, d.h. im Orthophoto überhaupt nicht erscheint. Die doppelt wiedergegebene Fläche P - Q ist bei gleicher Objektneigung (β_x) und entgegengesetzt gleichem Bildwinkel ($-\nu_x$) breiter als die fehlende Fläche R - S, was in den bei der Doppelabbildung größeren Verfahrensfehlern begründet ist. Betrachtet man die durch β_y (Objektneigung in y-Richtung) = 0 vereinfachte Gleichung (3,2a) für differentielle Entzerrung 0. Ordnung

$$e_x = - dx \frac{\frac{x}{z} \tan \beta_x}{1 - \frac{x}{z} \tan \beta_x}, \quad (6,9)$$

so wird im Fall der Doppelabbildung mit $x < 0$, $z < 0$ und $\tan \beta_x > 0$ der Nenner kleiner, d.h. der Lagefehler e_x größer als bei Abbildungsverlust mit $x > 0$, $z < 0$ und $\tan \beta_x > 0$. Haben Objektfläche und projizierender Strahl gleiche Neigung ($x/z \cdot \tan \beta_x = 1$), was z.B. an den Umrißlinien von runden Türmen vorkommt, so wird der Nenner in Formel (6,9) gleich Null, d.h. der Verfahrensfehler e_x geht gegen ∞ .

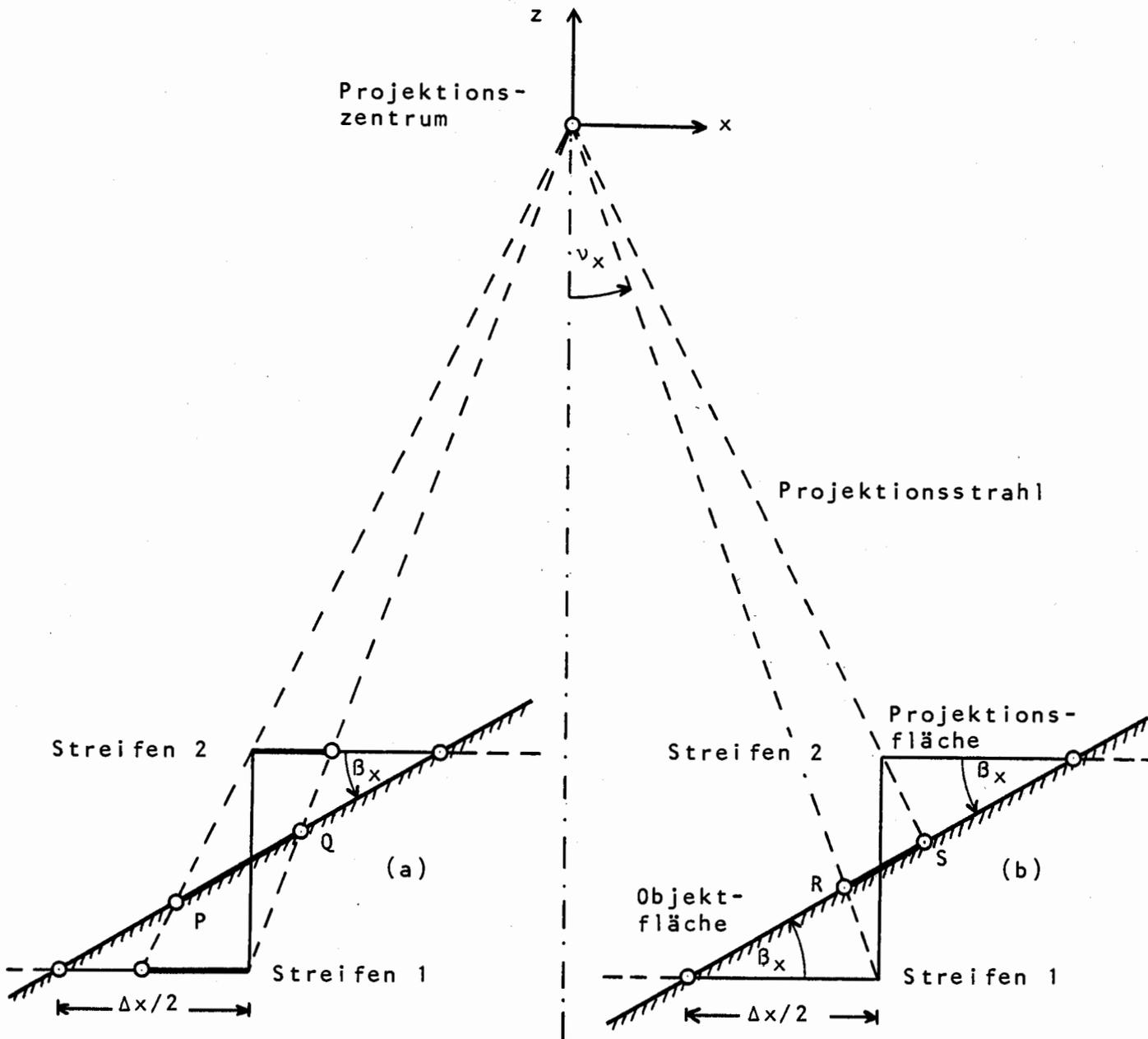


Abb. 6/4 Doppelabbildung (a) und Abbildungsverlust (b) an den Streifenrändern als Folge des Verfahrensfehlers (Erläuterung im Text)

Im Orthophoto bedeutet das Mehrfachabbildung desselben Objektschnittes, die sogar über mehrere Profilstreifen anhalten kann. Das gleiche gilt, wenn der Ausdruck $x/z \cdot \tan \beta_x > 1$, d.h. der Nenner negativ wird. Dieser Fall tritt ein, wenn Objektteile bei der Aufnahme hinter der Umrißlinie, also im "sicht-toten Raum" liegen. An Stelle dieser Details werden im Orthophoto die Punkte der Umrißzone abgebildet (siehe auch HOBBIÉ /55/).

Doppelabbildungen an den Streifenrändern treten bei der Orthophoto-Herstellung in der Architektur immer dann auf, wenn "konvexe" Objekte (z.B. runde Türme, Dächer usw.) umgebildet werden. Zwei Beispiele für Doppelabbildung an stark geneigten Oberflächen werden in den Abbildungen 6/5 und 6/6 gegeben.

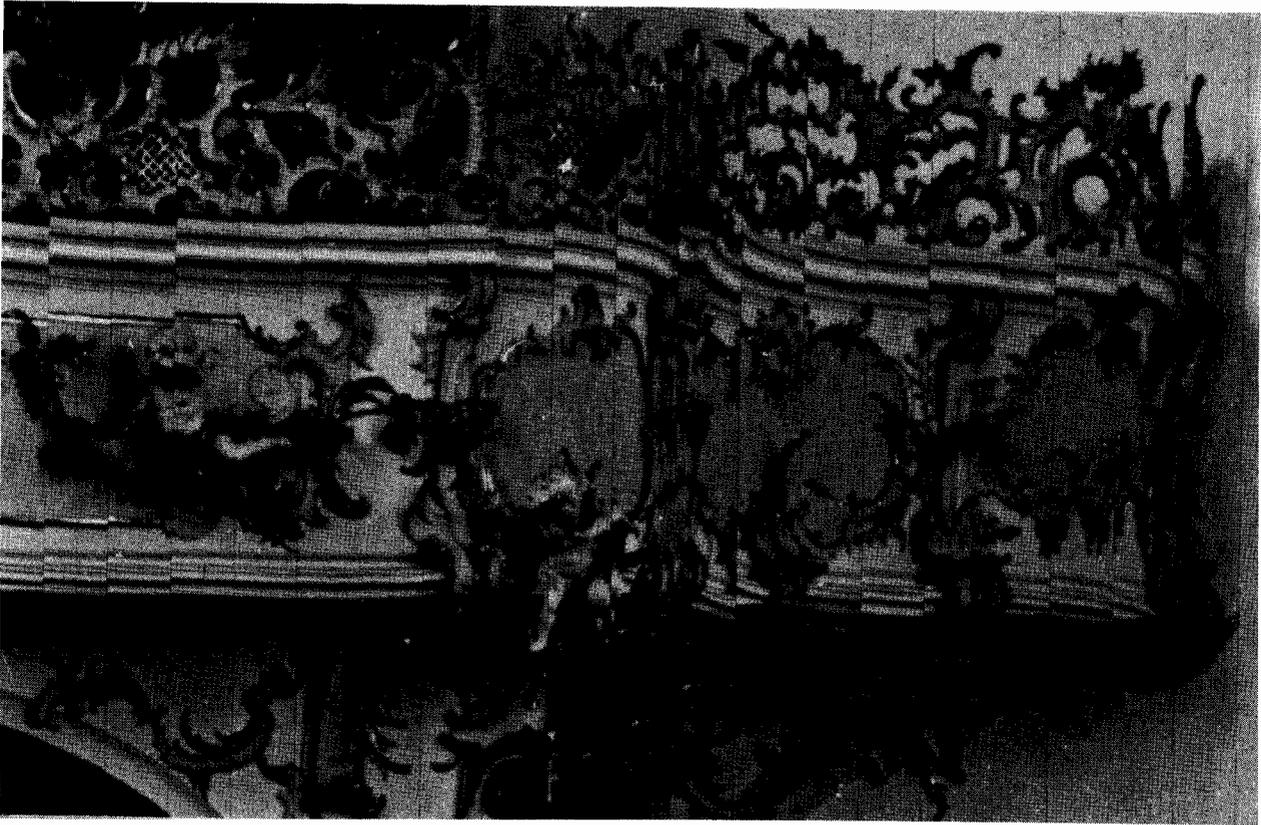


Abb. 6/5 Beispiel für Doppelabbildungen im Orthophoto am rechten Rand einer Orgelepore; Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm im Orthophotomaßstab 1:120, Ausschnittvergrößerung; Objekt: Ettal, Klosterkirche



Abb. 6/6 Beispiel für Doppelabbildungen im Orthophoto an einer vom Aufnahmenadir weg geneigten Holzoberfläche; Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm im Orthophotomaßstab 1:11, Ausschnittvergrößerung; Objekt: Versunkener Schiffsrumpf, Außenansicht

Abbildungsverlust an den Streifenrändern entsteht bei der differentiellen Entzerrung von "konkaven" Oberflächen, welche in der Architektur vor allem an Gewölben und Kuppeln sowie bei Innenräumen häufig vorkommen. Als Beispiel für die Nichtabbildung von Objektdetails (hier an den weißen Punkten) dient das Orthophoto in Abb. 6/7.

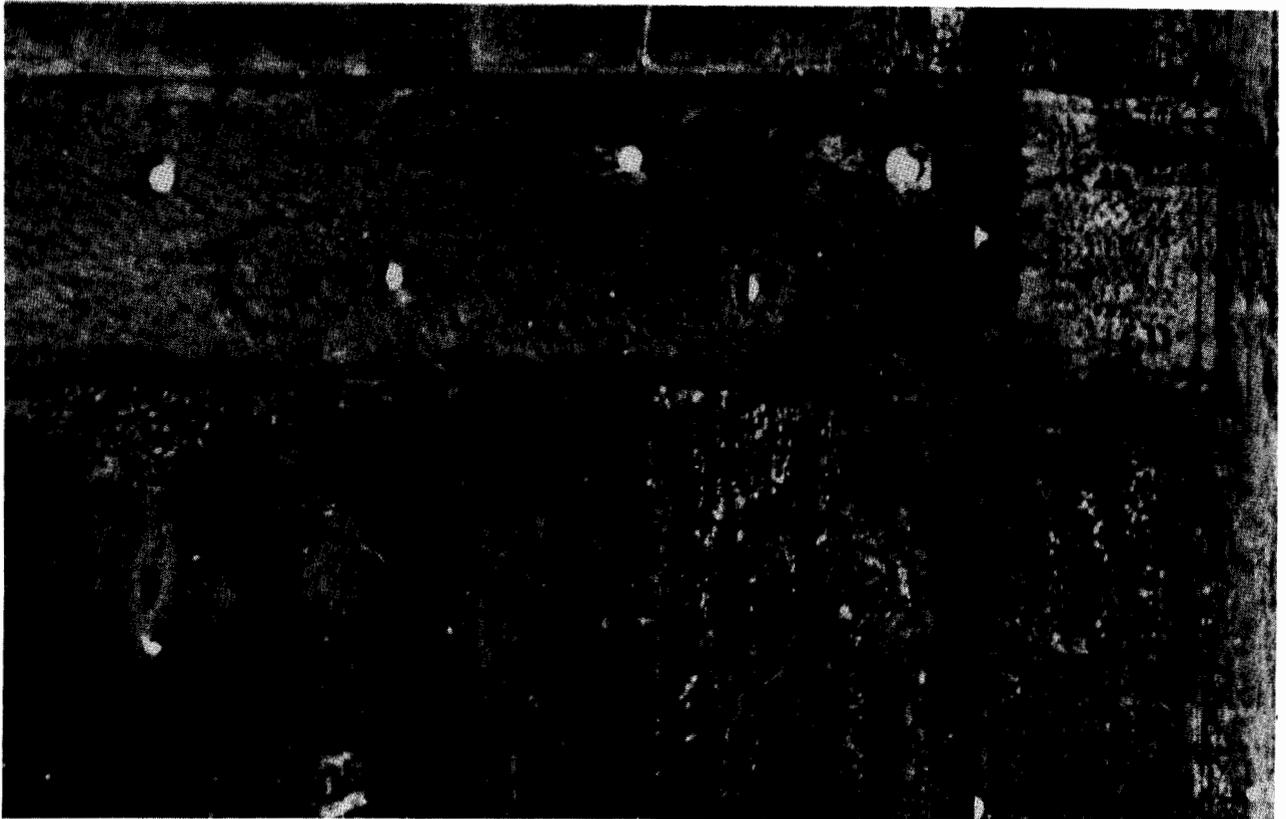


Abb. 6/7 Beispiel für Abbildungsverlust im Orthophoto an einer zum Aufnahmenadir hin geneigten Holzoberfläche; Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm im Orthophotomaßstab 1:11, Ausschnittvergrößerung; Objekt: Versunkener Schiffsrumpf, Innenansicht

Ein Teil einer stark geneigten (und gekrümmten) Innenwandfläche ist in Abb. 6/8(a) als zentralperspektive Aufnahme wiedergegeben. Abb. 6/8(b) zeigt den entsprechenden Orthophotoausschnitt. Da die Fläche zum Aufnahmenadir hin geneigt ist, tritt an den Streifenrändern Abbildungsverlust auf. Die in Teil (a) angegebenen Linien (mit nach rechts hin zunehmender Breite) repräsentieren die bei der Orthoprojektion jeweils verlorengegangenen Objektabschnitte.

Doppelabbildungen und Abbildungsverluste stören zwar die homogene Bildaussage im Orthophoto, jedoch können die Fehler durch gezielte Retuschen weitgehend ausgeglichen werden.

Die größte Beeinträchtigung erfährt das Halbtonbild vielmehr durch die in Profilrichtung wirkenden Unstetigkeiten an den Streifenrändern. Als Folge des Verfahrensfehlers treten hier bei quer zur Streifenrichtung geneigter Objektfläche Klaffungen und Konturensprünge auf.

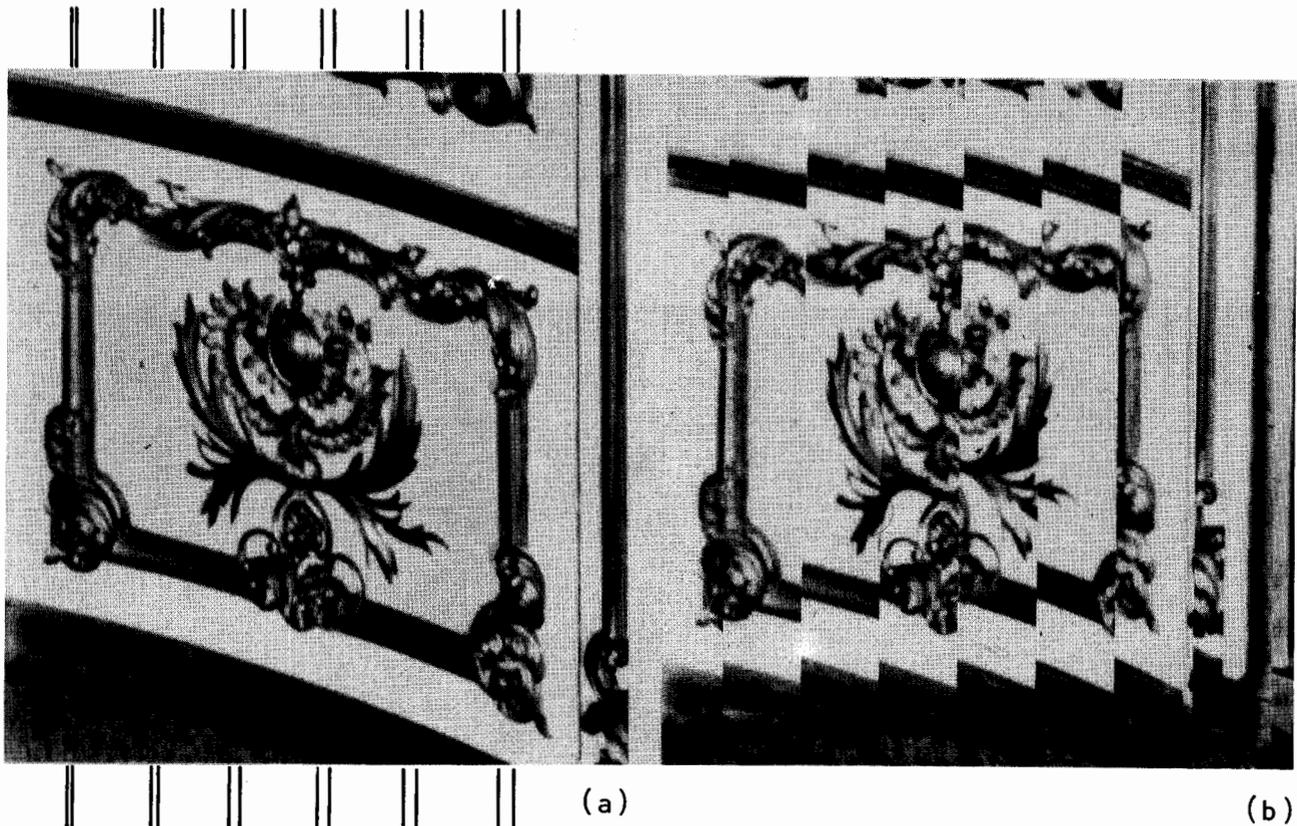


Abb. 6/8 Beispiel für Abbildungsverlust und Konturensprünge im Orthophoto an einer Innenwandfläche;
Objekt: Schloß Linderhof, Speisezimmer

- (a) Ausschnitt aus der Originalaufnahme mit Andeutung der im Orthophoto (b) nicht abgebildeten Objektzonen
- (b) Orthophoto, Streifenbreite $\Delta x = 4$ mm im Orthophotomaßstab 1:27, Ausschnittvergrößerung

Das Entstehen dieser Unstetigkeiten kann an Hand von 6/8 anschaulich erläutert werden. Innerhalb der einzelnen Profilstreifen gelten trotz differentieller Entzerrung des gesamten Bildes weiterhin die Regeln der Zentralprojektion. Das bedeutet, daß die zentralperspektive Laufrichtung (Krümmung) der in Teil (a) abgebildeten Leiste auch im Orthophoto, d.h. in jedem Streifen erhalten bleibt. Nur die Streifenmitte wird der Orthogonalprojektion unterzogen und damit lagerichtig wiedergegeben. Da die rechten Streifenhälften im vorliegenden Beispiel jeweils mit einer negativen Verfahrensfehlerkomponente ($-e_y$), die linken Hälften aber mit einem positiven Fehler ($+e_y$) behaftet sind, entsteht an den Streifenrändern der in Abb. 6/8 (b) sichtbare "Sägezahneffekt". Die Größe der Klaffungen ist dabei gleich der Summe der Verfahrensfehler-Komponenten $|e_{y_i}|$ des Streifens i und $|e_{y_{i+1}}|$ des Streifens $(i+1)$.

Die Beträge weichen infolge des unterschiedlichen x -Wertes des jeweiligen Profilbezugspunktes P_0 (aus Abb. 3/9) geringfügig voneinander ab. In 1. Näherung kann jedoch für die Klaffung

$$K \approx 2 \cdot e_{y_i} \quad (6,10)$$

gesetzt werden, wobei die Komponente e_{y_i} für jeden Streifen nach Gleichung (3,1b) berechnet werden kann.

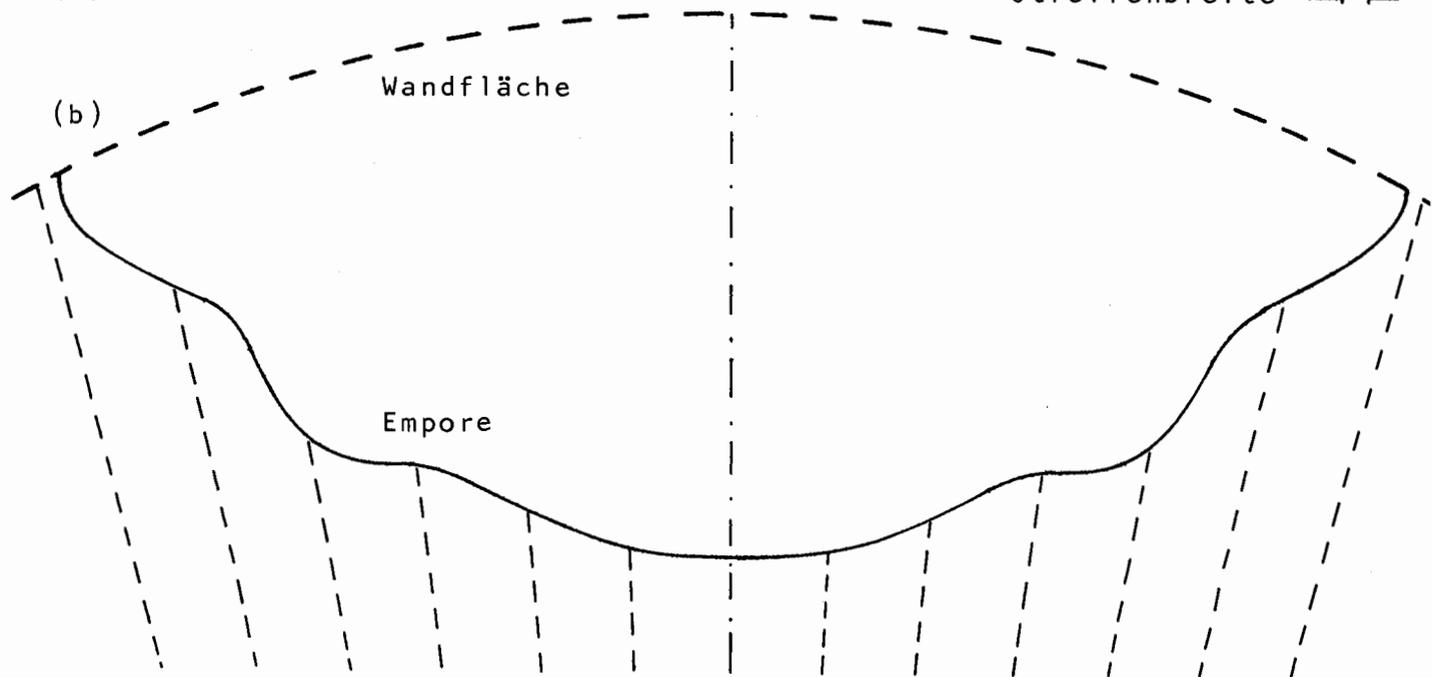
Die gezeigten Konturensprünge treten besonders bei linienhaften Objekten, wie sie in der Architektur häufig sind, stark hervor und stören dadurch den geschlossenen Bildausdruck des Orthophotos. Bei der differentiellen Entzerrung von Luftbildern sind diese Konturensprünge dagegen wesentlich seltener, weil bei großen Geländeneigungen die topographischen Objekte meist hangparallel verlaufen und viel weniger linienhaft ausgeprägt sind.

In Abschnitt 6.1.1.1 wurde die Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von der Objektneigung β_x quer zur Streifenrichtung angesprochen. Klaffungen und Konturensprünge an den Streifenrändern sind (als Folge des Verfahrensfehlers) demnach ebenfalls von der Oberflächenneigung abhängig. An einem praktischen Beispiel (Abb. 6/9) soll dieser Zusammenhang verdeutlicht werden.

Wie Abb. 6/9 zeigt, treten an den flachen ($\beta_x \approx 0$) Objektzonen nur geringe Unstetigkeiten auf. Dagegen ergeben sich an den stark geneigten Seitenflächen der Empore Konturensprünge von bis zu 1,2 mm im Orthophoto (1:120), d.h. bis zu etwa 15 cm am Objekt. Derartig große Klaffungen zerreißen die Detaildarstellung und beeinträchtigen zudem die Homogenität des Halbtonbildes. Da Ergebnisse dieser Art unbrauchbar sind, muß ein Weg zur Reduzierung der Verfahrensfehler gefunden werden. Inwieweit die Herabsetzung der Streifenbreite eine Verbesserung darstellt, soll in den nächsten Abschnitten untersucht werden.



(a) Streifenbreite \longleftrightarrow



(b) Wandfläche

Empore

Abb. 6/9 Beispiel für Konturensprünge im Orthophoto an einer unterschiedlich geneigten Oberfläche

(a) Orthophotoausschnitt, Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm im Orthophotomaßstab 1:120

(b) Grundrißlinie der Empore mit Angabe der Aufnahme- bzw. Projektionsstrahlen

Objekt: Ettal, Klosterkirche, Orgelempore

6.1.1.4 Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von der Streifenbreite Δx

Die bereits in den Abschnitten 3.3.2 und 6.1.1.1 angesprochene Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von der Streifenbreite Δx soll hier an drei praktischen Beispielen (Abbildungen 6/10, 6/11, 6/12) demonstriert werden. Es handelt sich dabei um Orthophotoausschnitte der in den Abbildungen B/3, B/5 und B/10 im Anhang dargestellten Objekte.

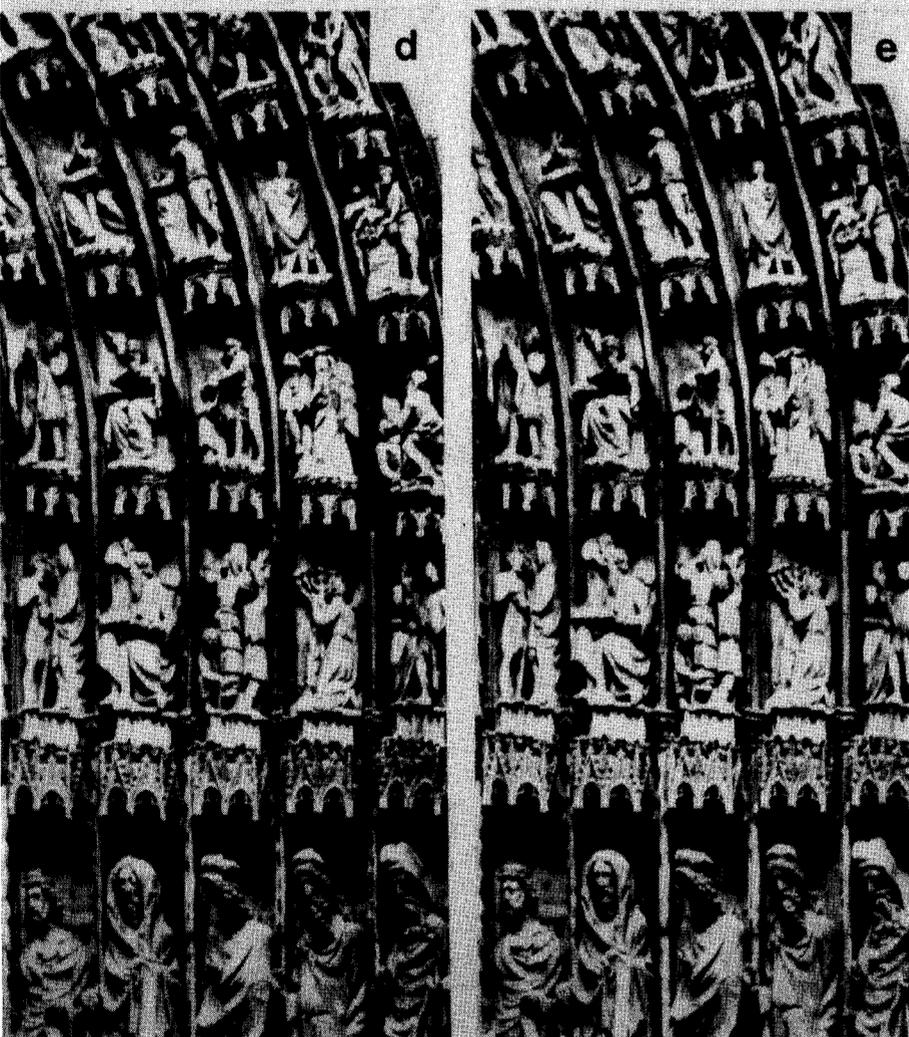


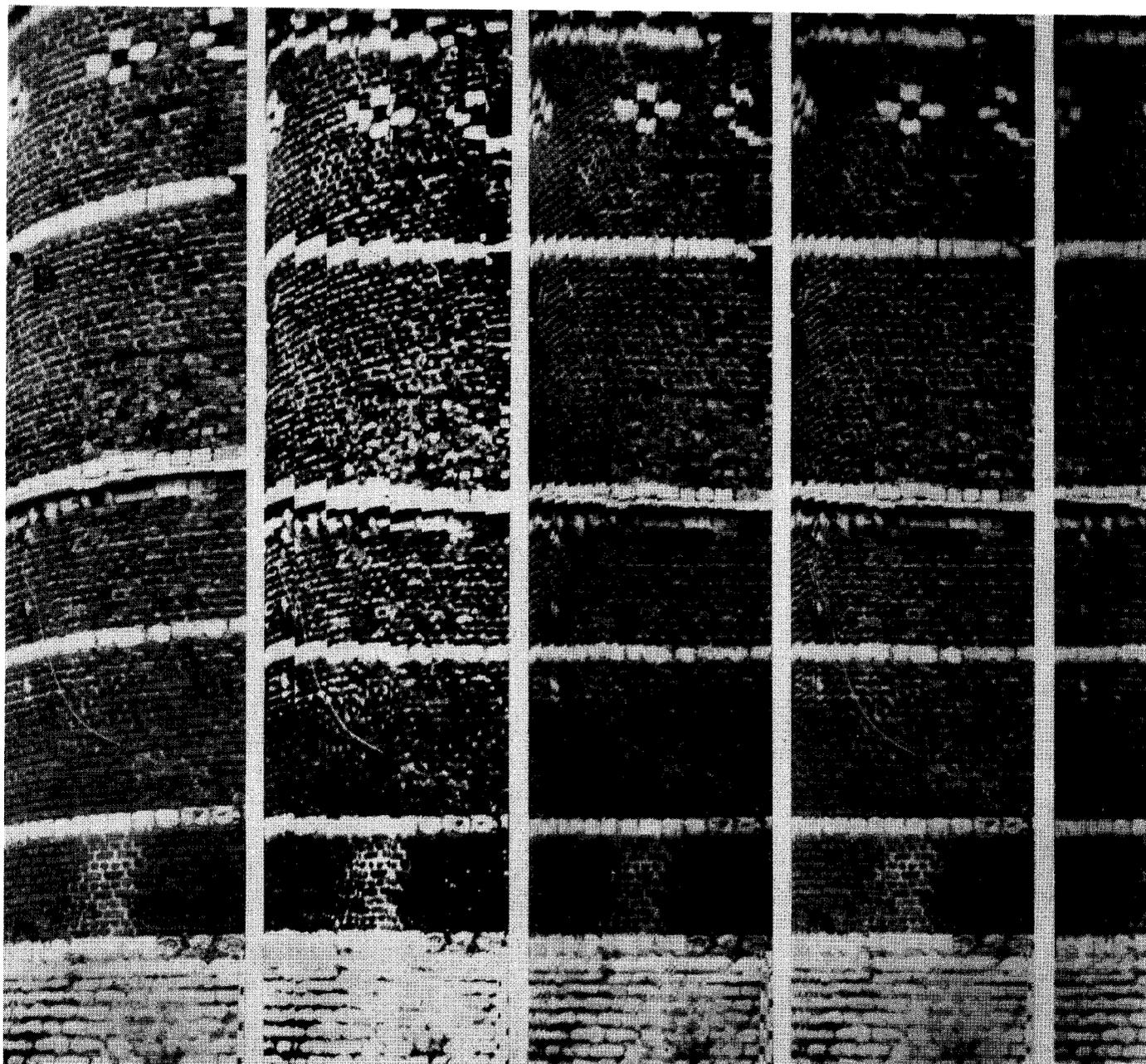
Abb. 6/10
 Unstetigkeiten im
 Orthophoto (1:40)
 in Abhängigkeit von
 der Streifenbreite Δx

e_r maximaler radialer
 Verfahrensfehler am
 Streifenrand, $\beta_x \approx 45^\circ$

↕ Streifenrichtung

Objekt:
 Straßburger Münster,
 Hauptportal

Bild	Δx (mm)	e_r (mm)
(a)	5	0,65
(b)	2	0,26
(c)	2/3	0,09
(d)	4 (Opt.Int.)	0,16
(e)	2 (Opt.Int.)	0,08



(a) (b) (c) (d) (e)

Abb. 6/11 Unstetigkeiten im Orthophoto (1:40) in Abhängigkeit von der Streifenbreite Δx

K Konturensprünge am Streifenrand

↑ Streifenrichtung

Objekt: Mechelen, Taubenturm

Zone A: $x = -2,2 \text{ m}$, $\beta_x \approx 50^\circ$; Zone B: $x = -2,8 \text{ m}$, $\beta_x \approx 75^\circ$

Bild	Δx (mm)	K (mm), Zone A;	K (mm), Zone B
(a)	Original	-	-
(b)	5	1,3	9,0
(c)	2	0,5	3,6
(d)	2(Opt.Int.)	0,2	2,9
(e)	2/3	0,2	1,2

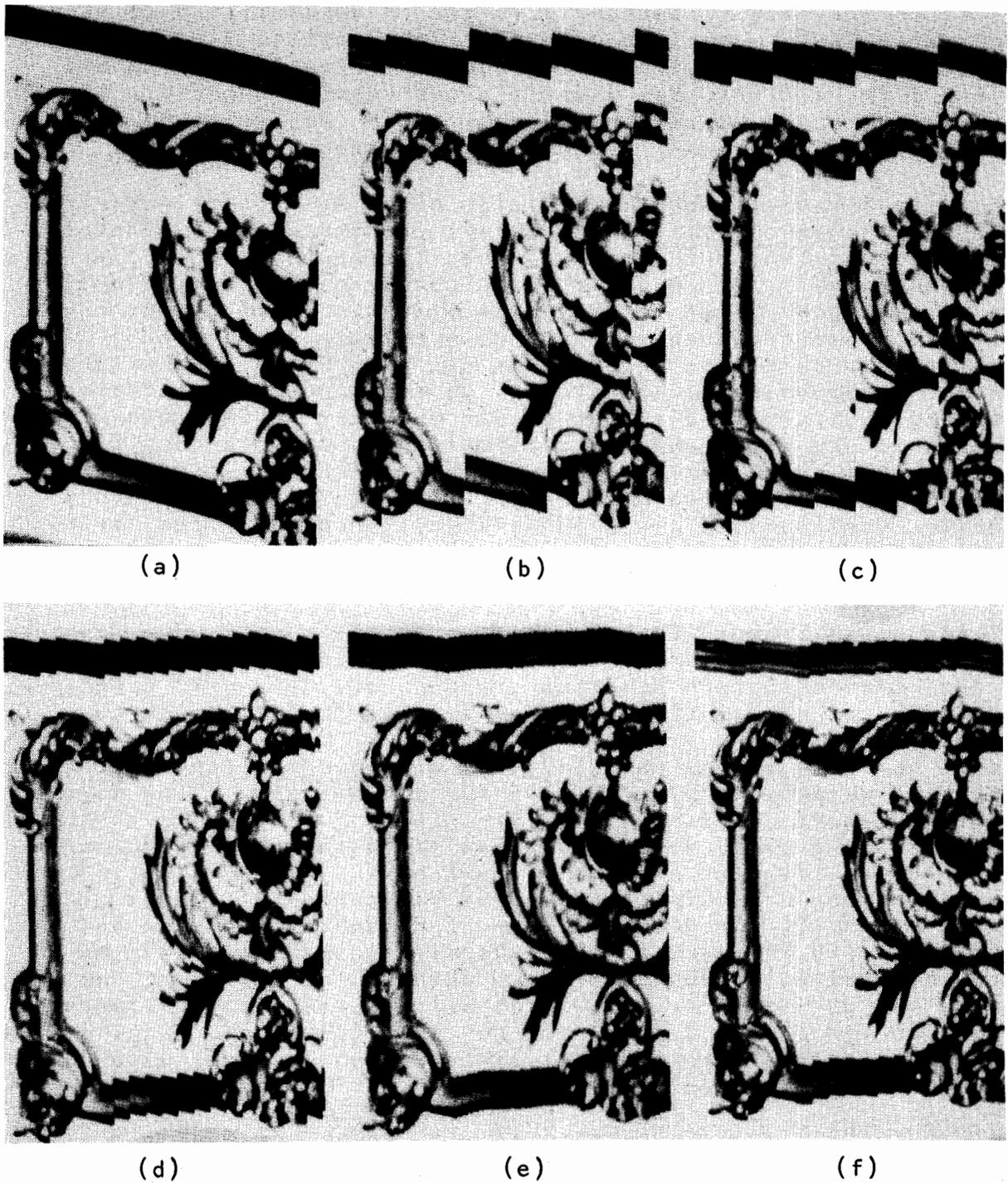


Abb.6/12 Unstetigkeiten im Orthophoto (1:10,8) in Abhängigkeit von der Streifenbreite Δx

K Kontorensprünge am Streifenrand, $\beta_x \approx 40^\circ$
 \updownarrow Streifenrichtung

Objekt: Schloß Linderhof, Speisezimmer

Bild	Δx (mm)	K (mm) gerechnet	K (mm) gemessen
a	Original	-	-
b	10	3,2	2,6
c	5	1,6	1,4
d	2	0,6	0,7
e	2/3	0,2	0,2
f	2(Opt.Int.)	0,1	0,2

Die differentielle Entzerrung erfolgte am Gerätesystem Zeiss Planimat - GZ 1 im on-line- und off-line-Betrieb. Die Streifenbreite wurde bei Entzerrung 0. Ordnung zwischen $\Delta x = 10$ mm und $\Delta x = 2/3$ mm variiert. Bei jeweils einer Version wurde die GZ 1-Zusatzeinrichtung "Optische Interpolation" (Abschnitt 3.2.3, Abb. 3/8) zur Entzerrung 1. Ordnung herangezogen.

Das erste Beispiel (Abb. 6/10) zeigt einen Ausschnitt aus einem gotischen Gewändeportal (Hauptportal) des Straßburger Münsters. Die Stereoaufnahme erfolgte aus einer Entfernung von 22,7 m (zum Nadirpunkt), der Radialabstand der dargestellten Objektzone zum Aufnahmenadirpunkt beträgt etwa 6 m. Die durch die Archivolten und Steinfiguren verlaufende (vermittelnde) Objektfläche besitzt eine seitliche Neigung von ca. 45° . Diese Fläche wurde bei der Orthoprojektion in (bezüglich des Objekts) vertikaler Richtung abgetastet. Die Führung der Meßmarke im Stereoauswertegerät erfolgte nicht auf der tatsächlichen, durch Bogen, Figuren und Konsolen stark gegliederten Objektoberfläche, sondern auf einer gedachten, stetig gekrümmten Fläche in Tiefe der Zwischendienste. Daher erscheinen alle Baldachinkonsolen in den Orthophotos (unabhängig von der Streifenbreite) als perspektivisch (siehe Abschnitt 6.3.4.).

Infolge der starken Flächenquerneigung entstanden in den Orthophotos Verfahrensfehler, die sich vor allem durch Unstetigkeiten an den Streifenrändern bemerkbar machen. Wie Abb. 6/10 zeigt, nehmen diese Fehler bei kleiner werdender Streifenbreite ab.

Dieser optische Vergleich soll durch eine rechnerische Abschätzung bestätigt werden. Dazu wurden die für den Mittelteil der dargestellten Objektzone ($x = 3,0$ m, $y = 5,5$ m, $r = 6,3$ m, $z = -21,2$ m, $\beta_x = 45^\circ$, $\beta_y = 0$) zu erwartenden maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am Streifenrand mit $\beta_{x0} = 0$ bzw. $\beta_{x0} = 35^\circ$ (Optische Interpolation) nach Gleichung (3,1c) berechnet. Die Werte sind in der Abb. 6/10 für die jeweilige Streifenbreite angegeben. Die differentielle Entzerrung 0. Ordnung verursacht bei $\Delta x = 5$ mm einen Maximalfehler von 0,65 mm im Orthophoto, bei $\Delta x = 2$ mm und $\Delta x_{opt} = 4$ mm (optische Interpolation) ergeben sich Punktversetzungen von etwa 0,2 - 0,3 mm, bei $\Delta x = 2/3$ mm und $\Delta x_{opt} = 2$ mm (optische Interpolation) erhält man Werte von maximal etwa 0,1 mm im Orthophoto (Maßstab 1:40).

Bezogen auf das Objekt betragen diese Fehler nur wenige Millimeter bzw. Zentimeter, weswegen eine Unterscheidung der Streifenbreiten als überflüssig erscheinen mag. Die an den Streifenrändern entstehenden Klaffungen und Konturensprünge vom Betrag $2e_y = 2y/r \cdot e_r = 1,8 e_r$ (nach Gleichung (6,10)) sind aber groß genug, um die homogene Bildaussage zu stören. Besonders bei filigranem Steinwerk und feingliedrigen Figuren treten derartige Unstetigkeiten und Lageversetzungen stark hervor. Es sollte daher bei diesem Beispiel bzw. bei ähnlichen Objekten mit einer Streifenbreite von $\Delta x \leq 2$ mm oder bei optischer Interpolation mit $\Delta x_{opt} \leq 4$ mm gearbeitet werden.

In Abb. 6/11 ist ein Ausschnitt der zylinderförmigen Oberfläche eines Taubenturmes in Mechelen/Belgien dargestellt. Der Turm (Radius $R = 2,90$ m) wurde aus einer Entfernung von 18,5 m (zum Nadirpunkt) aufgenommen. Die Umrißlinie des Zylinders verläuft bei $x = 2,87$ m, d.h. es wurden 99% der Aufrißoberfläche durch die Aufnahme erfaßt. In dem angegebenen Objektausschnitt wurden zwei Zonen unterschiedlicher Entfernung zum Nadirpunkt und damit auch verschiedener Oberflächenneigungen ausgewählt.

Zone A liegt um $x = -2,2$ m, $y = 3,8$ m, $r = -4,4$ m vom Nadirpunkt und um $z = -19,5$ m vom Projektionszentrum entfernt und besitzt eine Oberflächenquerneigung von $\beta_x = 49,3^\circ$. Die Zone B ($y = 5,0$ m, $r = 5,7$ m, $z = -20,6$ m) befindet sich dagegen mit $x = -2,8$ m sehr nahe am Rand, d.h. an der Umrißlinie des Turmes. Die Flächenneigung beträgt an dieser Stelle $\beta_x = 74,9^\circ$.

Für beide Zonen wurden nach den Gleichungen (3,1b) und (6,10) die Konturensprünge $K = 2e_y$ am jeweiligen Streifenrand für die Spaltbreiten $\Delta x = 5$ mm, 2 mm und $2/3$ mm (bei Entzerrung 0. Ordnung) sowie für $\Delta x_{opt} = 2$ mm (bei optischer Interpolation) berechnet und in Abb. 6/11 zusammengestellt.

Die Klaffungen in der Zone A liegen bei Streifenbreiten von $\Delta x = 2/3$ mm und $\Delta x_{opt} = 2$ mm in der Größenordnung von etwa 0,2 mm im Orthophoto. Das photographische Ergebnis kann in diesem Objektbereich akzeptiert werden. Mit Hilfe der Optischen Interpolation wird hier eine deutliche Verbesserung (bei $\Delta x = 2$ mm: von $K = 0,5$ mm auf $K = 0,2$ mm) erreicht.

Im äußersten Randbereich des Turmes (Zone B) wachsen die Verfahrensfehler infolge der großen Flächenneigung stark an. Sogar bei einer Streifenbreite von $\Delta x = 2/3$ mm ergeben sich Konturensprünge von über 1 mm. Da die Optische Interpolation beim Zeiss GZ 1 - System nur bis zu einer Neigung von $\pm 35^\circ$ wirksam ist, kann bei $\beta_x \approx 75^\circ$ ($\tan \beta_x = 3,7$; $\tan \beta_x - \tan \beta_{x0} = 3,0$) nach den Gleichungen (3,1) keine bedeutende Verbesserung erzielt werden. Bis zu einer Querneigung von $\beta_x = 46,4^\circ$ (≈ 72 % der Aufrißfläche des Turmes) ist die Optische Interpolation mit $\Delta x_{opt} = 2$ mm der Entzerrung 0. Ordnung mit $\Delta x = 2/3$ mm überlegen. Bei größeren Neigungen, wie sie z.B. an den seitlichen Rändern derartiger Türme auftreten, ist nur noch eine erhebliche Reduzierung der Streifenbreite möglich, wenn eine vorgegebene Fehlerschranke eingehalten werden soll, oder wenn die Unstetigkeiten an den Streifenrändern (z.B. in Abb. 6/11) weitgehend vermindert werden sollen.

Als drittes Beispiel für die Abhängigkeit des Verfahrensfehlers von der Streifenbreite Δx dienen die Orthophotoausschnitte in Abb. 6/12. Dargestellt ist ein Teil einer verzierten Innenwandfläche aus Schloß Linderhof (siehe auch Abb. B/10 im Anhang). Der Grundriß des Raumes ist elliptisch, die Oberflächenneigung β_x (quer zur Streifenrichtung) im Zentralbereich des Bildausschnitts ($x = 0$, $y = -2,2$ m, $z = -5,8$ m) beträgt etwa 40° .

Die Orthophotos wurden mit Streifenbreiten von $\Delta x = 10$ mm, 5 mm, 2 mm und $2/3$ mm bei Entzerrung 0. Ordnung sowie mit $\Delta x_{\text{opt}} = 2$ mm und Optischer Interpolation hergestellt. Die Größe der in den einzelnen Versionen auftretenden Konturensprünge an den Streifenrändern wurde nach den Gleichungen (3,1b) und (6,10) berechnet. Zusätzlich erfolgte eine empirische Bestimmung der mittleren Klaffungen durch einfaches Ausmessen in den Abbildungen 6/12 (b) - (f). Die Werte sind einander in Abb. 6/12 gegenübergestellt.

Die Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Fehlerbeträgen ist gut. Bei Entzerrung 0. Ordnung mit einer Streifenbreite von $\Delta x = 2/3$ mm entstehen im angegebenen Objektbereich ($\beta_x \approx 400$) nahezu die gleichen Klaffungen ($K \approx 0,2$ mm) wie bei Optischer Interpolation mit $\Delta x_{\text{opt}} = 2$ mm. Größere Streifenbreiten sollten in diesem Fall mit Rücksicht auf eine homogene Bildaussage nicht verwendet werden.

Die in Abb. 6/12 (e) und (f) trotz weitgehender Reduzierung der Verfahrensfehler auftretenden Lageversetzungen, die an der geradlinigen Leiste besonders stark sichtbar werden, sind auf Höhenabtafelfehler zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.3.2, Abb. 6/55).

Die Beispiele (Abbildungen 6/10 bis 6/12) haben gezeigt, daß sich die Verfahrensfehler und damit auch die Unstetigkeiten an den Streifenrändern durch die Wahl kleiner Spaltbreiten ($\Delta x \leq 2$ mm) sowie durch Entzerrung 1. Ordnung (evtl. mit Hilfe der Optischen Interpolation) so weit verringern lassen, daß eine störende Wirkung auf die Bildhomogenität im Orthophoto nicht mehr besteht. Da aber durch eine Reduzierung der Streifenbreite der Aufwand der differentiellen Entzerrung in der Regel stark anwächst, ist diese Maßnahme keine befriedigende Lösung des Problems.

Um eine Aussage über die zur Einhaltung einer gesetzten Fehler-schranke notwendige maximale Streifenbreite zu erhalten, wurden schematische Untersuchungen an geometrisch einfachen Standardflächen angestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Gegenstand der folgenden Kapitel.

6.1.2 Theoretische Untersuchungen zum Verfahrensfehler bei der differentiellen Entzerrung ausgewählter Standardflächen

Die Untersuchungen zum Verfahrensfehler und zur Streifenbreite der differentiellen Entzerrung wurden an einfachen Standardflächen (Ebene, Zylinder, Kugel, Kegel) durchgeführt, welche in der Architektur häufig vorkommen. Dabei wurde die fiktive Aufnahme-richtung zum Objekt mehrfach variiert. Die untersuchten Versionen sind in Tab. 6/13 zusammengestellt. Die Erläuterung der Bezeichnungen erfolgt jedoch erst in den jeweiligen Abschnitten.

Ebene	Neigung β_x	15°	30°	45°	60°
		zentrisch	exzentrisch	tangential	lateral
Zylinder $R_o = 8 \text{ m}$	konkav konvex	+	+	+	+
Kugel $R_o = 8 \text{ m}$	konkav konvex	+			
Kegel $R_o = 8 \text{ m}$ $H_o = 10 \text{ m}$	konvex II y	+			
	konvex II x	+			

Tab. 6/13 Objektvarianten zur Untersuchung des Verfahrensfehlers

konkav, konvex

Krümmungsrichtung der Objektoberfläche gegenüber dem Aufnahmeort

zentrisch, exzentrisch,
tangential, lateral

Lage des Körpers zur Aufnahmerichtung

IIy, IIx

Abtastrichtung bei der Orthoprojektion

Für die Untersuchung wird angenommen, daß Stereoaufnahmen (Kammer: Zeiss SMK, $c = 60 \text{ mm}$, nutzbares Bildformat: $8 \times 10 \text{ cm}^2$, Hochformat) im ungefähren Maßstab 1:200 vorliegen. Die Aufnahmeentfernung im Hauptstrahl des zur Orthoprojektion verwendeten Bildes betrug dabei jeweils $z_o = -12 \text{ m}$. Das Bildformat ($8 \times 10 \text{ cm}^2$) wurde bis zu den Rändern genutzt, was zwar den in Abschnitt 4.1.2 gestellten Forderungen nach einem kleinen Bildwinkel widerspricht, für die Untersuchung aber einen beabsichtigt ungünstigen Auswertefall bedeutet. Außerdem wurden nahezu alle Stereobilder dieser Arbeit aus Ermangelung anderer Geräte mit der genannten Kammer aufgenommen. Die fiktive Aufnahmeanordnung ist in Abbildung 6/14 dargestellt.

Es wird weiterhin angenommen, daß von den Meßbildern Orthophotos im Maßstab 1:25 hergestellt wurden. Als Streifenbreite wurde $\Delta x = 2 \text{ mm}$ gewählt, weil diese Größe nach den bisherigen Erfahrungen (Abschnitt 6.1.1.4) als Kompromiß zwischen Genauigkeit (bzw. Bildhomogenität) und Auswerteaufwand angesehen werden kann. Die in den Orthophotos auftretenden Verfahrensfehler sind in den nachfolgenden Diagrammen (Abbildungen 6/16, 6/20 - 6/25, 6/27 und 6/29) graphisch aufgetragen. Die Darstellung ist dabei auf einen Objektquadranten der Größe $8 \times 10 \text{ m}^2$ (bzw. Orthophotoquadranten der Größe $32 \times 40 \text{ cm}^2$) beschränkt (siehe Abbildung 6/14). Die Verhältnisse der anderen Quadranten sind dann durch die Symmetrie gegeben.

Im folgenden werden die bei der Orthoprojektion der ausgewählten Standardflächen (Ebene, Zylinder, Kugel, Kegel) auftretenden maximalen radialen Verfahrensfehler am Streifenrand berechnet und in Diagrammen graphisch dargestellt.

6.1.2.1 Ebene als Objektfläche

Die ebene Fläche kommt bei architektonischen Objekten am häufigsten vor. Sie ist die einfachste der hier zu behandelnden Standardflächen, weil ihre Neigungen (β_x und β_y) über den gesamten Bereich konstant sind.

Für vier Flächenneigungen ($\beta_x = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) sollen die bei der Orthoprojektion entstehenden maximalen radialen Verfahrensfehler am jeweiligen Streifenrand berechnet werden. Die hierbei verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 6/15 angegeben.

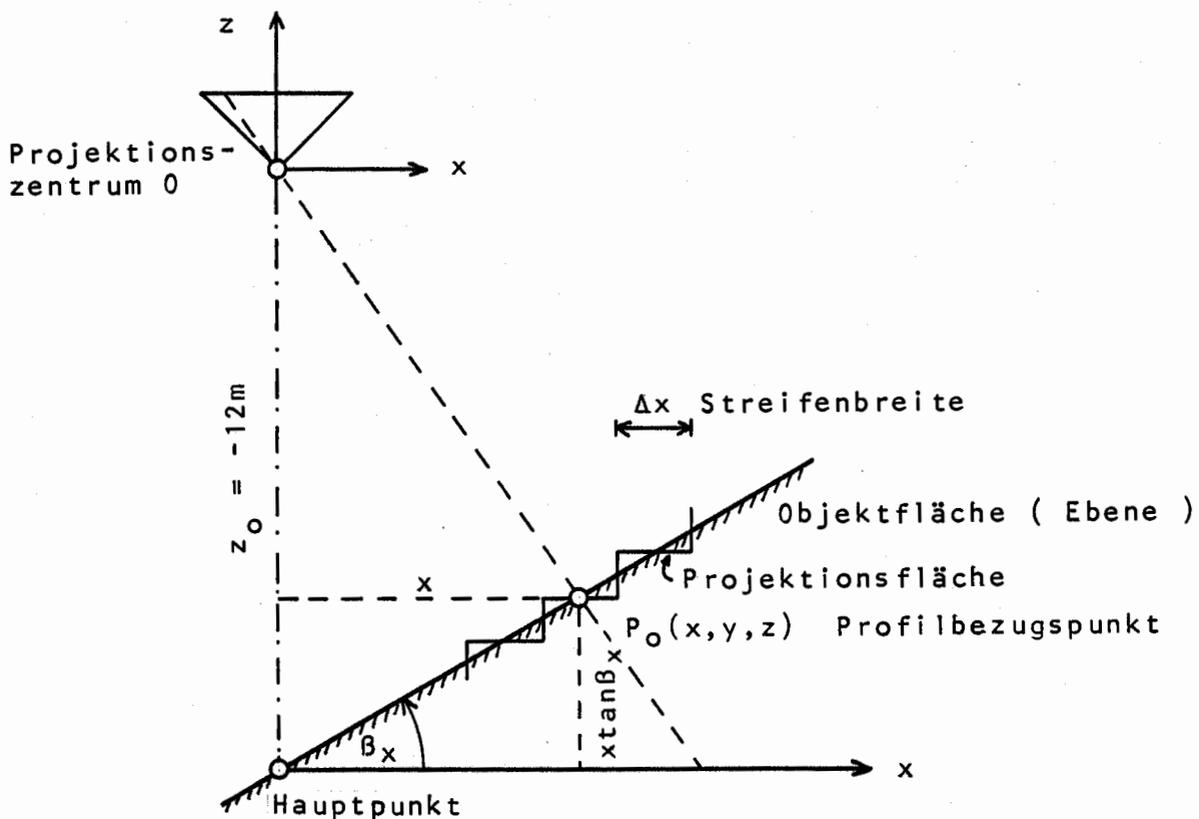


Abb. 6/15 Schematische Darstellung der Orthoprojektion einer um β_x quer zur Streifenrichtung geneigten Ebene auf horizontale Projektionsflächen (Entzerrung 0. Ordnung), Blick in Streifenrichtung

In Abschnitt 3.3.2 wurden Formeln zur Berechnung des Verfahrensfehlers aufgeführt. Nach Gleichung (3,1c) ergibt sich für den maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am Streifenrand mit $dx_{\max} = \Delta x/2$ und nach Division durch z :

$$e_r = - \frac{\Delta x}{2} \frac{r(\tan\beta_x - \tan\beta_{x_0})}{z - x \tan\beta_x - y \tan\beta_y} \quad (6,11)$$

Aus Abb. 6/15 ist ersichtlich, daß für eine Ebene

$$z - x \tan\beta_x = z_0,$$

also gleich der konstanten Aufnahmeentfernung zum Nadirpunkt ist. Derselbe Zusammenhang gilt auch für $y \tan\beta_y$. Das bedeutet, daß für eine ebene Fläche der Nenner in Gleichung (6,11) immer gleich z_0 , also konstant ist.

Damit gilt:

$$e_r = - \frac{r \Delta x}{2 z_0} (\tan\beta_x - \tan\beta_{x_0}) \quad (6,12)$$

Der Verfahrensfehler e_r ist also unabhängig von der Neigung β_y der Ebene in y -Richtung. Das konstante Verhältnis e_r/r deutet darauf hin, daß die Linien gleicher Verfahrensfehler konzentrische Kreise mit dem Radius

$$r = \frac{2 e_r \cdot z_0}{\Delta x (\tan\beta_x - \tan\beta_{x_0})} \quad (6,13)$$

um die Bildmitte, d.h. um den Nadirpunkt sind.

Diese Linien sind in Abb. 6/16 für die differentielle Entzerrung von vier um $\beta_x = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ und 60° quer zur Streifenrichtung geneigte Ebenen dargestellt. Die Zeichnung wurde auf den in Abb. 6/14 hervorgehobenen Objektquadranten beschränkt.

Die Entzerrung erfolgte mit einer Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm sowohl auf eine horizontale Projektionsfläche (0.Ordnung) als auch auf eine um β_{x_0} geneigte Fläche (1.Ordnung). Da von der Verwendung des Orthoprojektors Zeiss GZ 1 ausgegangen wurde, ergab sich eine (gerätebedingte) Begrenzung der Projektionsflächenneigung (Faseroptikring bei Optischer Interpolation) auf $\beta_{x_0} (\max) = \pm 35^\circ$. Alle Ebenen, deren Neigung $\leq 35^\circ$ beträgt, werden in diesem Fall ohne Verfahrensfehler umgebildet. Bei größerer Objektneigung wird mit $\beta_{x_0} = \pm 35^\circ$ entzerrt. Der verbleibende Restfehler errechnet sich dann aus der Differenz der Tangenswertes. Eine Entzerrung 1.Ordnung (Begrenzung auf $\pm 35^\circ$) reduziert die Lageversetzungen einer um $\beta_x = 45^\circ$ bzw. 60° geneigten Ebene so, daß sie den Fehlern einer in 0.Ordnung umgebildeten Ebene von $\beta_x = 17^\circ$ bzw. 46° entsprechen.

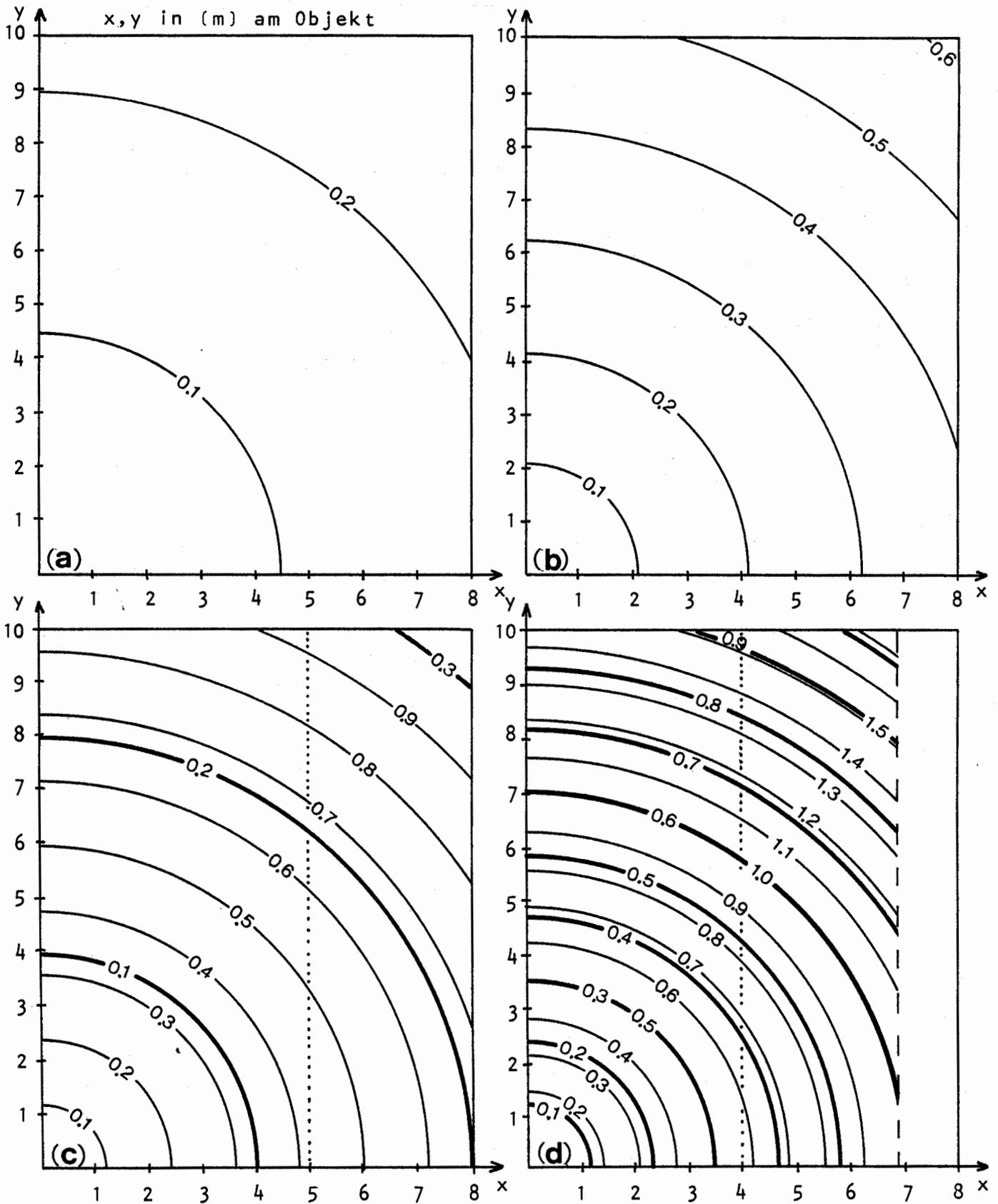


Abb. 6/16 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Geneigte Ebene
 (a) $\beta_x = 15^\circ$, (b) $\beta_x = 30^\circ$, (c) $\beta_x = 45^\circ$, (d) $\beta_x = 60^\circ$
 Begrenzung des Bildbereichs bei WW-Aufnahmen
 ---- theoretische Begrenzung des Bildbereichs bei Öffnungswinkel 180°
 ————— Entzerrung 0. Ordnung ————— Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)

Auf einige Besonderheiten in Abb. 6/16 soll hingewiesen werden. Bei einer Flächeneigung von $\beta_x = 60^\circ$ und einer Aufnahmeentfernung von $z_0 = -12$ m zum Nadirpunkt schneidet die Objektebene die durch das Projektionszentrum 0 verlaufende Fläche $z = 0$ (siehe Abb. 6/15) in der Geraden $x = 6,93$ m. Das bedeutet von der Aufnahme her, daß unter der theoretischen Annahme eines Kammeröffnungswinkels von $2\alpha = 180^\circ$ nur $x = 6,93$ m der Objektfläche abgebildet werden. In Wirklichkeit liegt die Grenze bei der Verwendung von Weitwinkelkamern ($2\alpha \approx 90^\circ$) für eine Flächeneigung von $\beta_x = 45^\circ$ etwa bei $x = 5$ m, für $\beta_x = 60^\circ$ etwa bei $x = 4$ m. Die Linien $x = 4$ m bzw. $x = 5$ m sind in Abb. 6/16 punktiert, die Linie $x = 6,93$ m ist gestrichelt eingetragen.

Verbunden mit der theoretischen Begrenzung des x -Bereiches auf $6,93$ m bei $\beta_x = 60^\circ$ ist die Tatsache, daß sich hier die Verfahrensfehlerkomponente e_x nach Gleichung (3,2a) wegen $z \rightarrow 0$ dem Abstand dx , d.h. der halben Streifenbreite ($\Delta x/2$) nähert, was gleichbedeutend damit ist, daß profilnahe Objektpunkte am Streifenrand abgebildet werden.

Aus Abb. 6/16 ist ersichtlich, daß bei einer angenommenen maximalen Lageversetzung von $e_r = 0,5$ mm am Streifenrand (Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm) eine bis zu etwa 30° geneigte Ebene bei dem vorgegebenen Format von 8×10 mm² ganz, bei einer Neigung von 45° aber nur bis zu etwa $1/3$ der Fläche umgebildet werden kann. Bei Entzerrung 1. Ordnung (Optische Interpolation, Beschränkung auf $\beta_{x0} \leq 35^\circ$) beträgt dagegen der Maximalfehler in der ungünstigsten Ecke des Bildausschnitts bei einer Flächeneigung von $\beta_x = 45^\circ$ erst etwa $0,3$ mm im Orthophoto.

Eine entsprechende Aussage kann über die mittlere verfahrensbedingte Genauigkeit im Orthophoto gewonnen werden. Aus Gleichung (6,8) ergibt sich der mittlere Verfahrensfehler σ_r im gesamten Orthophoto zu $1/3$ des maximal möglichen Verfahrensfehlers $e_r(\max)$ am Rande des äußersten Streifens. Für die vier Flächeneigungen $\beta_x = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ sind diese Werte in Tabelle 6/17 angegeben.

Neigung β_x	15°	30°	45°	$45^\circ, \text{Opt. Int.}$
e_r (mm) max	0,29	0,62	1,07	0,32
σ_r (mm)	0,10	0,21	0,36	0,11

Tab. 6/17 Mittlerer verfahrensbedingter Punktfehler σ_r [mm] im Orthophoto für Ebenen von $\beta_x = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ und 60° Neigung bei differentieller Entzerrung mit einer Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm.

Die Tabelle macht deutlich, daß bei differentieller Entzerrung 0. Ordnung mit einer Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm nur eine bis etwa 30° geneigte Objektfläche der angegebenen Größe so erfaßt werden kann, daß der mittlere Punktfehler im Bereich der Zeichengenauigkeit ($\approx 0,2$ mm) liegt. Bei Verwendung der Optischen Interpolation ist bei gleicher Genauigkeit die Umbildung einer bis etwa 50° geneigten Ebene möglich.

6.1.2.2 Zylinder als Objektfläche

Als theoretische Standardfläche wurde hier ein gerader Kreis-
zylinder gewählt, wie er in der Architektur bei Tonnengewölben
oder als Wandfläche in Räumen mit kreisförmigem Grundriß sowie
bei nahezu allen Apsiden und runden Türmen vorkommt. Dement-
sprechend wurde unterschieden zwischen den Objektvarianten
"Zylinder, konkav" und "Zylinder, konvex", jeweils bezogen auf
die Aufnahmerichtung. Der Radius des angenommenen Zylinders be-
trage $R = 8 \text{ m}$, die Aufnahmeentfernung zum Nadirpunkt sei
 $z_0 = -12 \text{ m}$.

Untersucht wurden die in Abb. 6/18 dargestellten Aufnahmefälle:

- (a) konkav, zentrisch
- (b) konkav, exzentrisch
- (c) konkav, tangential
- (d) konvex, zentrisch
- (e) konvex, exzentrisch
- (f) konvex, tangential
- (g) konvex, lateral

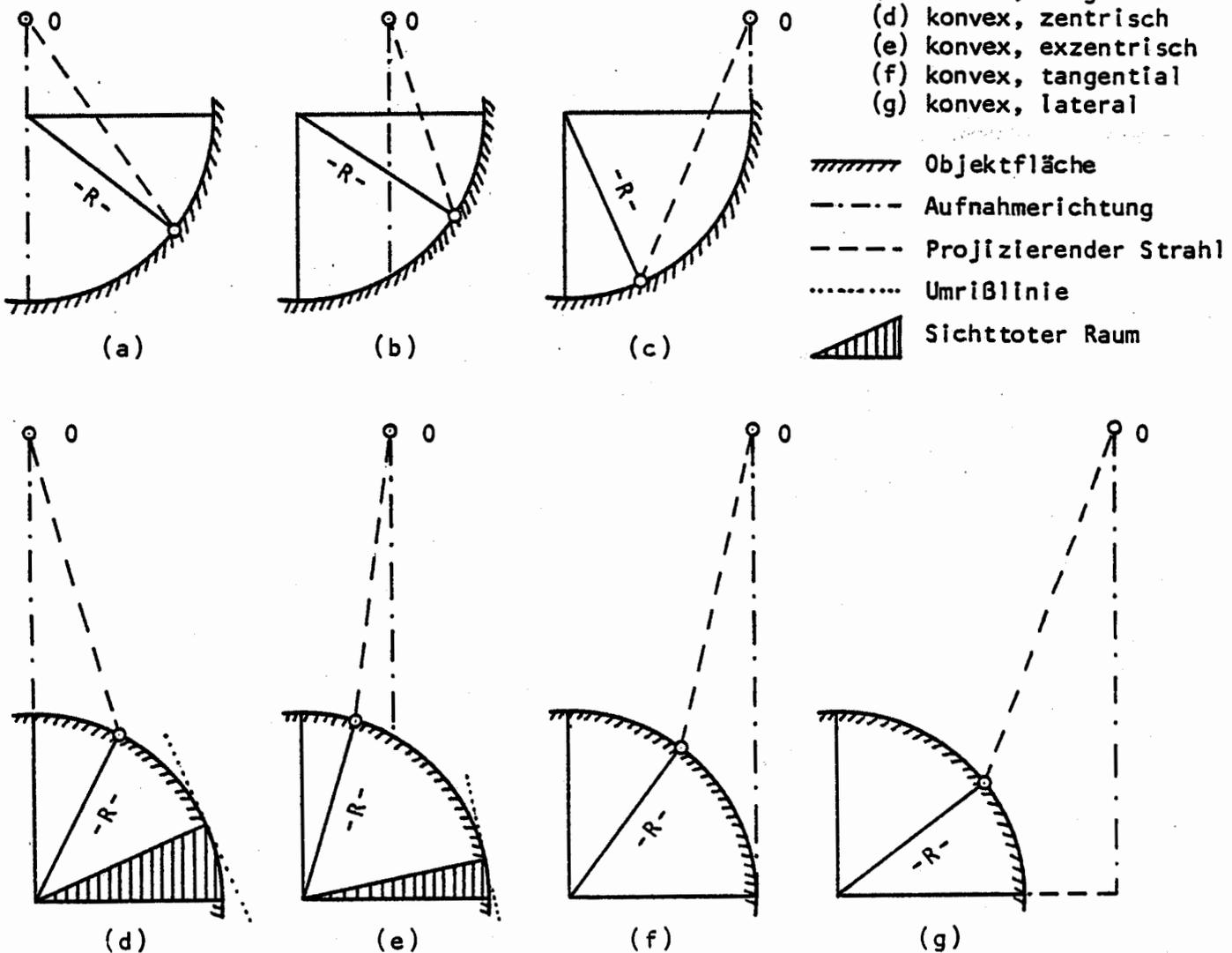


Abb. 6/18 Aufnahmeanordnungen zur Standardfläche Zylinder
für die Untersuchung des Verfahrensfehlers

Die in den Formelableitungen verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 6/19 angegeben.

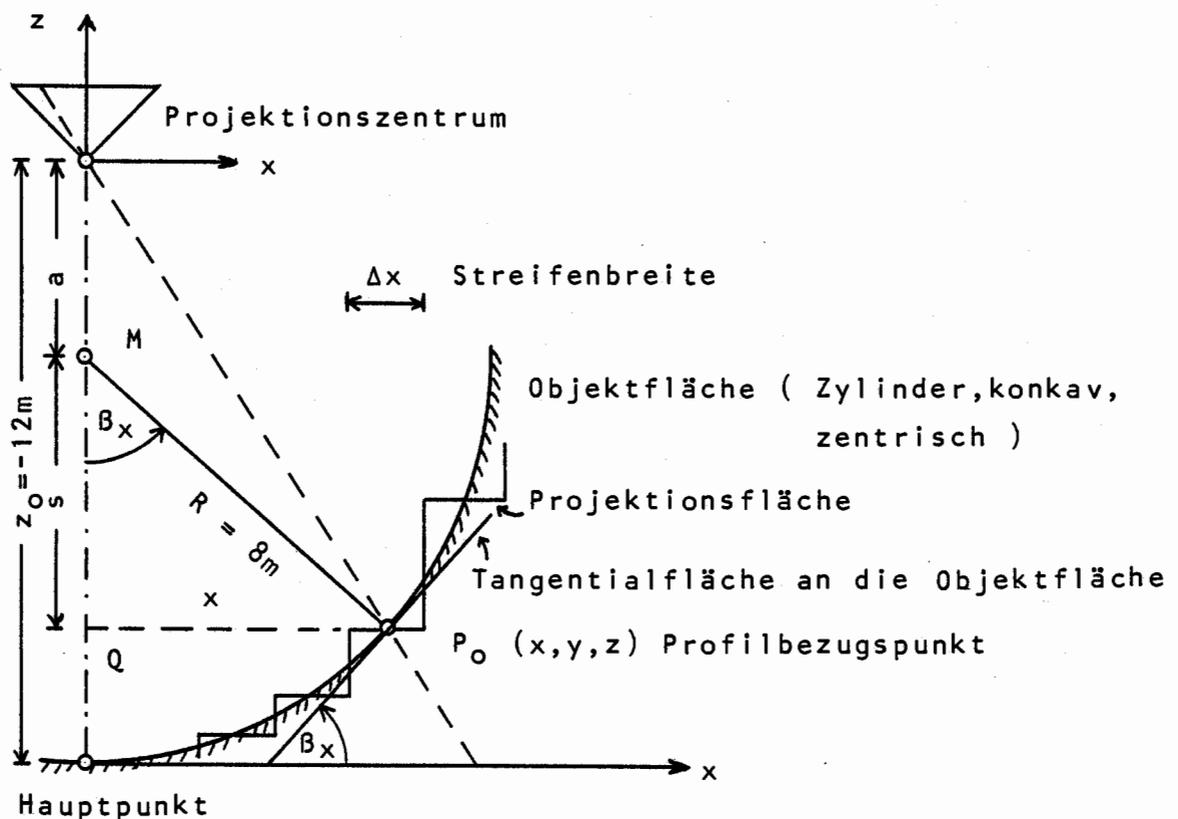


Abb. 6/19 Schematische Darstellung der Orthoprojektion einer parallel zur Streifenrichtung verlaufenden Zylinderfläche auf horizontale Projektionsflächen (Entzerrung 0. Ordnung), Blick in Streifenrichtung, Version (a) aus Abb. 6/18

Im folgenden wird der Abstand von der Zylindermittelachse M zum Projektionszentrum O mit a , zum Punkt Q ($x = 0, y = 0, z$) mit s bezeichnet. Nach Abb. 6/19 ergibt sich:

$$s = \pm \sqrt{R^2 - x^2} \quad \begin{array}{l} + \text{ für Zylinder, konkav} \\ - \text{ für Zylinder, konvex} \end{array} \quad (6,14)$$

$$\tan \beta_x = \frac{x}{s}$$

$$z = - (a + s)$$

Für den maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am jeweiligen Streifenrand erhält man durch Einsetzen der Beziehungen (6,14) in die Gleichung (6,11) mit $\beta_{x0} = 0$ (für Entzerrung 0. Ordnung) und mit $\beta_y = 0$:

$$e_r = \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{x \cdot r}{a \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \pm R^2} \quad (6,15)$$

Das Vorzeichen im Nenner ist (+) für die Version "Zylinder, konkav" und (-) für den Fall "Zylinder, konvex". Während bei der Umbildung der Standardfläche Ebene der Verfahrensfehler e_r über die gesamte Orthophotofläche nach Gleichung (6,12) proportional zum Radialabstand r ist, gilt eine entsprechende lineare Abhängigkeit bei der Standardfläche Zylinder nur für die Linien $x = \text{konstant}$, also für die Zylinder - Mantellinien.

Die bei den verschiedenen Aufnahmeanordnungen (a) bis (g) aus Abb. 6/18 auftretenden maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am jeweiligen Streifenrand sind in den Abbildungen 6/20 bis 6/23 für die Standardfläche Zylinder aufgezeichnet. Dabei ist jeweils nur ein Objektquadrant (entsprechend Abb. 6/14) dargestellt.

Abb. 6/24 enthält einen Vergleich der Verfahrensfehler für die Objektvarianten "Zylinder, konkav" und "Zylinder, konvex" bei zentrischer und tangentialer Aufnahmeanordnung. In Abb. 6/25 wird dagegen ein Vergleich der Aufnahmeverhältnisse "zentrisch, exzentrisch, tangential, lateral" für konkave bzw. konvexe Krümmung der Zylinderoberfläche angestellt.

Aus den Abbildungen 6/20 bis 6/23 ist ein starkes Anwachsen des Verfahrensfehlers gegen den rechten Objektrand hin zu ersehen. Dieses (in grober Näherung quadratische) Anwachsen ist mit der gleichzeitigen Zunahme des x -Wertes und der Oberflächenneigung zu erklären. Bei Entzerrung 1. Ordnung unter Verwendung der optischen Interpolationseinrichtung zum Orthoprojektor Zeiss GZ 1 treten bis zu einer Flächenneigung von $\beta_x = \pm 35^\circ$ keine Verfahrensfehler auf. Das bedeutet, daß im gegebenen Beispiel mit einem Zylinderradius von $R = 8$ m und einer x -Ausdehnung des Objekts von ebenfalls 8 m etwa 60 % der Orthophotofläche völlig frei von Verfahrensfehlern sind.

Die verfahrensbedingte Genauigkeit im gesamten Orthophoto könnte entsprechend Gleichung (6,6) durch Integration der (bei der Objektfläche Zylinder) nichtlinearen Funktion (6,15) ermittelt werden. Auf diese Herleitung wird jedoch hier verzichtet. Die Abschätzung einer mittleren Genauigkeit erfolgte stattdessen auf empirischem Weg. Für die in den Abbildungen 6/20 bis 6/23 angegebenen Objekt- und Aufnahmeversionen wurden die in den Orthophotoquadranten auftretenden Verfahrensfehler e_r (bei Entzerrung 0. Ordnung) am jeweiligen Streifenrand rasterweise bestimmt. Als quadratischer Mittelwert aus allen Einzelfehlern ergab sich ein Betrag von ca. 0,6 mm. Mit Gleichung (6,4) erhält man daraus eine mittlere (verfahrensbedingte) Genauigkeit im gesamten Orthophoto von 0,35 mm. Dieser Wert entspricht etwa der Genauigkeit bei differentieller Entzerrung einer um $\beta_x = 45^\circ$ geneigten Ebene (Tab. 6/17), wobei die schräge Ebene als grobe Näherung für die Zylinderoberfläche angesehen werden kann.

Der Vergleich zwischen den Objektvarianten "Zylinder, konkav und Zylinder, konvex", wie er in Abb. 6/24 angestellt wird, ist rein theoretischer Natur, weil die Unterscheidung ausschließlich objektbedingt ist. Dennoch ist es interessant, daß die Genauigkeit bei der differentiellen Entzerrung von konkaven Flächen größer ist als bei (vom Aufnahmeort aus gesehen) konvexen Flächen, vorausgesetzt, daß das zur Orthoprojektion verwendete Bild zentrisch zum Objekt liegt. Diese Tatsache läßt sich (mit $\beta_y = 0$) an Gleichung (6,11) für den radialen Verfahrensfehler e_r am Streifenrand anschaulich zeigen.

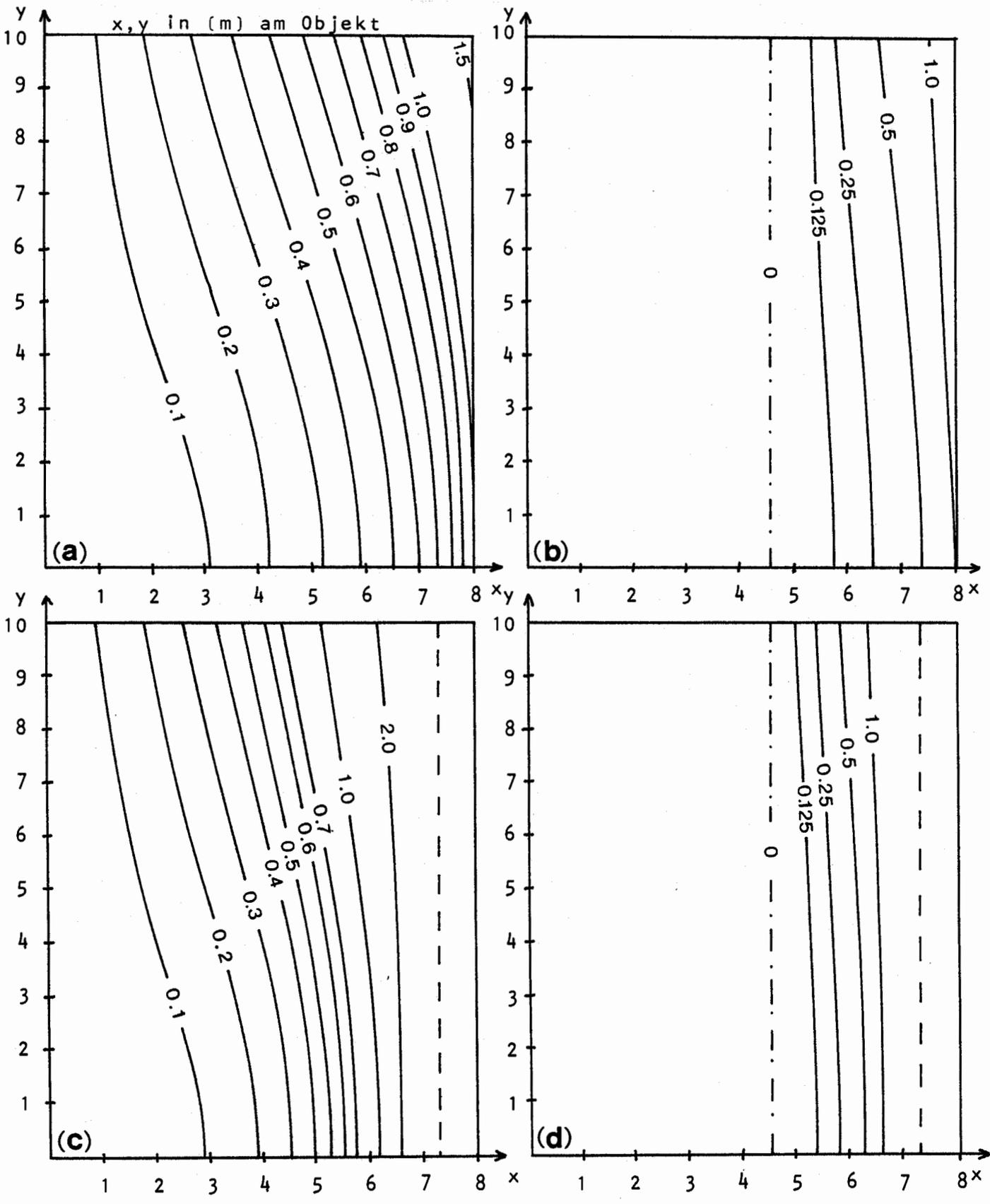


Abb. 6/20 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Zylinder, zentrische Aufnahme
 (a), (b) konkave Krümmung, (c), (d) konvexe Krümmung
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Umrißlinie - - - - - Linie für $e_r = 0$

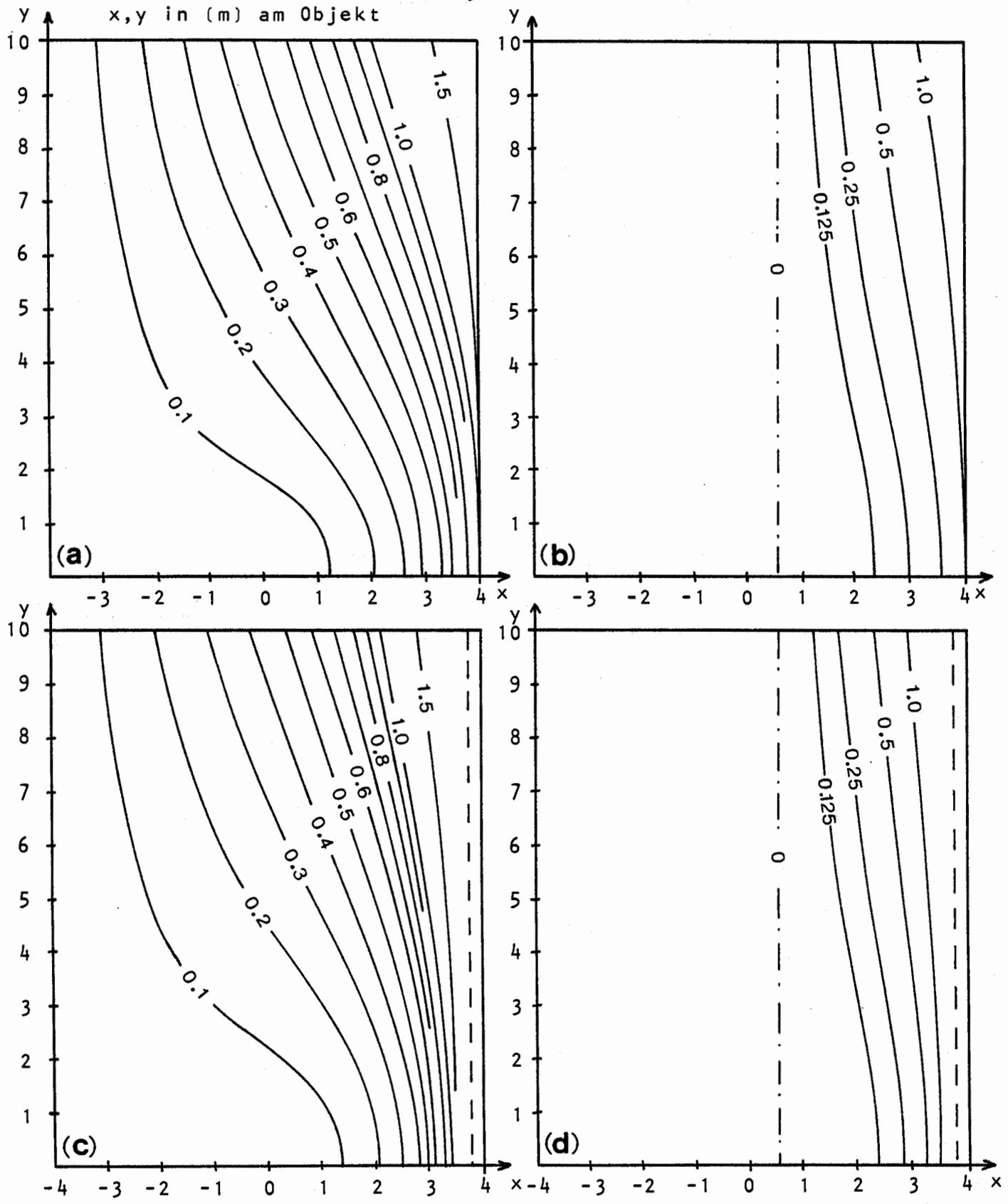


Abb. 6/21 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Zylinder, exzentrische Aufnahme
 (a), (b) konkave Krümmung, (c), (d) konvexe Krümmung
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Umrißlinie - · - · - · Linie für $e_r = 0$

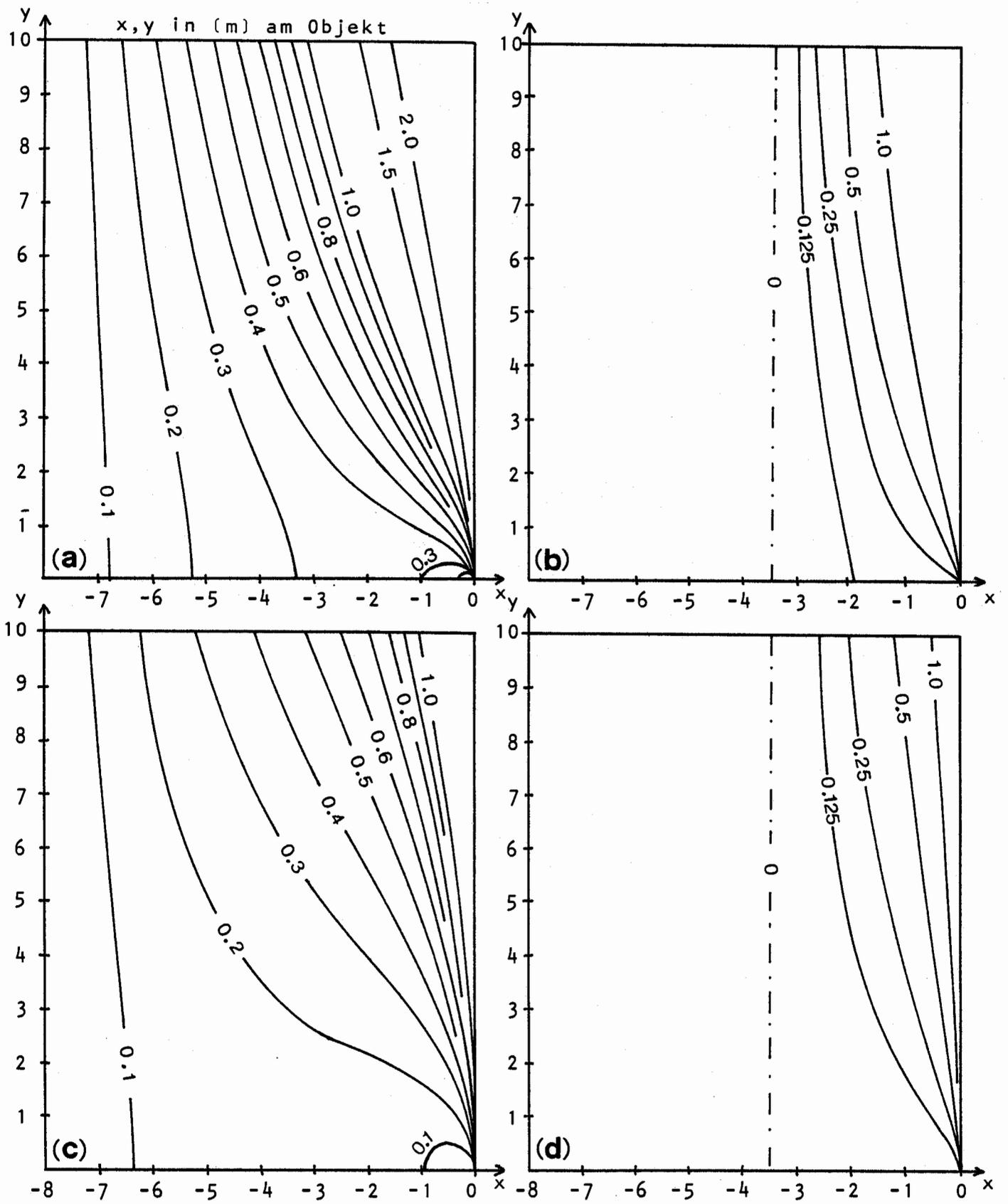


Abb. 6/22 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Zylinder, tangentielle Aufnahme
 (a),(b) konkave Krümmung, (c),(d) konvexe Krümmung
 (a),(c) Entzerrung 0. Ordnung, (b),(d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Umrißlinie - · - · - · Linie für $e_r = 0$

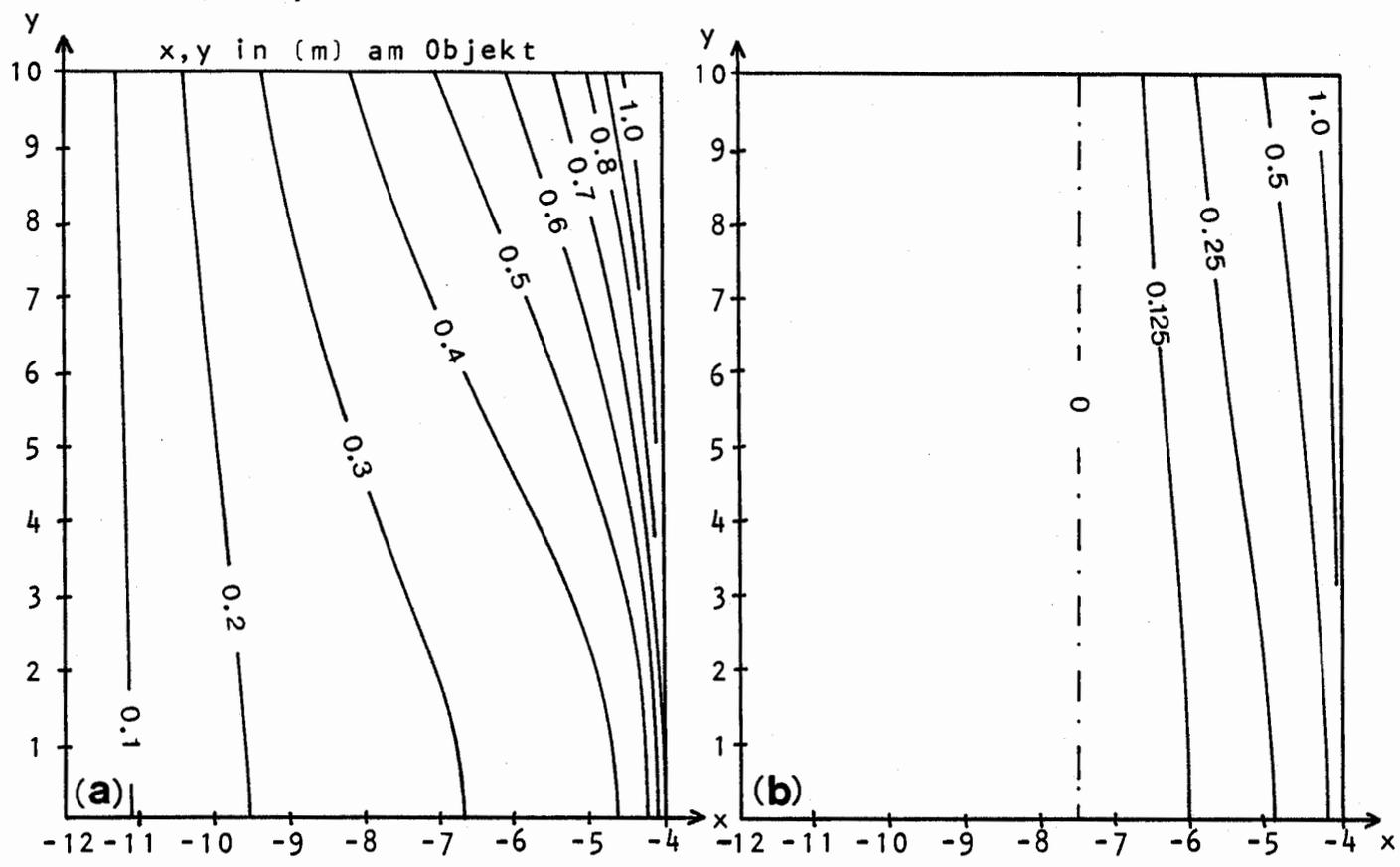


Abb. 6/23 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Zylinder, laterale Aufnahme
 (a), (b) konvexe Krümmung
 (a) Entzerrung 0. Ordnung (b) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Linie für $e_r = 0$

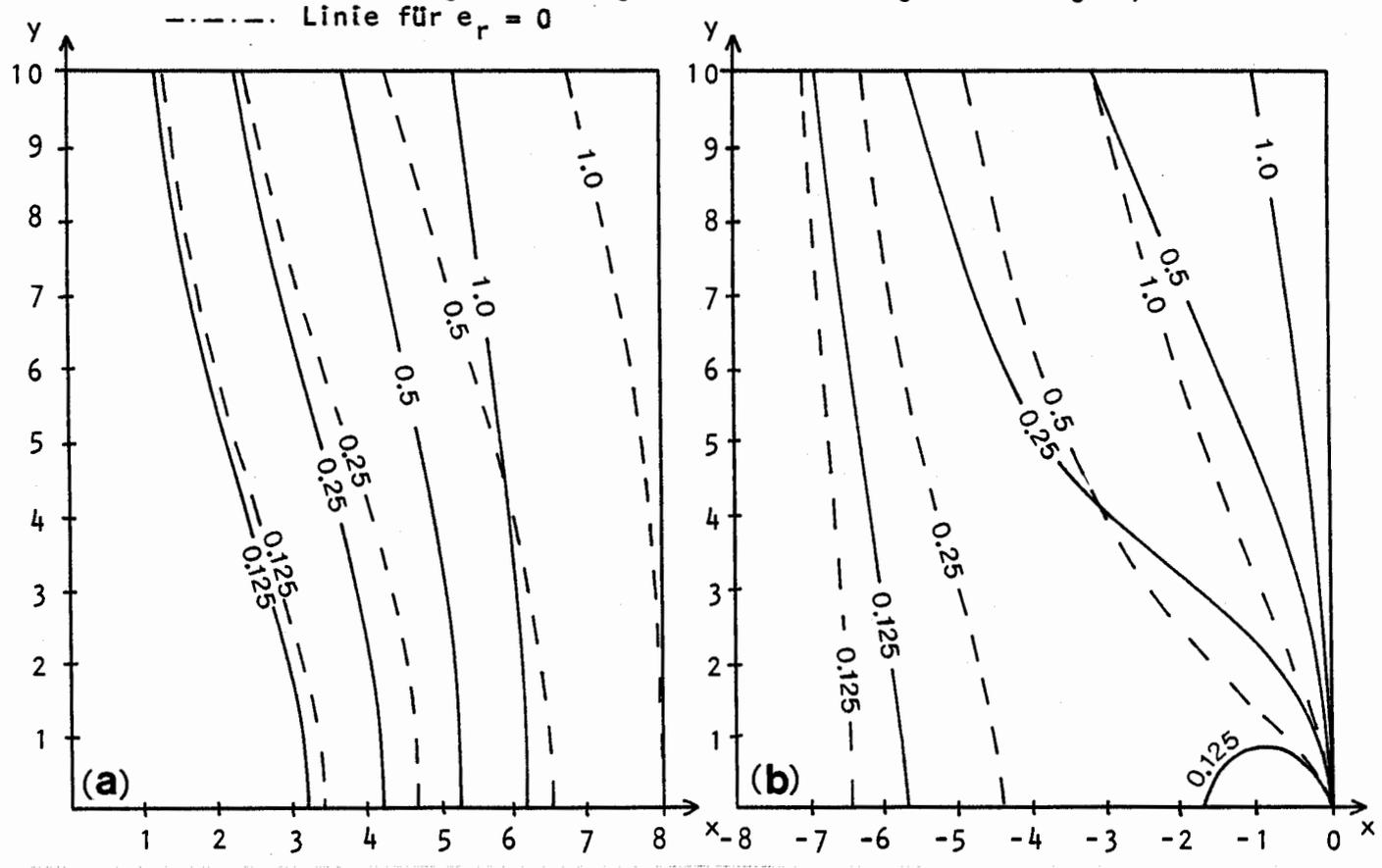


Abb. 6/24 Vergleich der Verfahrensfehler e_r (mm) für die Objektvarianten "Zylinder, konkav (- - - -)" und "Zylinder, konvex (— — —)"
 (a) zentrische Aufnahme, (b) tangentielle Aufnahme
 (a), (b) Entzerrung 0. Ordnung

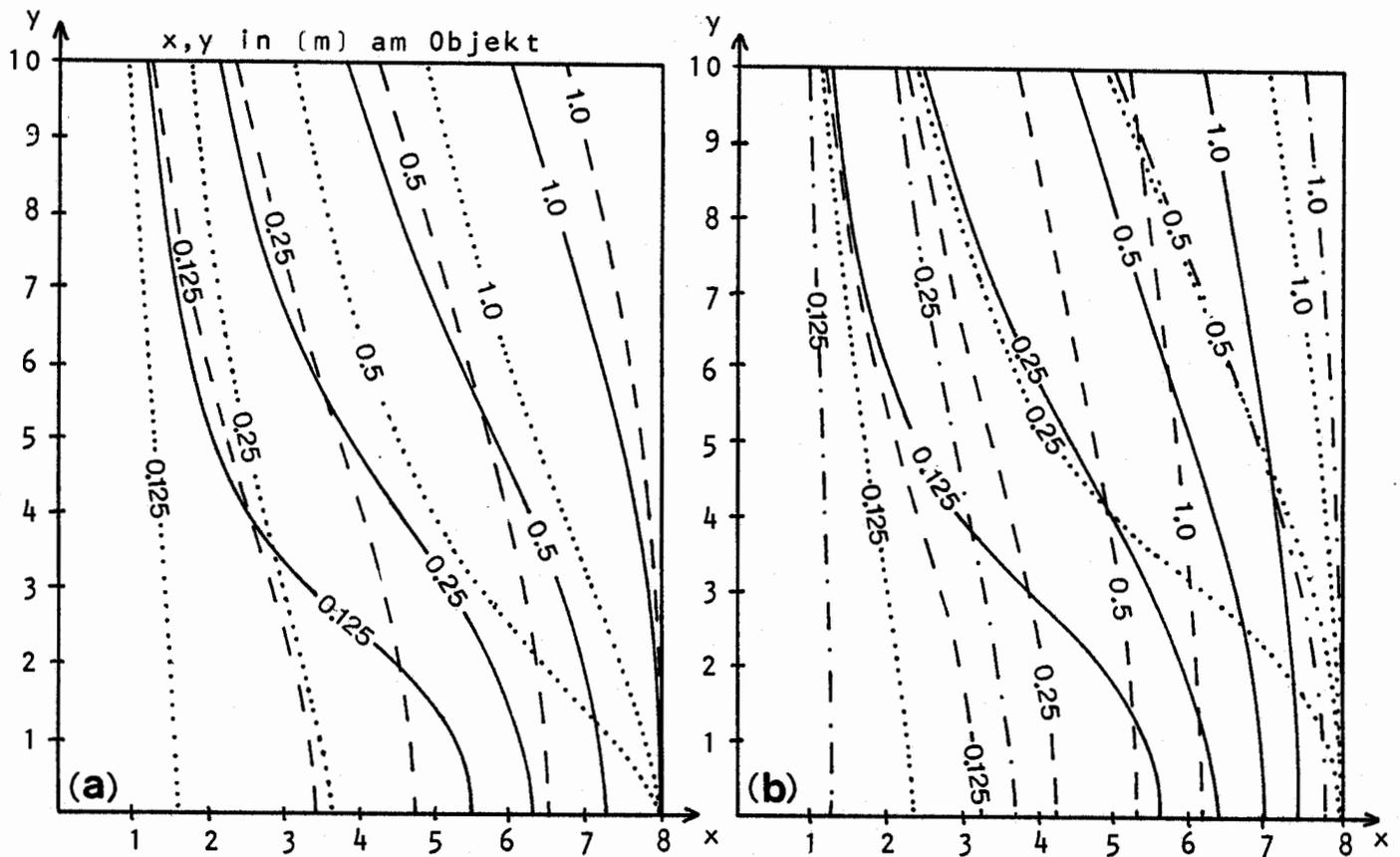


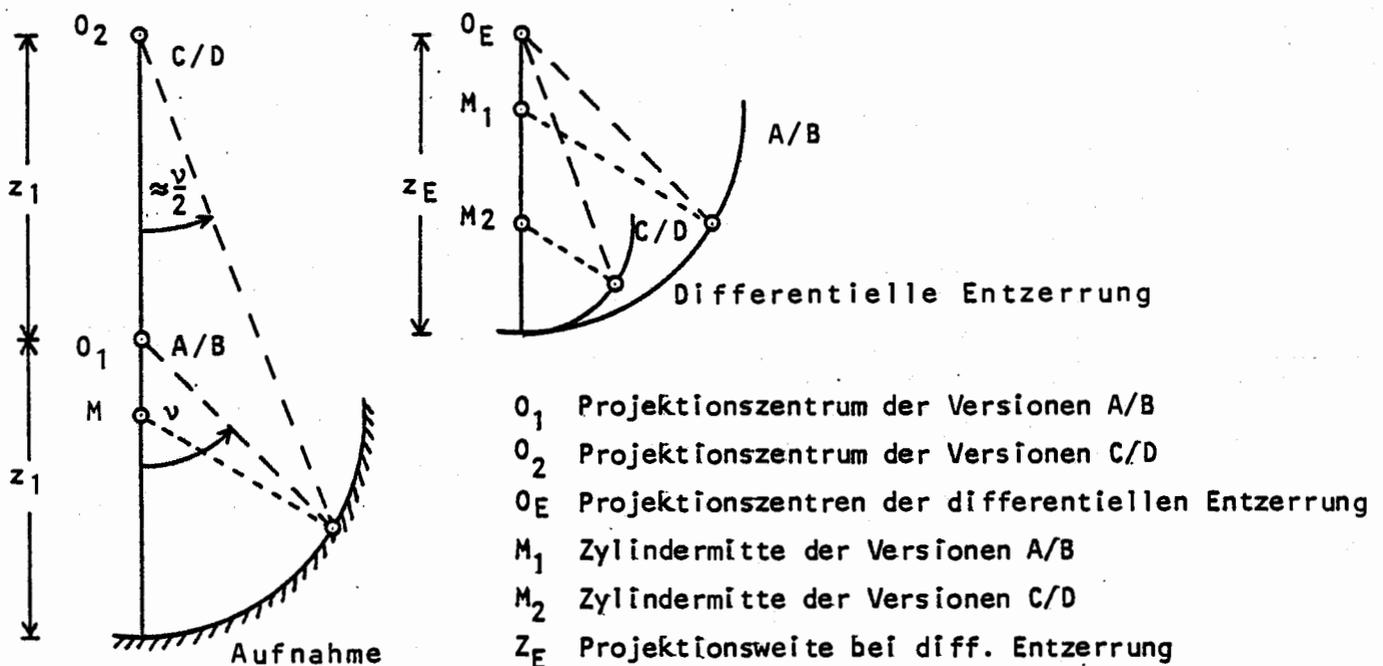
Abb. 6/25 Vergleich der Verfahrensfehler e_r (mm) für die Aufnahmeverhältnisse "Zylinder zentrisch (---), exzentrisch (—), tangential(.....) und lateral (-.-.-.-)"
 (a) konkave Krümmung, (b) konvexe Krümmung
 (a), (b) Entzerrung 0. Ordnung

Für den Fall "Zylinder, konkav, zentrisch" (Abb. 6/18 a) wird bei $x > 0$, $\tan\beta_x > 0$ und $z < 0$ der Nenner in Gleichung (6,11) vom Betrag her größer, der Fehler also kleiner als bei $x > 0$, $\tan\beta_x < 0$ und $z < 0$ für die Version "Zylinder, konvex, zentrisch" (Abb. 6/18 d). Bei der Aufnahmeanordnung "Zylinder tangential" wird für die Darstellung der gleichen Objektfläche $x < 0$, weswegen sich hier die Relation in der Größe der Verfahrensfehler zwischen konkaver (Abb. 6/18 c) und konvexer (Abb. 6/18 f) Oberfläche umkehrt.

Das architektonische Objekt läßt sich zwar nicht nach Genauigkeitskriterien der differentiellen Entzerrung aussuchen, aber die Aufnahmeanordnung (siehe auch Abschnitt 4.2) kann entsprechend der angegebenen Fehlerabschätzungen modifiziert werden. Aus Abb. 6/25 geht hervor, daß bei konkaver Objektfläche eine zentrische oder exzentrische Kammeraufstellung (Abb. 6/18 a,b) die kleinsten Verfahrensfehler bei der Orthoprojektion verursacht.

Für die Aufnahme konvexer Flächen sollte dagegen in jedem Fall eine seitliche Aufstellung erfolgen. Wie Abb. 6/18 (d,e,f) zeigt, rückt bei größerem seitlichen Abstand von der Objektmittle die Umrißlinie weiter nach außen. Bei lateraler Kameraaufstellung (Fall g) wird sogar eine vollständige Erfassung des Körpers möglich. Seitliche Aufnahmen erfordern aber in der Regel die Auswertung von zwei Modellen, was den Arbeitsaufwand erhöht. Bei größerer Aufnahmeentfernung zum Objekt liegt die Umrißlinie ohnehin näher am Objektrand, so daß hier ohne eine wesentliche Genauigkeitseinbuße eine objekt-zentrische Aufstellung erfolgen kann.

Die Aufnahmeentfernung (vgl. Abschnitt 4.2.1) steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Verfahrensfehler bzw. mit der für eine bestimmte Genauigkeit erforderlichen Streifenbreite. Diese Beziehung soll an Hand von Abb. 6/26 erläutert werden.



Version	A	B	C	D
Aufnahmeentfernung	z_1	z_1	$2 z_1$	$2 z_1$
Projektionswinkel	v	v	$\approx v/2$	$\approx v/2$
Orthophotomaßstab	M_k	M_k	$M_k/2$	$M_k/2$
Streifenbreite	Δx_1	$\Delta x_1/2$	Δx_1	$\Delta x_1/2$
Genauigkeit	G	2 G	$\approx G$	$\approx 2 G$
Zeitaufwand	T	2 T	T/2	T
Filmverbrauch	F	F	F/4	F/4

Abb. 6/26 Genauigkeitssteigerung bzw. Aufwandsverminderung durch Vergrößerung (hier Verdoppelung) der Aufnahmeentfernung

Aus Abb. 6/28 lassen sich unter Zuhilfenahme der Hyperbel- und Kreisgleichungen folgende Beziehungen ableiten:

$$\begin{aligned}
 s &= - \sqrt{\frac{R^2}{H^2} \cdot (H - y)^2 - x^2} \\
 \tan\beta_x &= \frac{x}{s} \\
 \tan\beta_y &= \frac{H - y}{s} \cdot \frac{R^2}{H^2} \\
 z &= - (a + s)
 \end{aligned} \tag{6,18}$$

Durch Einsetzen dieser Größen in Gleichung (6/11) erhält man für $\beta_{x0} = 0$ (Entzerrung 0. Ordnung) den maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am jeweiligen Streifenrand beim Abtasten in y - bzw. x -Richtung:

$$e_r(y) = \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{x \cdot r}{a \sqrt{\frac{R^2}{H^2} \cdot (H - y)^2 - x^2} - \frac{R^2}{H} (H - y)} \tag{6,19}$$

$$e_r(x) = \frac{\Delta y}{2} \cdot \frac{(H - y) \cdot \frac{R^2}{H^2} \cdot r}{a \sqrt{\frac{R^2}{H^2} \cdot (H - y)^2 - x^2} - \frac{R^2}{H} (H - y)} \tag{6,20}$$

Der Nenner in beiden Gleichungen ist identisch. Vergleicht man die Zähler, so ergibt sich bei $x < (H - y) R^2/H^2$, daß $e_r(y) < e_r(x)$ ist.

Am praktischen Beispiel mit $R = 8$ m und $H = 10$ m bedeutet das, daß für 80 % der Kegelsicht der Verfahrensfehler bei Abtastung in y -Richtung kleiner ist als in x -Richtung. Durch die geringe Objektquerneigung β_x im Bereich $x = 0$ des Kegels ergeben sich dementsprechend kleine Verfahrensfehler. Bei Abtastung in x -Richtung dagegen liegt die minimale Querneigung bereits bei $\beta_y = \arctan R/H$, also am Beispiel bei $\beta_y \approx 40^\circ$, d.h. auch die Optische Interpolation ergibt keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit.

Die nach den Gleichungen (6,19) und (6,20) berechneten maximalen radialen Verfahrensfehler $e_r(y)$ und $e_r(x)$ am jeweiligen Streifenrand sind in Abb. 6/29 dargestellt.

Für den maximalen radialen Verfahrensfehler am jeweiligen Streifenrand erhält man durch Einsetzen der Formeln (6,16) in die Gleichung (6,11) mit $\beta_{x_0} = 0$ (für Entzerrung 0. Ordnung)

$$e_r = \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{x \cdot r}{a\sqrt{R^2 - r^2} \pm R^2} \quad (6,17)$$

Analog zu Gleichung (6,15) für den Zylinder gilt das Vorzeichen (+) für die Version "Kugel, konkav", (-) für "Kugel, konvex". Während beim Zylinder eine Proportionalität zwischen e_r und r für eine Mantellinie gegeben war, besteht bei der Standardfläche Kugel kein linearer Zusammenhang dieser Größen mehr.

Für die Versionen "Kugel, konkav" und "Kugel, konvex" wurden die maximalen radialen Verfahrensfehler e_r am jeweiligen Streifenrand nach Gleichung (6,17) berechnet und in den Diagrammen (Abb. 6/27) für Entzerrung 0. Ordnung und 1. Ordnung (Optische Interpolation, Neigungsbeschränkung auf $\beta_{x_0} = \pm 35^\circ$) zusammengestellt. Die Abbildungen geben (entsprechend Abb. 6/14) jeweils nur einen Objektquadranten wieder.

Bei der differentiellen Entzerrung der konkaven Kugeloberfläche beträgt der maximale radiale Verfahrensfehler e_r am Rand der Kugel etwa 0,8 mm. Als Mittelwert aller an den Streifenrändern auftretenden Verfahrensfehler im gesamten Orthophoto erhält man auf empirischem Weg (siehe auch Standardfläche Zylinder) etwa 0,3 mm. Mit Gleichung (6,4) ergibt sich daraus eine mittlere Genauigkeit von etwa 0,2 mm im Orthophoto.

Die Genauigkeit bei der Entzerrung konvexer Kugelflächen ist dagegen erheblich schlechter. Nur etwa 60 % des Orthophotos weisen Verfahrensfehler von $e_r < 0,5$ mm auf. Eine Abschätzung der Gesamtgenauigkeit ist hier nicht sinnvoll, weil die Verfahrensfehler im Bereich der Umrißlinie, die im Beispiel bei $r = 7,3$ m liegt, gegen ∞ gehen. Wie Abb. 6/27 zeigt, bewirkt auch die Optische Interpolation in den Randbereichen der konvexen Kugelfläche keine entscheidende Reduzierung der Verfahrensfehler.

Nach Gleichung (6.11) ist der Verfahrensfehler in 1. Näherung reziprok proportional zur Aufnahmeentfernung z . Anders ausgedrückt wird bei größerer Aufnahmeentfernung und Beibehaltung der Streifenbreite der differentiellen Entzerrung durch die Verkleinerung des projizierenden Winkels eine höhere Genauigkeit im Orthophoto erreicht. Das aus größerer (in Abb. 6/26 doppelter) Entfernung aufgenommene Objektabbild muß jedoch bei der Orthoprojektion entsprechend verkleinert werden, damit die Projektionsweite innerhalb des z -Bereichs des Orthoprojektors zu liegen kommt. Weil dadurch auch der Orthophotomaßstab verkleinert wird, entfällt der infolge Verengung des projizierenden Winkels gewonnene Genauigkeitsvorteil (Version C). Dafür ergibt sich aber eine Zeitersparnis bei der Orthoprojektion. Wird jedoch auch die Streifenbreite der Entzerrung entsprechend verkleinert, so tritt (ohne Zeitersparnis) eine Genauigkeitssteigerung ein (Version D). Der Filmverbrauch geht bei doppelter Aufnahmeentfernung auf ein Viertel zurück.

Ein größerer Aufnahmeabstand ist also in jedem Fall empfehlenswert, jedoch sollte dann eine langbrennweitige Kammer verwendet werden, um den geplanten Bildmaßstab und die damit verbundene Bildqualität und Auflösung beizubehalten.

6.1.2.3 Kugel als Objektfläche

Als Beispiel für doppelt gekrümmte Objektflächen wird hier die Standardfläche Kugel behandelt. Kugelförmige oder kugelartige Flächen kommen in der Architektur vorwiegend als Kuppeln von Kirchen vor. Bei Innenaufnahmen liegt die Fläche "konkav", bei Außenaufnahmen "konvex" zum Aufnahmeort.

Die gewählte Standardfläche besitze (ebenso wie der Zylinder) einen Radius von $R = 8$ m, die Aufnahmeentfernung zum Nadirpunkt betrage wiederum $z_0 = -12$ m. Auf eine Unterscheidung mehrerer Aufnahmefälle wird hier verzichtet.

Für die Kugel gelten ähnliche Zusammenhänge wie beim Kreis- zylinder. Zur Ableitung der geometrischen Beziehungen kann Abb. 6/19 verwendet werden. Der Abstand vom Kugelmittelpunkt zum Projektionszentrum wird hier mit a , zur Ebene ($z = \text{konstant}$) durch den Profilbezugspunkt P_0 mit s bezeichnet. Mit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ als Radialabstand von P_0 zur Aufnahmeachse ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 s &= \pm \sqrt{R^2 - r^2} && \begin{cases} + \text{ für Kugel, konkav} \\ - \text{ für Kugel, konvex} \end{cases} \\
 \tan \beta_x &= \frac{x}{s} \\
 \tan \beta_y &= \frac{y}{s} \\
 z &= - (a + s)
 \end{aligned}
 \tag{6,16}$$

6.1.2.4 Kegel als Objektfläche

Als Standardfläche für kegelförmige Dächer soll ein senkrechter Kreiskegel untersucht werden. Da konkave Kegelflächen in der Architektur nur selten (evtl. als Figurennischen) vorkommen, ist die Untersuchung auf konvexe Flächen beschränkt.

Bei der differentiellen Umbildung von Kegelflächen entstehen unterschiedliche Verfahrensfehler, je nachdem, ob die Fläche in x- oder y-Richtung abgetastet wird. Beide Fälle sollen hier betrachtet werden. Die bei der Berechnung der Verfahrensfehler verwendeten Größen sind in Abb. 6/28 angegeben.

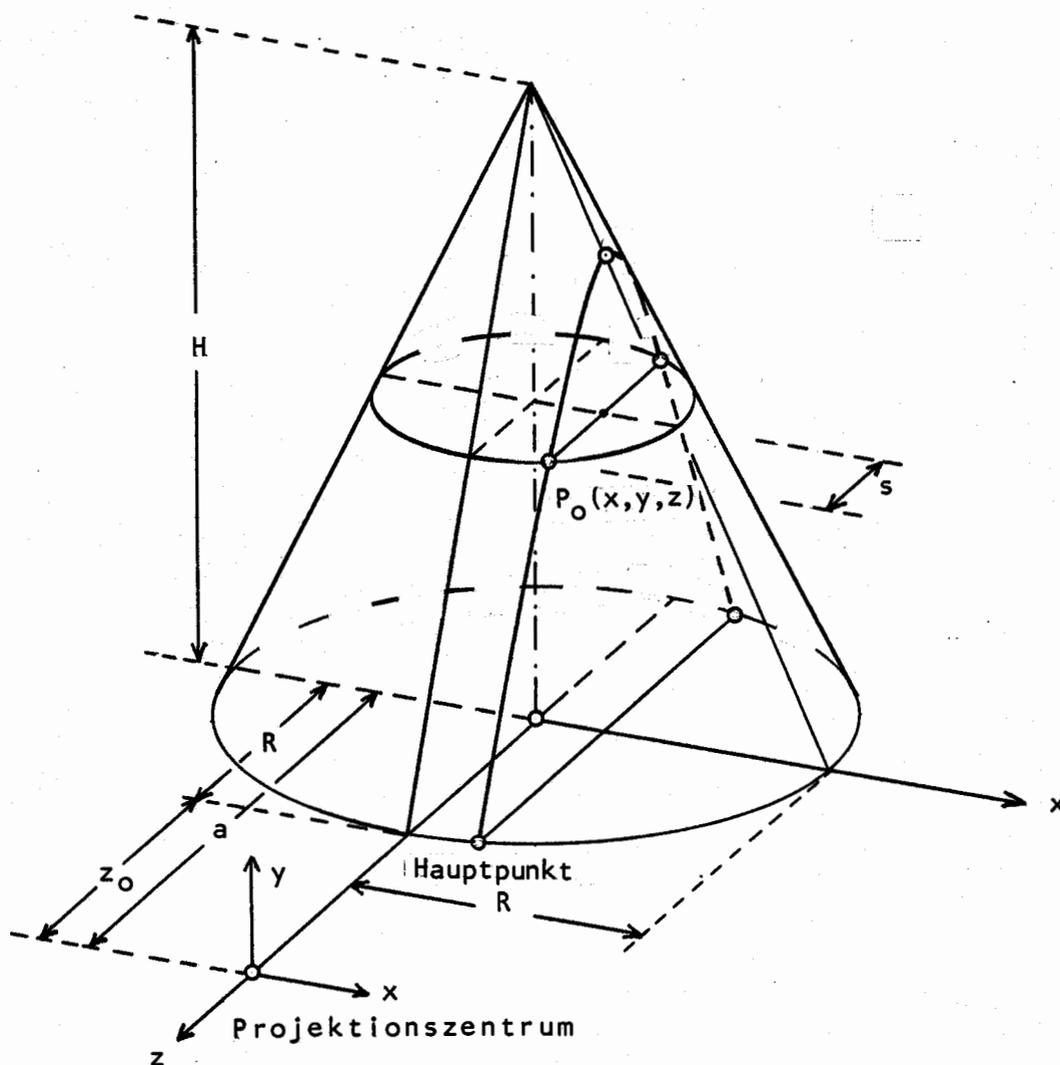


Abb. 6/28 Schematische Darstellung der Orthoprojektion eines senkrechten Kreiskegels, Verlauf der Profilstreifen in x- bzw. y-Richtung

- $P_0(x, y, z)$ Profilbezugspunkt
 R Radius des Kegels in Aufnahmehöhe
 H Höhe der Kegelspitze über dem Projektionszentrum
 z_0 Abstand Hauptpunkt - Projektionszentrum
 a Abstand Kegellachse - Projektionszentrum
 s Hilfsgröße

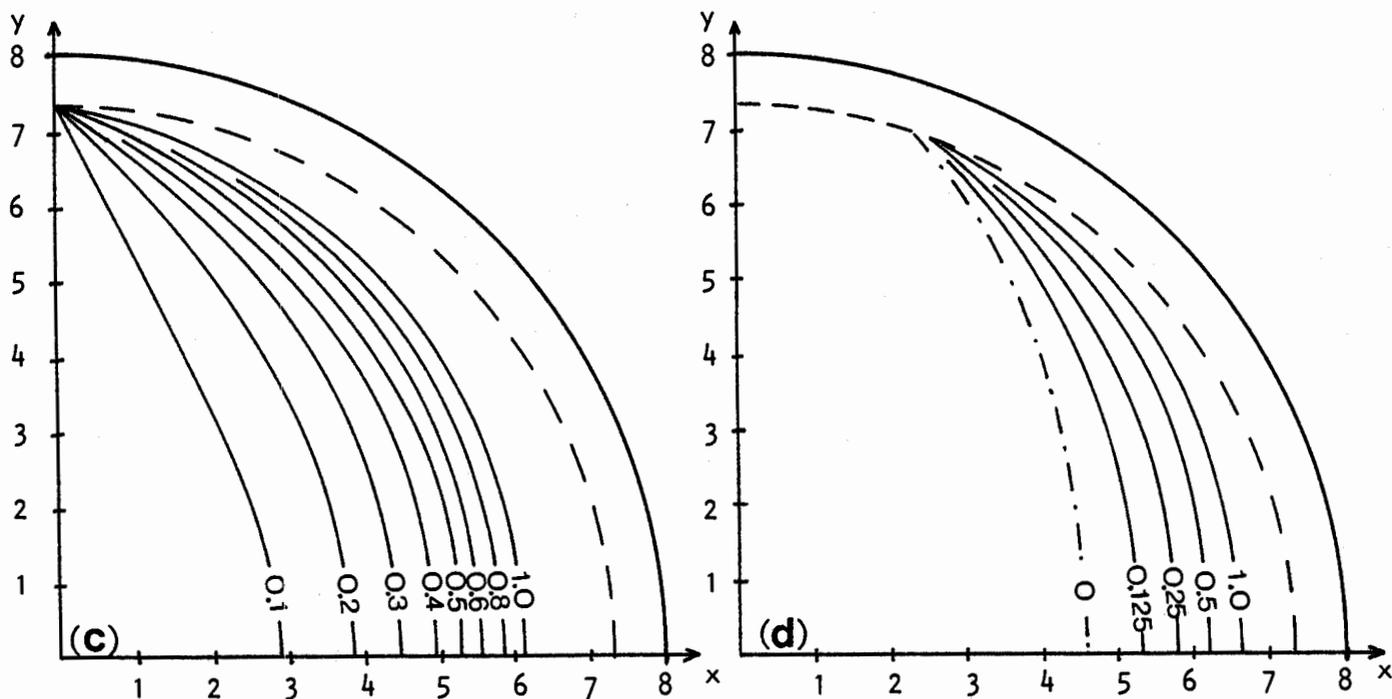
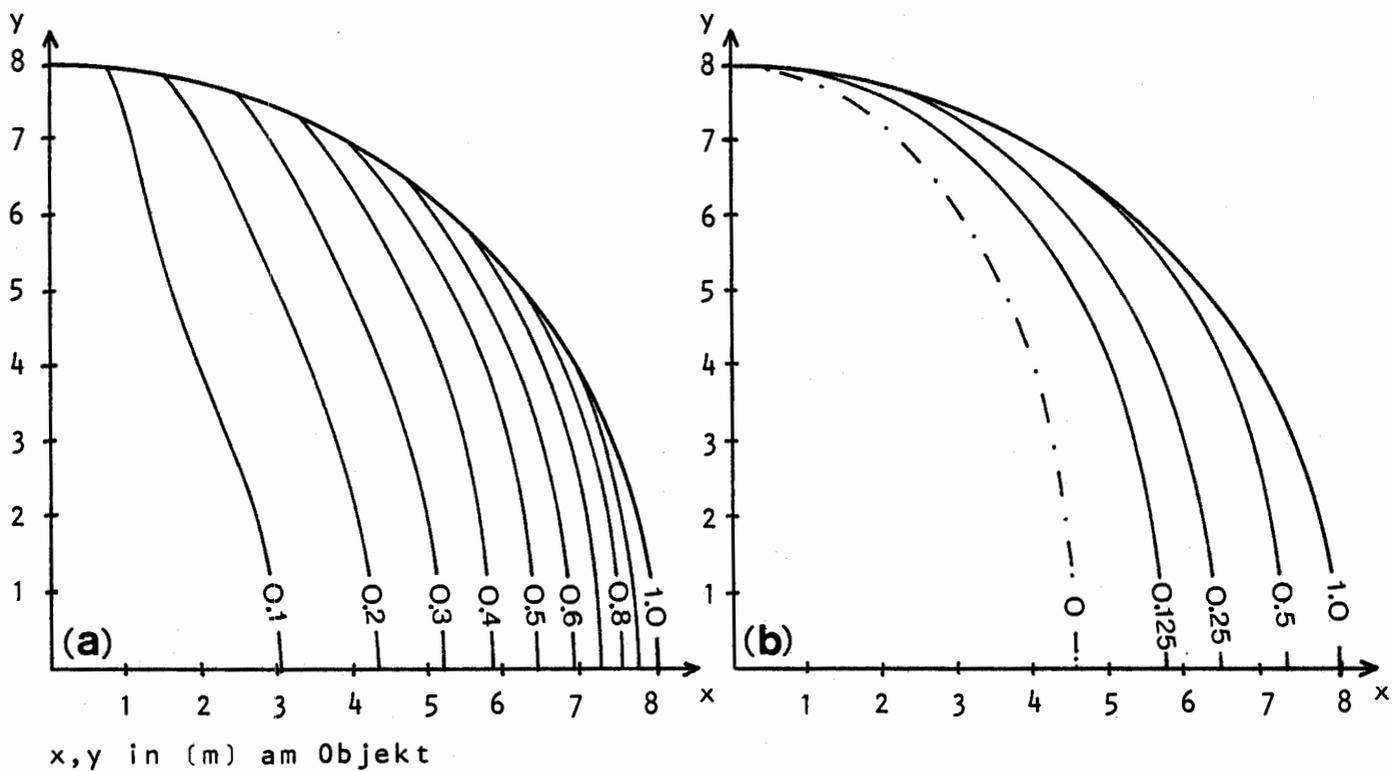


Abb. 6/27 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei $\Delta x = 2$ mm. Standardfläche: Kugel, zentrische Aufnahme
 (a), (b) konkave Krümmung, (c), (d) konvexe Krümmung
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Umrisslinie - · - · - · Linie für $e_r = 0$

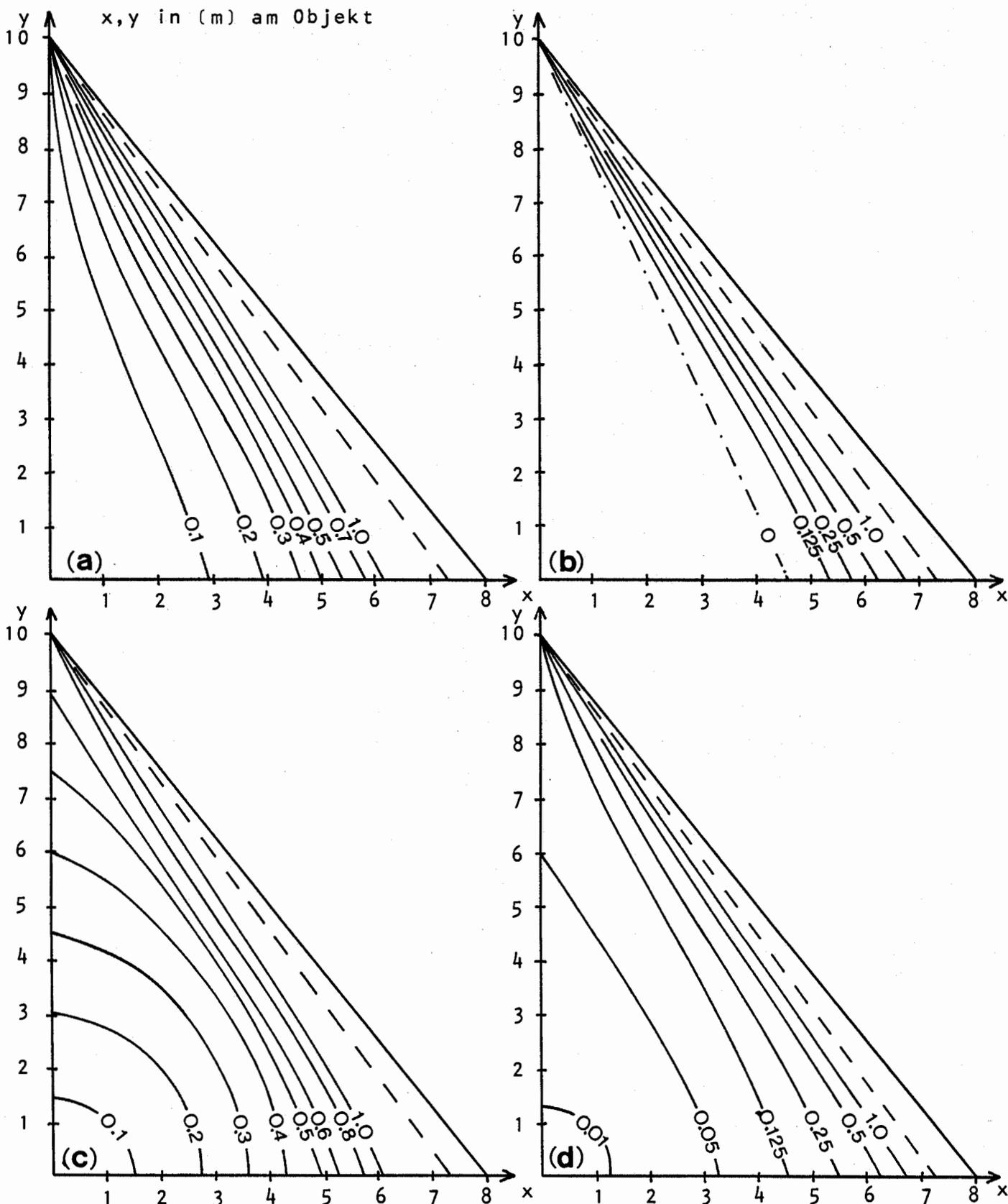


Abb. 6/29 Maximale radiale Verfahrensfehler e_r (mm) am jeweiligen Streifenrand im Orthophoto bei Δx bzw. $\Delta y = 2$ mm. Standardfläche: Kegel, konvexe Krümmung
 (a),(b) Abtastung in y-Richtung, (c),(d) Abtastung in x-Richtung
 (a),(c) Entzerrung 0. Ordnung, (b),(d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - Umrißlinie - · - · - Linie für $e_r = 0$

Auch aus Abb. 6/29 kann ersehen werden, daß eine Abtastung in y-Richtung, also parallel zur Kegelachse, die besseren Ergebnisse liefert. Bei der Version "parallel y" werden ca. 70 % der Ansichtsfläche mit einem Verfahrensfehler von $e_r < 0,5$ mm wiedergegeben, bei der Abtastung "parallel x" dagegen nur ca. 55 %. Die großen Verfahrensfehler, die hier in den Randzonen auftreten, machen das photographische Ergebnis der Entzerrung nahezu wertlos. Die zur Demonstration der Bildwanderung in den Abbildungen 6/41 und 6/42 in Abschnitt 6.2.3 gegebenen Beispiele zeigen ebenfalls die Problematik der differentiellen Entzerrung bei derartig stark gekrümmten bzw. geneigten Objekten.

6.1.3 Untersuchung der maximalen Streifenbreite bei einem vorgegebenen zulässigen Verfahrensfehler

Die Fehler- und Genauigkeitsangaben aus Abschnitt 6.1.2 bezogen sich auf eine angenommene Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm. In direkter Umkehrung sollen nun bei einer vorgegebenen Fehler-toleranz die zulässigen "maximalen Streifenbreiten" ermittelt werden.

Unter der Annahme einer mittleren verfahrensbedingten Genauigkeit von etwa 0,1 - 0,2 mm im Orthophoto kann nach Gleichung (6,8) am äußersten Streifenrand ein maximaler radialer Verfahrensfehler e_r (max) von etwa 0,3 bis 0,6 mm auftreten. Dieser Zusammenhang gilt aber nur für ein lineares Anwachsen des Verfahrensfehlers mit der Entfernung zum Nadirpunkt, d.h. für die differentielle Entzerrung einer geneigten Ebene (Abschnitt 6.1.2.1). In grober Näherung wird diese Annahme jedoch auch für andere Flächen gültig sein. Als Toleranz für den maximalen radialen Verfahrensfehler am äußersten Streifenrand des Orthophotos wird daher (auch in Übereinstimmung mit HOBBLIE (55, S. 140/)) ein Betrag von e_r (max) = 0,5 mm angenommen.

Die zur Einhaltung dieser Fehlerschranke erforderlichen maximalen Streifenbreiten der differentiellen Entzerrung können für die in Abschnitt 6.1.2 eingeführten Standardflächen "Ebene, Zylinder, Kugel und Kegel" mit Hilfe der Abbildungen 6/16, 6/20 - 23, 6/27 und 6/29 ermittelt werden. Die Definition der Objektflächen und Aufnahmevarianten entspricht den Angaben aus Tab. 6/13 und Abb. 6/14.

Entsprechend der weitgehenden Normierung der für die einzelnen Orthophotogeräte erhältlichen Spaltblenden sollen hier Streifenbreiten von

$$\Delta x = 0,5 / 1,0 / 2,0 / 4,0 / 8,0 \text{ mm}$$

verwendet werden. In den Abbildungen 6/30 bis 6/33 sind diejenigen Streifenbreiten angegeben, mit denen eine differentielle Entzerrung der bezeichneten Objektbereiche unter Einhaltung einer Fehlertoleranz von $e_r = 0,5$ mm möglich ist. Dabei wird zwischen Entzerrung 0. Ordnung und 1. Ordnung (Optische Interpolation) unterschieden. In den Diagrammen ist (entsprechend Abb. 6/14) jeweils nur ein Objektquadrant dargestellt.

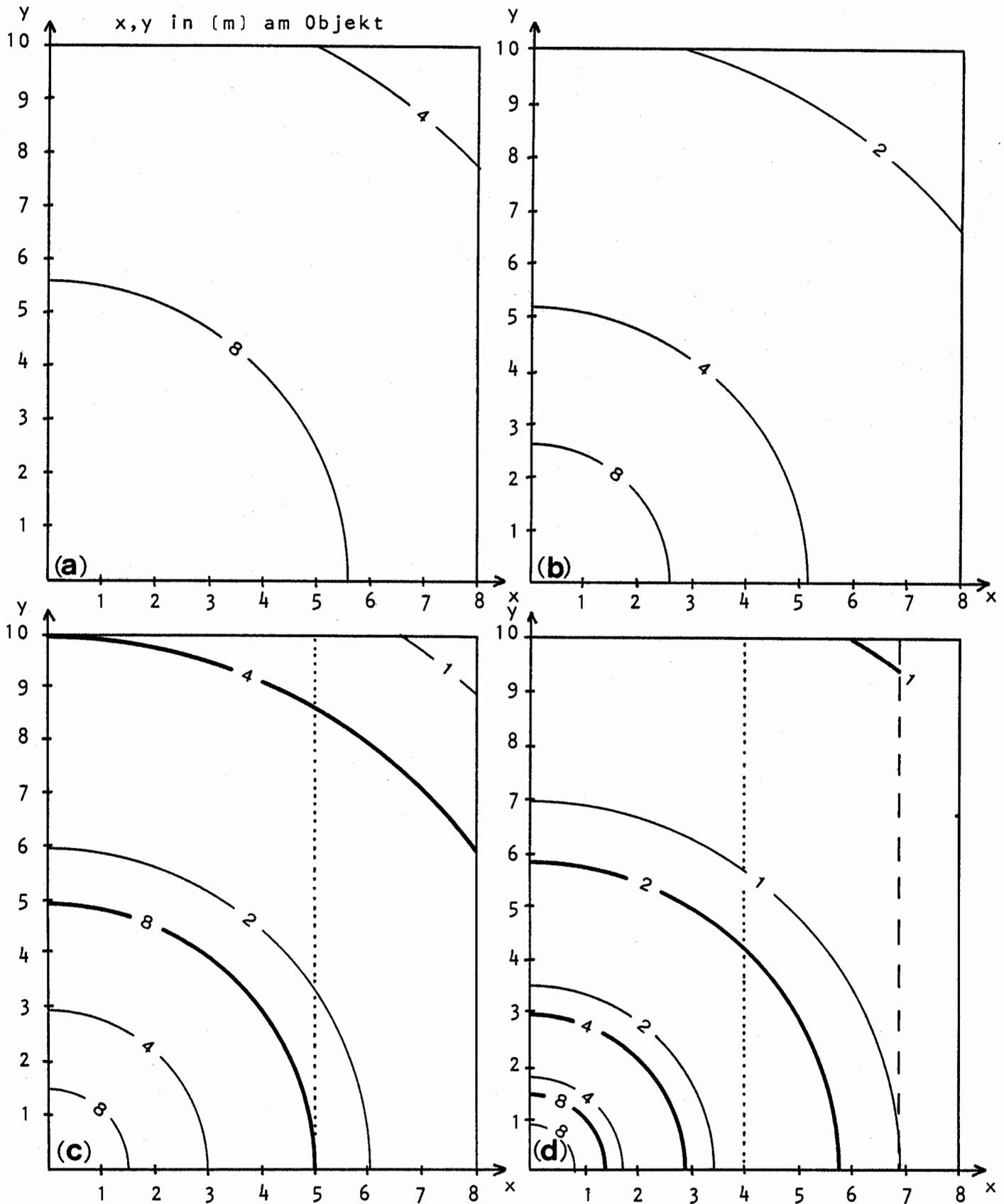


Abb. 6/30 Zulässige Streifenbreite Δx (mm) bei Einhaltung einer Fehlerschranke von $e_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Geneigte Ebene

(a) $\beta_x = 15^\circ$, (b) $\beta_x = 30^\circ$, (c) $\beta_x = 45^\circ$, (d) $\beta_x = 60^\circ$

..... Begrenzung des Bildbereichs bei WW-Aufnahmen

----- theoretische Begrenzung des Bildbereichs bei Öffnungswinkel 180°

———— Entzerrung 0. Ordnung ———— Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)

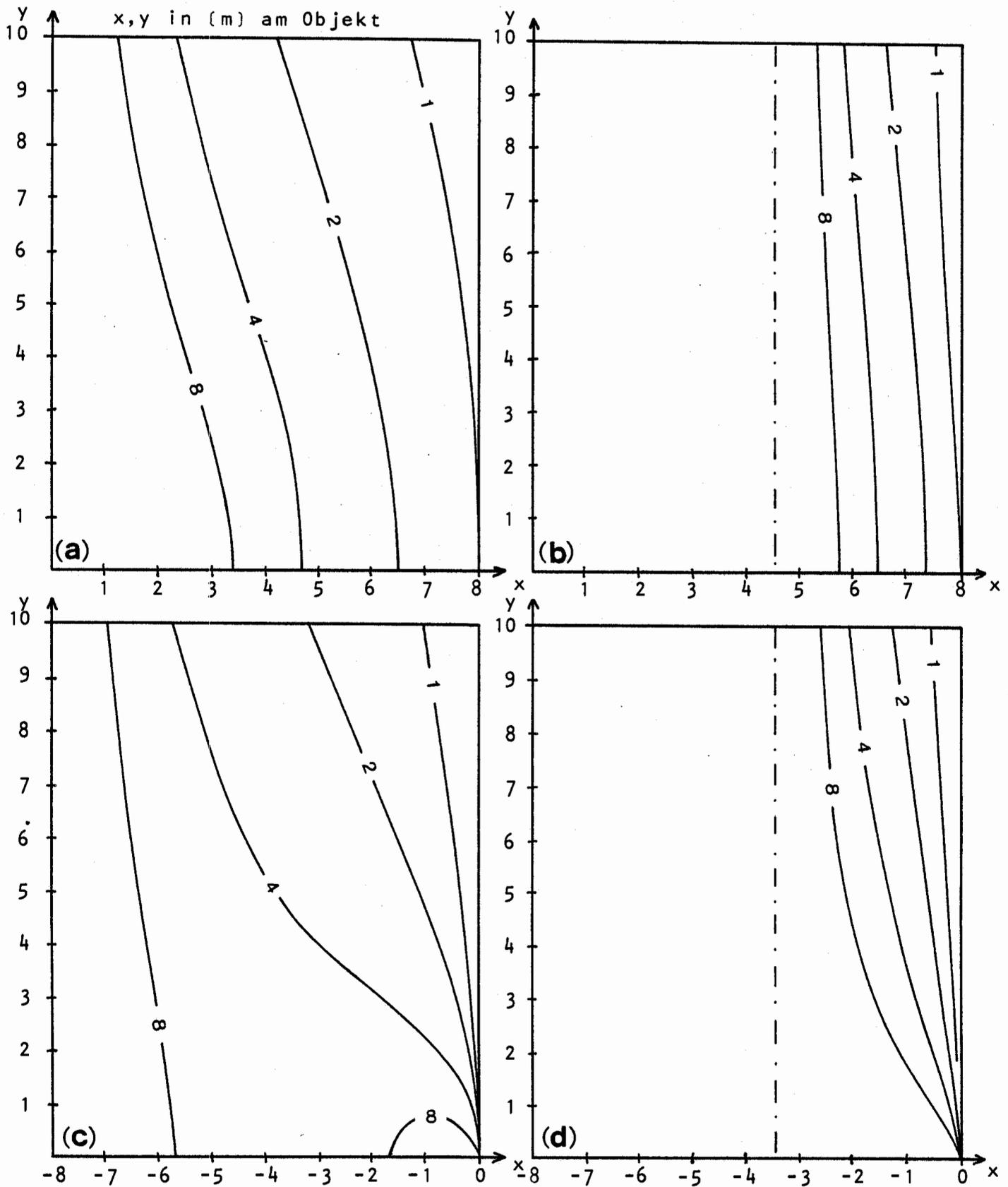
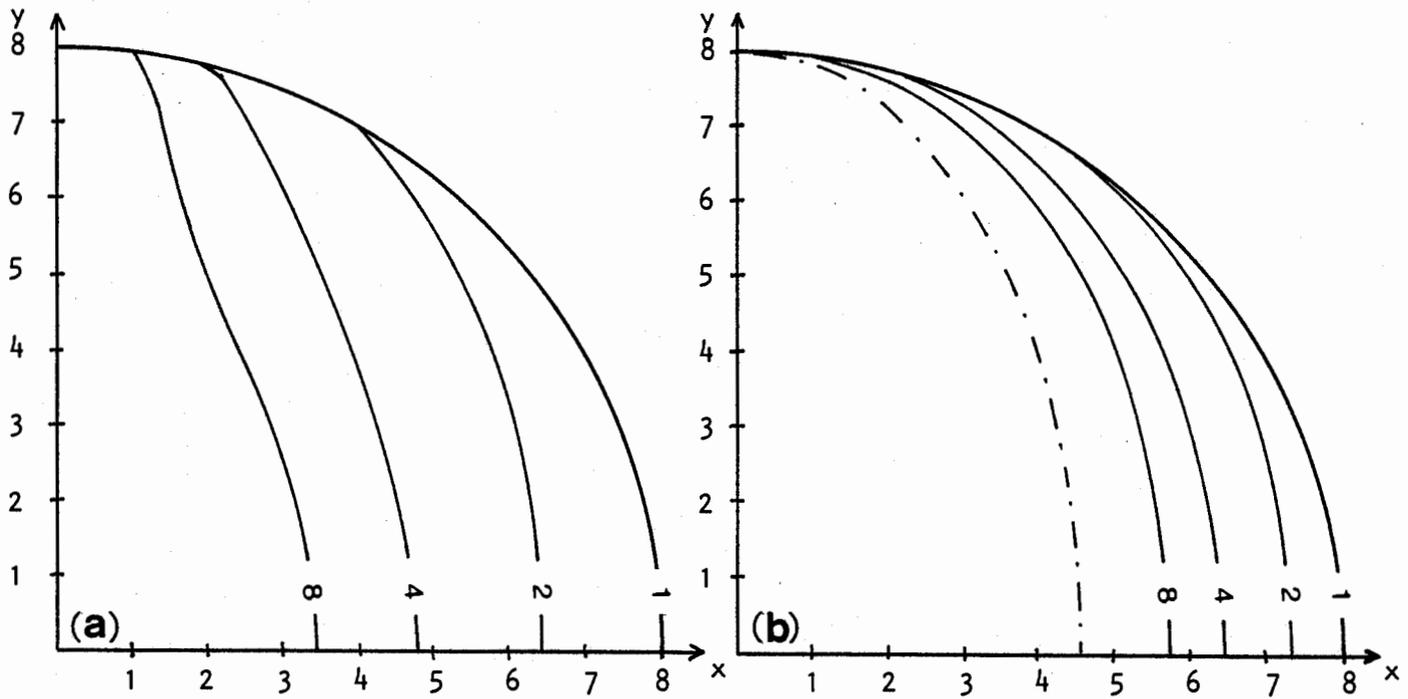


Abb. 6/31 Zulässige Streifenbreite Δx (mm) bei Einhaltung einer Fehlerschranke von $e_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Zylinder
 (a), (b) konkave Krümmung, zentrische Aufnahme
 (c), (d) konvexe Krümmung, tangentielle Aufnahme
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)



x, y in (m) am Objekt

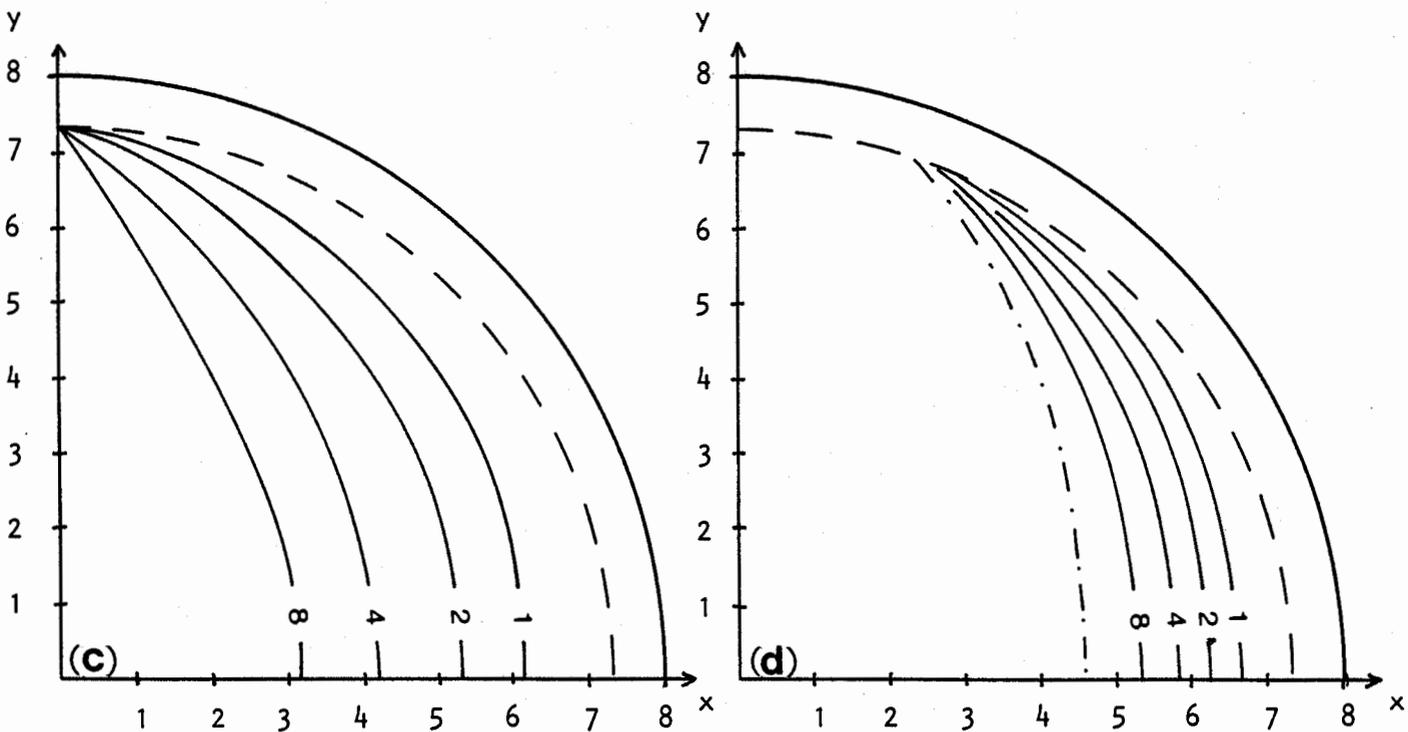


Abb. 6/32 Zulässige Streifenbreite Δx (mm) bei Einhaltung einer Fehlerschranke von $e_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Kugel, zentrische Aufnahme
 (a), (b) konkave Krümmung, (c), (d) konvexe Krümmung
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - Umrisslinie

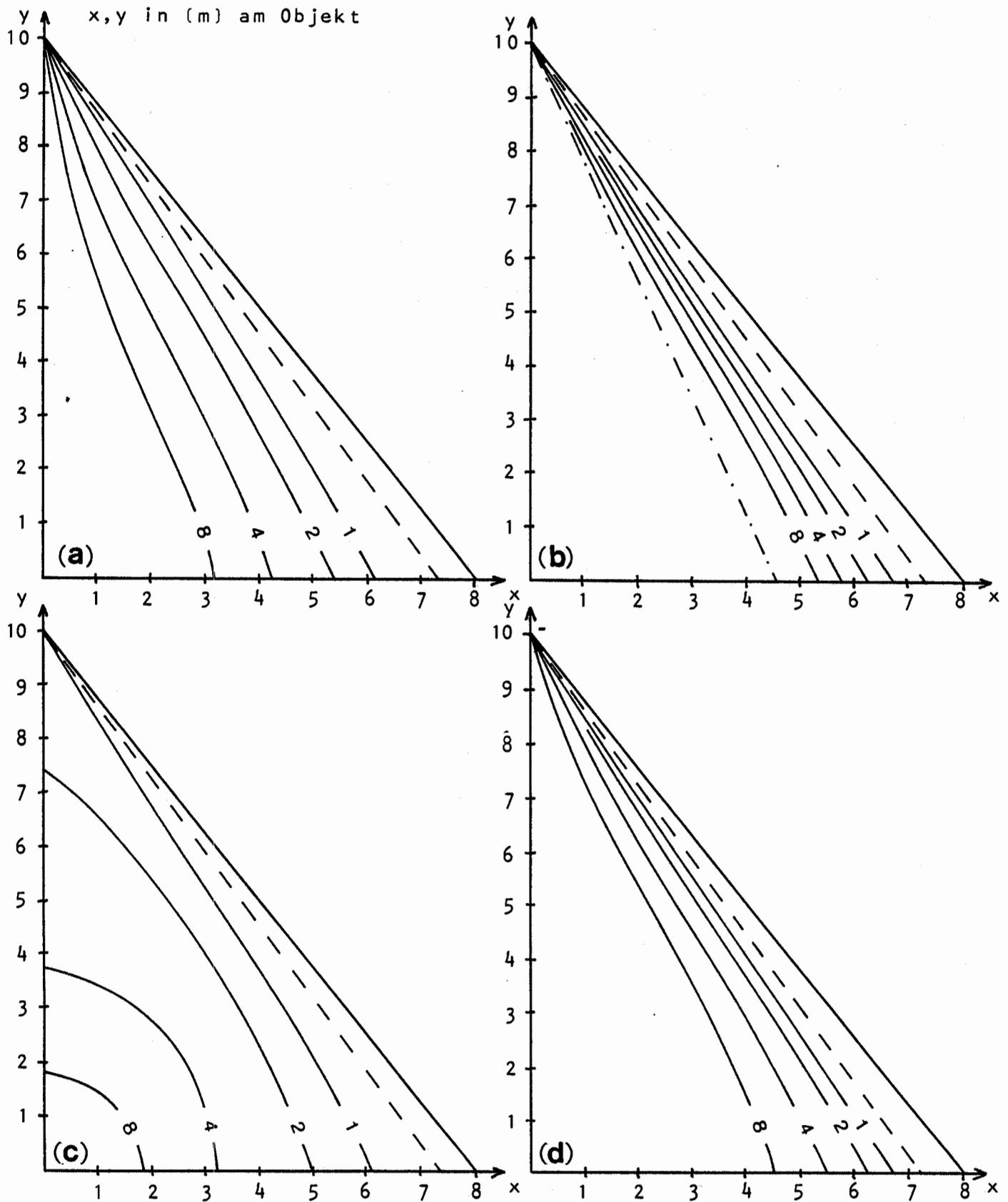


Abb. 6/33 Zulässige Streifenbreite Δx (mm) bei Einhaltung einer Fehlerschranke von $e_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Kegel, konvexe Krümmung

- (a), (b) Abtastung in y-Richtung, (c), (d) Abtastung in x-Richtung
 (a), (c) Entzerrung 0. Ordnung, (b), (d) Entzerrung 1. Ordnung (Opt.Int.)
 - - - - - Umrißlinie

Soll sich jeweils der gesamte (in den Diagrammen angegebene) Objektausschnitt bei der differentiellen Entzerrung innerhalb der vereinbarten Fehlerschranke von $e_r = 0,5$ mm befinden, so gelten für die einzelnen Objekt- und Aufnahmeversionen die in Tab. 6/34 zusammengestellten maximalen Streifenbreiten.

Standardfläche	Aufnahmeanordnung	Streifenbreite $\Delta x, (\Delta y)$ (mm)	
		0.Ordnung	Opt.Interpolation
Ebene	Neigung $\beta_x = 15^\circ$	4	> 8
	$\beta_x = 30^\circ$	2	> 8
	$\beta_x = 45^\circ$	1	4
	$\beta_x = 60^\circ$	0,5	1
Zylinder	konkav, zentrisch	0,5	1
	konvex, tangential	0,5	1
Kugel	konkav, zentrisch	1	< 2
	konvex, zentrisch	< 0,5	< 0,5
Kegel	konvex, zentrisch Abtastung parallel y	< 0,5	< 1
	konvex, zentrisch Abtastung parallel x	< 0,5	< 1

Tab. 6/34 Maximale Streifenbreiten Δx (mm) bei einem zulässigen Verfahrensfehler von $e_r = 0,5$ mm im gesamten Orthophoto (Definition nach Abb. 6/14); Standardflächen "Ebene, Zylinder, Kugel und Kegel".

Aus Tab. 6/34 ist ersichtlich, daß für die differentielle Entzerrung der ausgewählten Standardflächen unter Vorgabe einer Fehlertoleranz von $e_r = 0,5$ mm im Orthophoto Streifenbreiten der Größenordnung 0,5 - 2,0 mm erforderlich sind.

Wie bereits in Abschnitt 6.1.2 angedeutet wurde, beziehen sich die Beispiele auf zum Teil besonders ungünstige Aufnahmeanordnungen. Vielfach treten gerade an den Bildrändern starke Objektflächenneigungen auf (z.B. Abb. 6/18a, d). Die praktischen Arbeiten (Abschnitt 8) haben aber gezeigt, daß diese für die Orthoprojektion ungünstigen Aufnahmekonstellationen infolge der örtlichen Verhältnisse nicht immer vermieden werden können. Insofern erscheinen die Zahlenwerte für die maximale Streifenbreite aus Tab. 6/34 als realistisch.

Bereits in Abschnitt 6.1.1.4 wurde aufgrund optischer Vergleiche (Abb. 6/10 bis 6/12) die Forderung nach Streifenbreiten von $\Delta x \leq 2$ mm ausgesprochen. Dieses rein empirische Ergebnis steht im Einklang mit den aus der Untersuchung an Standardflächen gewonnenen Werten.

Vergleicht man Architekturaufnahmen bezüglich der relativen Höhenunterschiede (in Aufnahme­richtung) und Flächen­neigungen mit topographischen Luftbildaufnahmen, so erscheint die Bezeichnung "Hochgebirge" als angebracht. Nach HOBBIÉ /55, S.157/ und NEUBAUER /104, S.66/105/ erfordert die differentielle Entzerrung von Hochgebirgsaufnahmen bei einem angenommenen mittleren verfahrensbedingten Lagefehler von ca. 0,2 mm (was etwa der Maximaltoleranz von 0,5 mm entspricht) Streifenbreiten von

$$\Delta x = 1 - 2 \text{ mm für Entzerrung 0. Ordnung und}$$

$$\Delta x_{\text{opt}} = 2 - 4 \text{ mm für Optische Interpolation.}$$

Diese Übereinstimmung von theoretischen und empirischen Ergebnissen sowohl bei Architekturanwendungen als auch im topographischen Bereich (für Hochgebirgsaufnahmen) gestattet eine Festlegung der maximalen Streifenbreite auf etwa 1 - 2 mm für die differentielle Umbildung architektonischer Aufnahmen.

6.1.4 Folgerungen für die Wahl von Streifenbreite und Profilabstand

Die theoretischen Abschätzungen an Hand von ausgewählten Standardflächen (Abschnitte 6.1.2 und 6.1.3) sowie die praktischen Versuche (Abschnitt 6.1.1.4) haben gezeigt, daß im Hinblick auf die Orthophotogenauigkeit und auf eine homogene Bildaussage für die differentielle Entzerrung architektonischer Aufnahmen Streifenbreiten von etwa 1 - 2 mm erforderlich sind.

Da die Streifenbreite aber die Auswertzeit unmittelbar beeinflußt, muß bei der Wahl kleiner Spaltblenden mit entsprechend hohen Profilabtast- und Belichtungszeiten gerechnet werden. Zum Beispiel ergibt sich bei einer Orthophotofläche von 40 x 40 cm², einer festen Abtastgeschwindigkeit von $v = 2,5 \text{ mm/sec}$ und einer Streifenbreite von $\Delta x = 2 \text{ mm}$ eine Auswertzeit (ohne Vorbereitungen) von etwa 9 Stunden. Bei einer Streifenbreite von $\Delta x = 1 \text{ mm}$ erhöht sich diese Zeit auf etwa 18 Stunden.

Abgesehen von dem hohen Aufwand an Geräte- und Auswertzeit stellt die ohnehin schon monotone Tätigkeit des Profilabtastens für den photogrammetrischen Operateur eine starke physische Belastung dar. Derartig lange Auswertzeiten sollten also in jedem Fall vermieden werden.

Es ist daher nicht ratsam, als erste und vielleicht einzige Maßnahme zur Reduzierung der Verfahrensfehler die Streifenbreite der differentiellen Entzerrung herabzusetzen. Vielmehr sollten bereits bei der Aufnahme, auf jeden Fall aber bei der Wahl des Orthophotomaßstabes und des Entzerrungsgrades Vorkehrungen zur weitgehenden Vermeidung von Verfahrensfehlern beim Orthoprojektionsprozeß getroffen werden.

6.1.4.1 Maßnahmen zur Reduzierung der Verfahrensfehler

Wie bereits in den Abschnitten 4.1.2, 4.2.4 und 6.1.2.2 erwähnt wurde, ist eine Verringerung der Verfahrensfehler durch eine geeignete Aufnahmeanordnung in beschränktem Umfang möglich. Dazu gehören die Wahl einer langbrennweitigen Meßkammer und eine damit verbundene große Aufnahmeentfernung. Die Kameraaufstellung gegenüber dem Objekt sollte bei der Aufnahme konkav gekrümmter Flächen etwa zentrisch, bei konvexen Flächen dagegen seitlich versetzt sein (Abb. 6/25).

Im Rahmen der Auswertung kann der Verfahrensfehler bei (z.B. durch vorhandene Spaltblenden) vorgegebener Streifenbreite durch die Wahl eines großen Orthophotomaßstabes reduziert werden. Diese Maßnahme ist identisch mit der Verkleinerung der Streifenbreite ohne Maßstabsvergrößerung. Bei Verwendung sehr kleiner Spaltblenden (2/3 mm - 2 mm) werden jedoch hohe Anforderungen an die Justierung (Größe, Horizontierung) der Blenden gestellt. Bei ungenügender Justierung entstehen an den Streifenrändern helle oder dunkle Linien, die bei einem kleinen Orthophotomaßstab im Verhältnis zum dargestellten Objekt stärker in Erscheinung treten. Daher ist (abgesehen vom Filmverbrauch) einem großen Orthophotomaßstab der Vorzug zu geben. Der maximale Maßstab wird erreicht, indem die am weitesten entfernten Objektteile mit der größten am Orthoprojektor einstellbaren Projektionsweite entzerrt werden.

Wie die Bildbeispiele (Abbildungen 6/10 bis 6/12) aus Abschnitt 6.1.1.4 sowie die Diagramme zum Verfahrensfehler bei Standardflächen (Abschnitte 6.1.2 und 6.1.3) gezeigt haben, hat die Ordnung der differentiellen Entzerrung einen entscheidenden Einfluß auf die Bildhomogenität und Genauigkeit des Orthophotos.

Differentielle Entzerrung 0. Ordnung

Die meisten Orthoprojektoren arbeiten mit Entzerrung 0. Ordnung, d.h. die Projektionsfläche ist eine (meist horizontale) Ebene parallel zur Orthophoto-Bezugsebene (Abb. 3/2a). Bekannte Geräte dieser Art sind:

- Galileo Orthophoto-Simplex
- Jenoptik Topocart - Orthophot B
- Wild A8 - PPO 8
- Zeiss Ortho-3-Projektor
- Zeiss C8/D2 - GZ1 (on-line)

Eine Reduktion der Verfahrensfehler ist bei Entzerrung 0. Ordnung ausschließlich durch Verkleinern der Streifenbreite möglich.

Differentielle Entzerrung 1. Ordnung

Die differentielle Entzerrung 1. Ordnung (Abb. 3/2 b,c) ist nur bei wenigen Gerätesystemen verwirklicht. Voraussetzung für die Berücksichtigung der Objektneigung quer zur Streifenrichtung ist die (analoge oder digitale) Speicherung der jeweiligen Profildaten, d.h. eine zeitliche Trennung von Modellabtastung und Orthoprojektion durch off-line-Betrieb.

Das einzige Gerät mit optischer Projektion (Abb. 3/3a) und der Möglichkeit zur Entzerrung 1. Ordnung (Abb. 3/2c) ist der Orthoprojektor Zeiss GZ1 (off-line) mit "Optischer Interpolation". Diese Zusatzeinrichtung wurde bereits in Abschnitt 3.2.3 (Abb. 3/8) ausführlich beschrieben. An dieser Stelle sind ergänzend einige anwendungsbezogene Bemerkungen angebracht.

Bei Verwendung der Optischen Interpolation werden Objektflächen bis zu einer Neigung von $\pm 35^\circ$ theoretisch fehlerfrei abgebildet. Bis etwa $\pm 55^\circ$ kann unter gleichen Genauigkeitsanforderungen bei Optischer Interpolation mit doppelter Streifenbreite gearbeitet werden. Durch die aus technischen Gründen notwendige Neigungsbeschränkung auf $\pm 35^\circ$ (HOBBIE /55, S.110/) verringert sich der Vorteil des Korrekturzusatzes bei größeren Flächenneigungen.

Der Gebrauch des Faseroptikrings ist nicht unproblematisch. Durch die Lichtabsorption in den Faseroptikteilen des Projektionskopfes entstehen Helligkeitsverluste bei der Belichtung des Filmmaterials. Dieser Mangel kann durch eine 2-3fach höhere Einstellung der Lampenhelligkeit ausgeglichen werden. Wird zur Reduzierung der Bewegungsunschärfen (Abschnitt 6.2) eine Verkleinerung der Blendenbreite (und damit verbunden eine zusätzliche Helligkeitssteigerung) notwendig, so können Engpässe in der Lichtversorgung entstehen.

Durch die ständig wechselnde Neigung der Projektionsfläche ändert sich die pro Flächeneinheit auffallende Lichtmenge, was zu unterschiedlichen Helligkeiten in benachbarten Mäanderstreifen führen kann. Sind jedoch die Objektflächen strukturiert oder mit Verzerrungen bedeckt, so treten diese Hell-Dunkel-Streifen weniger in Erscheinung.

Nach Angabe des Herstellers (ZEISS /142, S. 121/) beträgt die Auflösung der Faseroptik bei einem Faserdurchmesser von $6 \mu\text{m}$ etwa 70 - 80 Linien/mm, weswegen keine Beeinträchtigung der Bildqualität entsteht. Die mit Optischer Interpolation erzeugten Orthophotos erscheinen kontrastärmer, was auf den 15 mm langen Lichtweg durch die vertikalen Glasfasern zurückzuführen ist. Dieser Effekt der "weichen Kontraste" wird bei der reprographischen Weiterverarbeitung des Orthophotos in der Regel begrüßt.

Der digital gesteuerte off-line-Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 (STEWARTSON /130/) arbeitet nach dem Prinzip der "Optischen Bildübertragung" (Abb. 3/3b). Die Berücksichtigung der Objektneigung quer zur Streifenrichtung (Entzerrung 1. Ordnung, Abb. 3/2 c) erfolgt hier durch Maßstabsänderung (Zoom-Optik) und Drehung (Dove-Prisma) des jeweiligen Bildausschnittes, wobei die Information über die Größe dieser Korrekturen aus den vom Magnetband her eingelesenen Bildkoordinaten abgeleitet wird. Die Querneigungs-

korrektur unterliegt bei diesem System (gegenüber der Optischen Interpolation bis $\pm 35^\circ$) keinen festen Neigungsbeschränkungen. Die Grenzwerte sind hier durch die Wirkungsbereiche von Zoom-Optik und Dove-Prisma bestimmt. Konkrete Angaben können wegen der Abhängigkeit dieser Beschränkungen vom projizierenden Winkel und von der Objektneigung nicht gemacht werden (STEWARDSON /130/). Im Zentralbereich eines Bildes erscheinen jedoch Objektneigungen bis etwa 70° korrigierbar.

Die differentielle Entzerrung 1. Ordnung leistet einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung oder sogar Elimination der Verfahrensfehler. Geräte mit dieser Korrekturmöglichkeit sind also gerade für architekturphotogrammetrische Umbildungen (mit starken Objektneigungen) besonders prädestiniert. Es ist zu erwarten, daß in absehbarer Zukunft durch die Fortschritte in der digitalen Speichertechnik weitere off-line-Gerätesysteme mit Entzerrung 1. Ordnung zur Verfügung stehen werden.

6.1.4.2 Möglichkeiten zur Verringerung der Auswertezeit bei Verwendung kleiner Spaltblenden

Sind trotz entsprechender Vorkehrungen (Aufnahmeordnung, Orthophotomaßstab, Entzerrungsgrad) noch Verfahrensfehler im Orthophoto zu erwarten, die über eine geforderte Toleranz (z.B. 0,5 mm) hinausgehen, so ist eine weitere Verbesserung ausschließlich durch Reduktion der Streifenbreite möglich. Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, wächst dabei die Auswertezeit (Abtastzeit + Projektionszeit) etwa umgekehrt proportional zur Streifenbreite an. Im folgenden sollen nun zwei Maßnahmen zur Verringerung der Auswertezeit bei Verwendung kleiner Spaltblenden beschrieben werden.

a) Interpolation von Zwischenprofilen

Die Speicherung der Abtastprofile eröffnet gegenüber dem on-line-Betrieb die Möglichkeit, für die Orthoprojektion zusätzliche Zwischenprofile einzuschalten (Abb. 3/7). Die Belichtung des Orthophotos kann so ohne Beeinträchtigung der Profilabtastzeit mit kleinen Spaltblenden erfolgen. In diesem Fall muß zwischen der Streifenbreite Δx im Orthophoto und dem Profilabstand Δp im photogrammetrischen Modell unterschieden werden. Die Streifenbreite errechnet sich aus dem Profilabstand nach

$$\Delta x = \Delta p \cdot \frac{m_M}{m_K} \cdot INT, \quad (6,21)$$

wobei m_M die Modellmaßstabszahl, m_K die Orthophotomaßstabszahl und INT den Interpolationsgrad (z.B. 1/2, 1/3) darstellen.

Bei Verwendung digital gesteuerter Orthoprojektoren (z.B. Wild Avioplan OR 1) sind prinzipiell eine lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Profilstreifen oder eine Interpolation höherer Ordnung (eventuell über ein digitales Geländemodell, KRAUS /75/) möglich, da die Einschaltung der Zwischenprofile auf rechnerischem Weg erfolgt. Ist der Orthoprojektor für Entzerrung 1. Ordnung (Abb. 3/2c) eingerichtet, so ist eine Herabsetzung der Streifenbreite durch Interpolation von Zwischenprofilen nur bei extrem stark geneigten Objektflächen sowie bei Neigungsbeschränkung der Projektionsfläche notwendig.

Beim Orthoprojektor Zeiss GZ1 im off-line-Betrieb sind die Interpolationsversionen $INT = 1, 1/2, 1/3$ und $1/6$ einstellbar, d.h. es können zwischen die abgetasteten Modellprofile 1, 2 oder 5 Zwischenprofile eingeschaltet werden. Die Interpolation erfolgt bei diesem Gerätesystem auf elektrischem (analogem) Weg. Sie wird als "Elektrische Interpolation" bezeichnet. Beim Einsatz der Zusatzeinrichtung "Optische Interpolation" (Abb. 3/8) sind allerdings nur die Versionen $INT = 1$ und $INT = 1/2$ vorgesehen.

Der Zusammenhang zwischen Profilabstand Δp , Interpolationsgrad INT und Streifenbreite Δx soll für die Geräteausrüstung Zeiss GZ1 (off-line) an drei Beispielen (A, B, C) erläutert werden (Tab. 6/35). Es wird hierbei angenommen, daß sich Modellmaßstab und Orthophotomaßstab wie 1:2,5 verhalten.

Beispiel	A	B	C
Profilabstand Δp (mm) im Modell	1,6	1,6	6,4
Profilabstand Δp_K (mm) im Orthophotomaßstab	4,0	4,0	16,0
Interpolationsgrad INT	1/2	1/6	1/6
Streifenbreite Δx (mm) im Orthophoto	2,0	2/3	2 2/3

Tab. 6/35 Beispiele für die Reduzierung der Streifenbreite Δx gegenüber dem Profilabstand Δp durch Elektrische Interpolation beim Orthoprojektor Zeiss GZ1

Die meisten Orthophotos dieser Arbeit wurden nach Version A in Verbindung mit der "Optischen Interpolation" hergestellt. Die Abtastzeiten betragen im Durchschnitt 1,7 Stunden, die Belichtungszeiten der Orthophotos ca. 4,5 Stunden bei einer Blendenlaufgeschwindigkeit von 5 mm/sec. Während der vollautomatischen Orthoprojektion konnten im Steuergerät Planimat jeweils das nächste Modell eingelegt und orientiert, sowie die Profilinformatio auf Gravurplatten gespeichert werden.

Eine weitere Verfeinerung der Objektannäherung ist durch die Wahl der Streifenbreite $\Delta x = 2/3$ mm bei einem Interpolationsgrad von $INT = 1/6$ möglich (Version B). Der Aufwand für die Profilabtastung ist gleich wie in Beispiel A, jedoch erhöht sich durch die größere Streifenanzahl die Belichtungszeit des Orthophotos um den Faktor 3 (auf durchschnittlich 13,5 Stunden, empirischer Wert). Die Interpolation $INT = 1/6$ ist beim GZ1

nur in Verbindung mit der Entzerrung 0. Ordnung kombinierbar. Wegen der langen Belegungszeit des Orthoprojektors sollte dieser verfeinerte Entzerrungsprozeß ausschließlich bei stark geneigten Objektflächen angewandt werden.

Die dritte Version (C) scheint für die differentielle Entzerrung großflächiger, stetig gekrümmter Objekte (z.B. Kuppeln) geeignet zu sein, wenn eine 6-fache Interpolation durch den gleichmäßigen Flächenverlauf erlaubt ist. Gegenüber Beispiel A wird hier mit 4-fachem Profilabstand gearbeitet. Abgesehen von der um ebenfalls den Faktor 4 verminderten Abtastzeit kann sich der photogrammetrische Operateur auf die wenigen Höhenprofile konzentrieren, was die Qualität der Höhenabtastung (Abschnitt 6.3) verbessert. Die Objektannäherung quer zur Streifenrichtung ist bei einer Spaltblende von $\Delta x = 2 \frac{2}{3}$ mm nur um etwa 33 % schlechter als bei Version A.

b) Entzerrung in Teilbereichen

Eine Möglichkeit der Kombination von Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit besteht allerdings in jedem Fall. Das Objekt kann in mehreren Zonen unterschiedlicher Neigungsverhältnisse mit speziell abgestimmten Spaltblenden entzerrt werden. So könnten zum Beispiel bei dem in Abb. 6/11 dargestellten Taubenturm ca. 75 % mit $\Delta x = 2$ mm, die äußeren Ränder mit $\Delta x = 2 \frac{2}{3}$ mm Streifenbreite umgebildet werden. Bei gleicher Belichtung und guter photographischer Abstimmung ist eine Zusammensetzung der einzelnen Teile ohne weiteres möglich. Der Aufwand der Mosaikarbeiten sollte jedoch nicht so hoch sein, daß eine geschlossene Auswertung mit kleinerer Spaltbreite günstiger wäre. Die individuelle Teilentzerrung kann natürlich auch bei komfortablen Gerätesystemen eine gewünschte Optimierung herbeiführen. Beim Orthoprojektor GZ 1 ist jedoch zu beachten, daß ein Wechsel zwischen "Optischer Interpolationseinrichtung" und Entzerrung 0. Ordnung kleinere Umbauarbeiten am Gerät erfordert und somit nicht ständig erfolgen kann.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Streifenbreite einen entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit und Detailwiedergabe ausübt. Ihre Wahl ist deshalb ein wichtiger Schritt in der Projektplanung. Im Gegensatz zu topographischen Auswertungen werden in der Architektur Spaltbreiten von $\Delta x = 2$ mm und kleiner notwendig. Um jedoch die Auswertzeiten nicht zu übersteigern, müssen gerätetechnische Verfeinerungen des Entzerrungsprozesses vorgenommen werden.

Als geeignet erscheinen hierbei die Entzerrung 1. Ordnung sowie die Möglichkeit der Interpolation von Zwischenprofilen. Beide Methoden sind in Verbindung mit off-line-Orthoprojektoren anwendbar, wobei die digitale Steuerung eine weitgehende Flexibilität gewährleistet.

6.2 Blendenbreite in Profilrichtung

6.2.1 Bildwanderung bei der Orthoprojektion

Bei der streifenweisen Umbildung erfolgt die Belichtung des Orthophotos in der Regel kontinuierlich bei gleichzeitiger Bewegung der Spaltblende über die Projektionsfläche. Jeder Objektpunkt wird dabei so lange auf den Film aufbelichtet, wie die Spaltblende der Breite t den Lichtstrahl freigibt. Liegt eine Objektneigung in Profilrichtung vor, so muß während der Belichtungszeit bei optischer Projektion (Abb. 3/3a) die Projektionsweite, bzw. bei optischer Bildübertragung (Abb. 3/3b) die Stellung der Zoom-Optik verändert werden. Dadurch entsteht eine radiale Auswanderung der Projektionsstrahlen gegenüber der Auffangfläche (Film). Diese Relativbewegung, die, wie bereits in den Abschnitten 3.3.7 und 4.1.2 erwähnt wurde, Bewegungsunschärfen im Orthophoto verursacht, wird als Bildwanderung bezeichnet.

Nach HOBBIÉ /55, S. 51/ ergibt sich der Betrag w_r der radialen Bildwanderung zu

$$w_r = \frac{t \cdot r \cdot \tan \beta_y}{z - y \cdot \tan \beta_y} \quad (6,22)$$

Die Bildwanderung ist abhängig von der Blendenbreite t und der Objektneigung β_y in Profillaufrichtung sowie von der Aufnahmeentfernung z und dem Radialabstand r vom Nadirpunkt. Eine Abhängigkeit von der Profillaufgeschwindigkeit ist nicht gegeben. Der Betrag der Bildwanderung bezieht sich wie die Blendenbreite selbst auf den Maßstab des Orthophotos.

Bei topographischen Geländeauswertungen treten starke Neigungen meist nur lokal begrenzt auf, so daß sich im allgemeinen bei der Orthoprojektion von Luftbildern keine wesentlichen Bewegungsunschärfen einstellen. Im Gegensatz dazu weisen Architekturflächen oft stetige und damit großflächige Neigungen und Krümmungen auf. Bei konstanter oder kontinuierlich anwachsender Neigung β_y ergeben sich weite Objektbereiche, in denen durch die Bewegungsunschärfen bei der Orthoprojektion keine Oberflächenstruktur mehr zu erkennen ist. Abgesehen von dem entstandenen Detailverlust beeinträchtigen solche "verwischten Zonen" die photographische Wirkung von Photokarten in besonderem Maße.

Theoretische Abschätzungen (MEIER /89/) ergaben als tolerierbare Bewegungsunschärfe einen Betrag von ca. 0,4 mm im Orthophoto. Praktische Versuche wurden von HOBBIÉ /55, S. 54/ angestellt. Als Grundlage dienten Luftbildpläne (Orthophotos) verschiedener Maßstäbe und unterschiedlicher Topographie. Bei schwach strukturierten und großmaßstäbigen Photoplänen wurden Bewegungsunschärfen bis zu 0,8 mm für zulässig gehalten, dagegen wurde bei feinen Detailstrukturen und kleinen Maßstäben die Toleranz auf ca. 0,4 mm geschätzt. Im Mittel kann von einer maximal zulässigen Bildwanderung von 0,5 mm im Orthophoto ausgegangen werden. Die Bewegungsunschärfe "haftet" bei vorgegebenem Orthophotomaßstab sozusagen am Objekt. Durch nachträgliches Vergrößern

oder Verkleinern des Orthophotos wird zwar der Betrag der Unschärfe im Photoplan verändert, die Relation zur Objektstruktur bleibt aber bestehen.

6.2.2 Theoretische Untersuchungen zur Bildwanderung bei der differentiellen Entzerrung ausgewählter Standardflächen

An Hand der in der Architektur häufig vorkommenden Regelflächen "Ebene, Zylinder, Kugel, Kegel" (aus Abschnitt 6.1.2) sollen nun die bei der Orthoprojektion auftretenden Bewegungsunschärfen untersucht werden. Die den Berechnungen und graphischen Darstellungen zugrundeliegenden Auswerteversionen sind in Tabelle 6/36 zusammengestellt.

Regel- fläche	Auswerteversion	Profil- richtung
Ebene	Neigung $\beta_x = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	x
Zylinder	konkav, zentrisch konvex, tangential	x x
Kugel	konkav, zentrisch konvex, zentrisch	y y
Kegel	konvex, zentrisch konvex, zentrisch	y x

Tab. 6/36 Objektvarianten zur Untersuchung der Bildwanderung bei der Orthoprojektion

Da bei den Standardflächen "Ebene" und "Zylinder" in gegebener Anordnung (siehe Abbildungen 6/15 und 6/19) keine y-Neigungen auftreten, wurde für die Untersuchung eine Modellabtastung (und Orthoprojektion) in x-Richtung angenommen. Für die Kugel ergeben sich auf Grund der Symmetrie in beiden Abtastrichtungen die gleichen Bewegungsunschärfen. Die Berechnung der Bildwanderung erfolgte für alle Beispiele nach Gleichung (6,22). Es wurde eine Blendenbreite von $t = 1$ mm zugrundegelegt, wie sie bei Orthoprojektionsgeräten überwiegend verwendet wird.

In den Abbildungen 6/37 bis 6/40 sind für die Standardflächen "Ebene, Zylinder, Kugel und Kegel" die Linien gleicher Bewegungsunschärfe (bei $t = 1$ mm) sowie die zur Einhaltung einer maximalen Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm jeweils notwendigen Blendenbreiten t dargestellt. Für die differentielle Entzerrung ebener Flächen sind die Linien gleicher Bildwanderung konzentrische Kreise um den Nadirpunkt, weil der Nenner ($z - y \cdot \tan \beta_y$) in Gleichung (6,22) für alle Punkte einer Ebene konstant ist (vgl. auch Abb. 6/16 für den Verfahrensfehler).

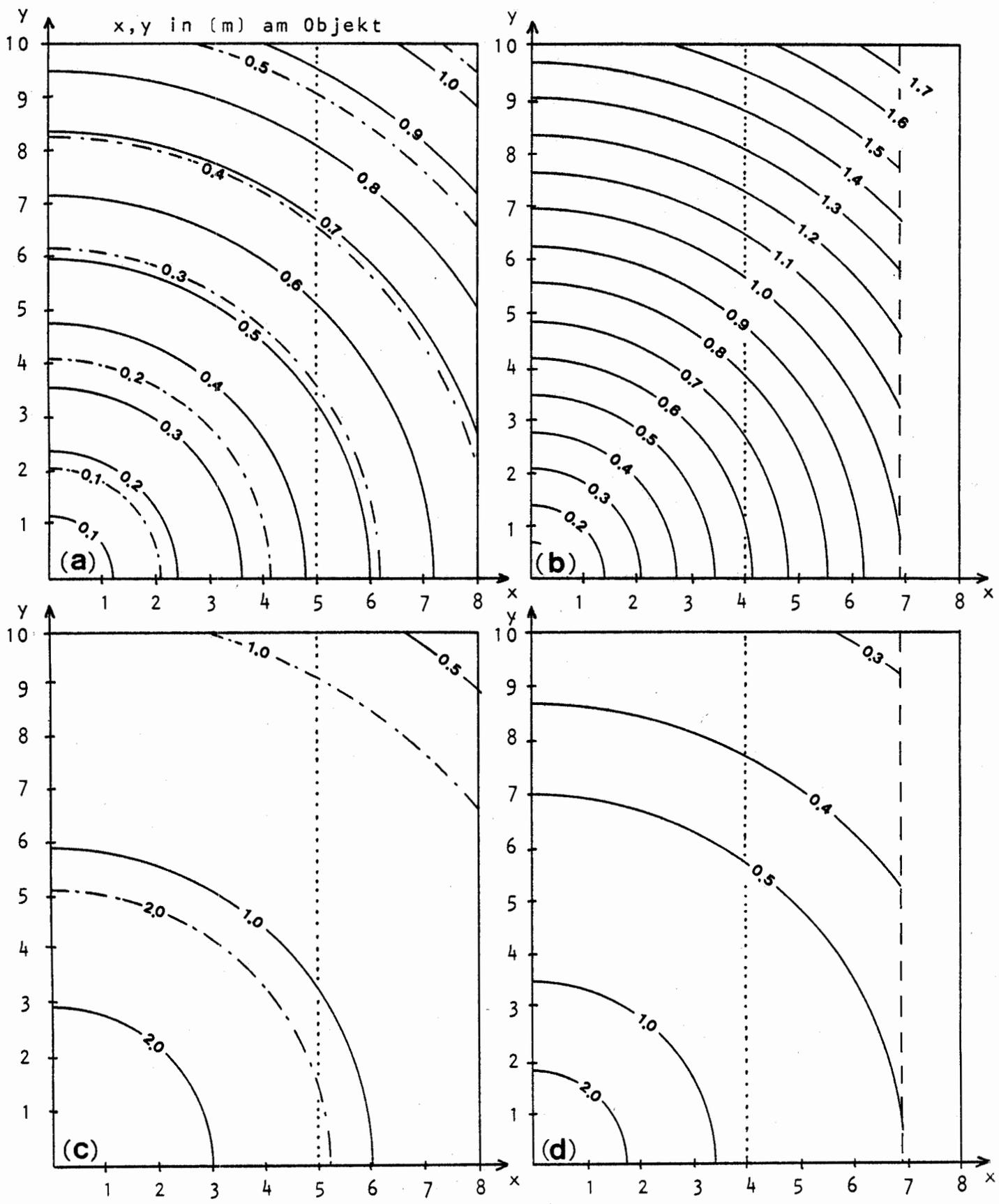


Abb. 6/37 (a), (b) Linien gleicher Bewegungsunschärfen w_r (mm) im Orthophoto bei $t = 1$ mm
 (c), (d) Zulässige Blendenbreiten t (mm) bei Einhaltung einer Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Geneigte Ebene
 (a), (c) $\beta_x = 30^\circ$ (---), $\beta_x = 45^\circ$ (—)
 (b), (d) $\beta_x = 60^\circ$ (—)
 Begrenzung des Bildbereichs bei WW-Aufnahmen
 - - - - - theoretische Begrenzung des Bildbereichs bei Öffnungswinkel 180°

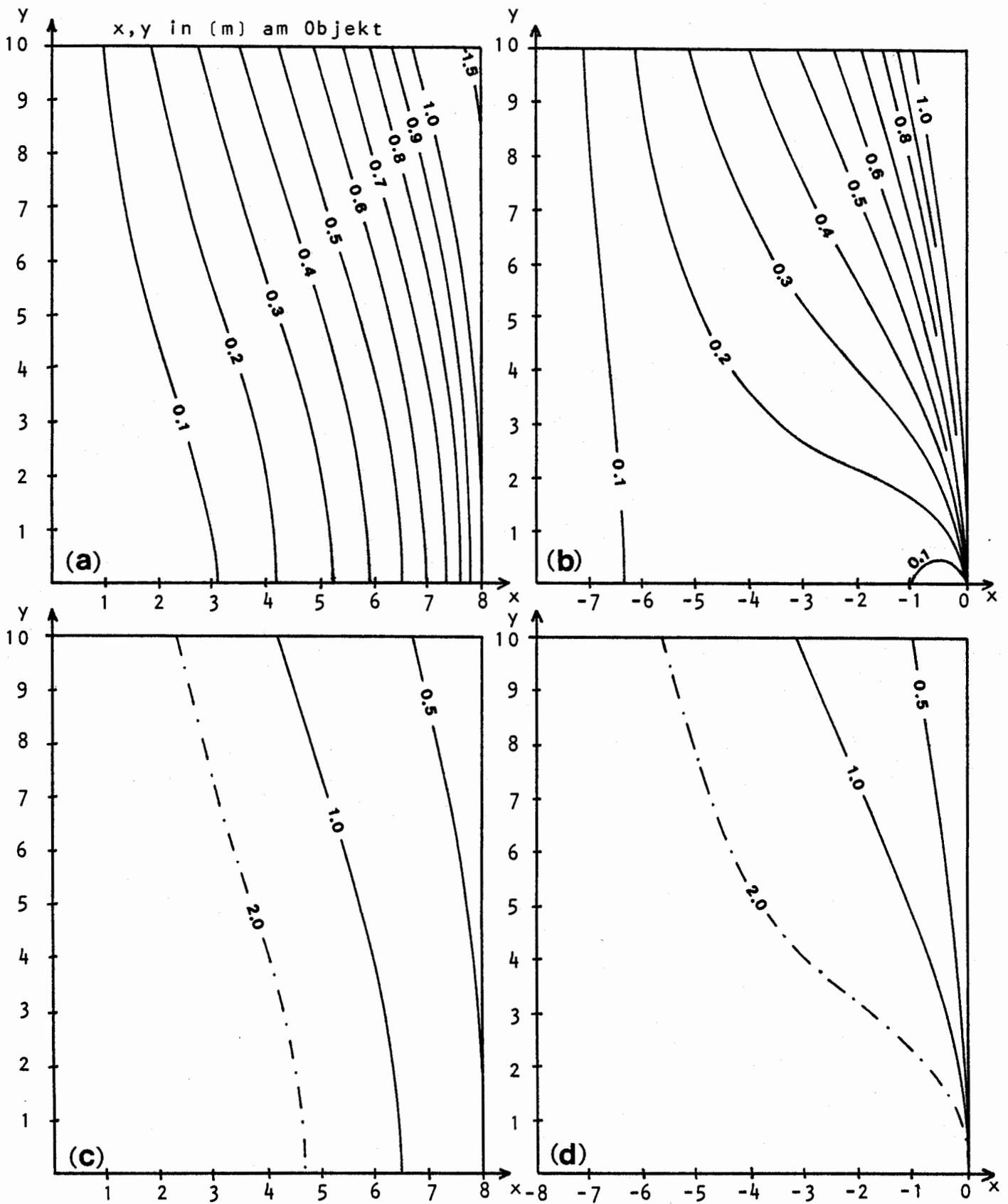


Abb. 6/38 (a),(b) Linien gleicher Bewegungsunschärfen w_r (mm) im Orthophoto bei $t = 1$ mm
 (c),(d) Zulässige Blendenbreiten t (mm) bei Einhaltung einer Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm im Orthophoto. Standardfläche: Zylinder
 (a),(c) konkave Krümmung, zentrische Aufnahme
 (b),(d) konvexe Krümmung, tangentielle Aufnahme

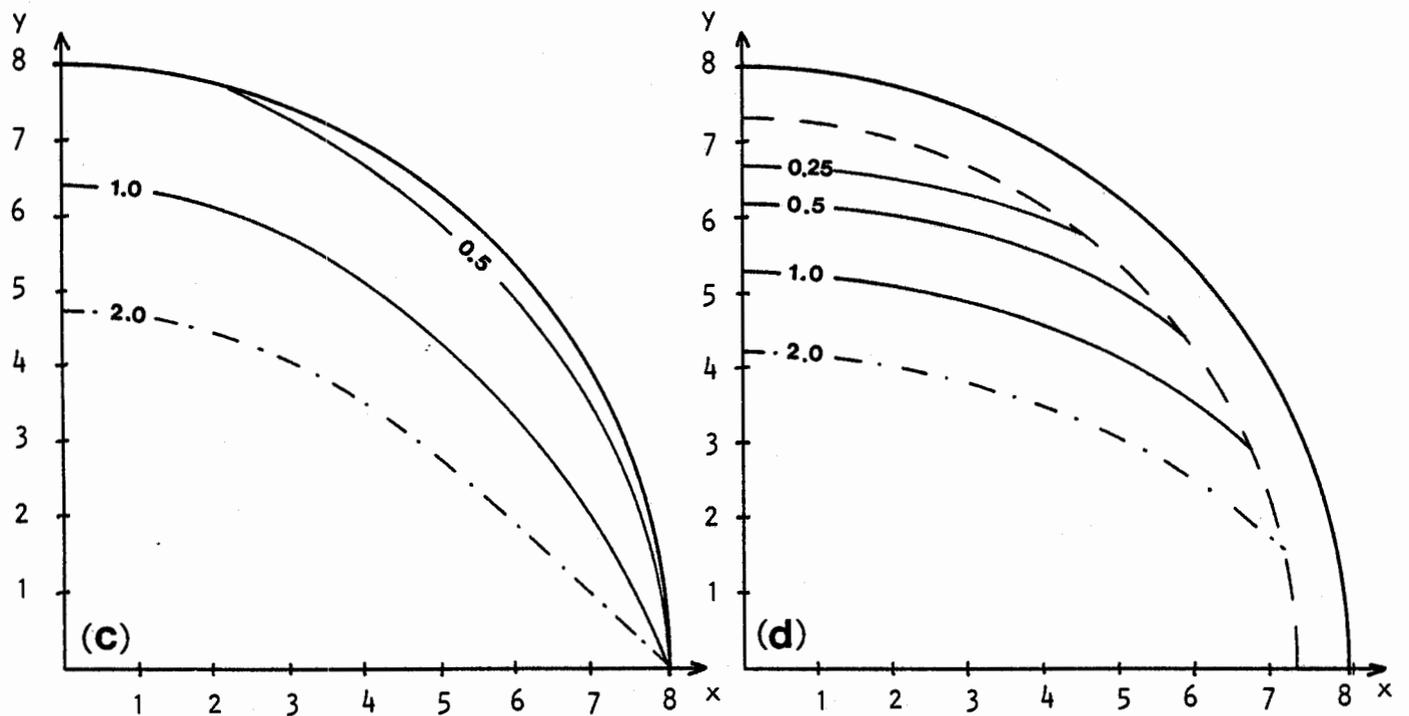
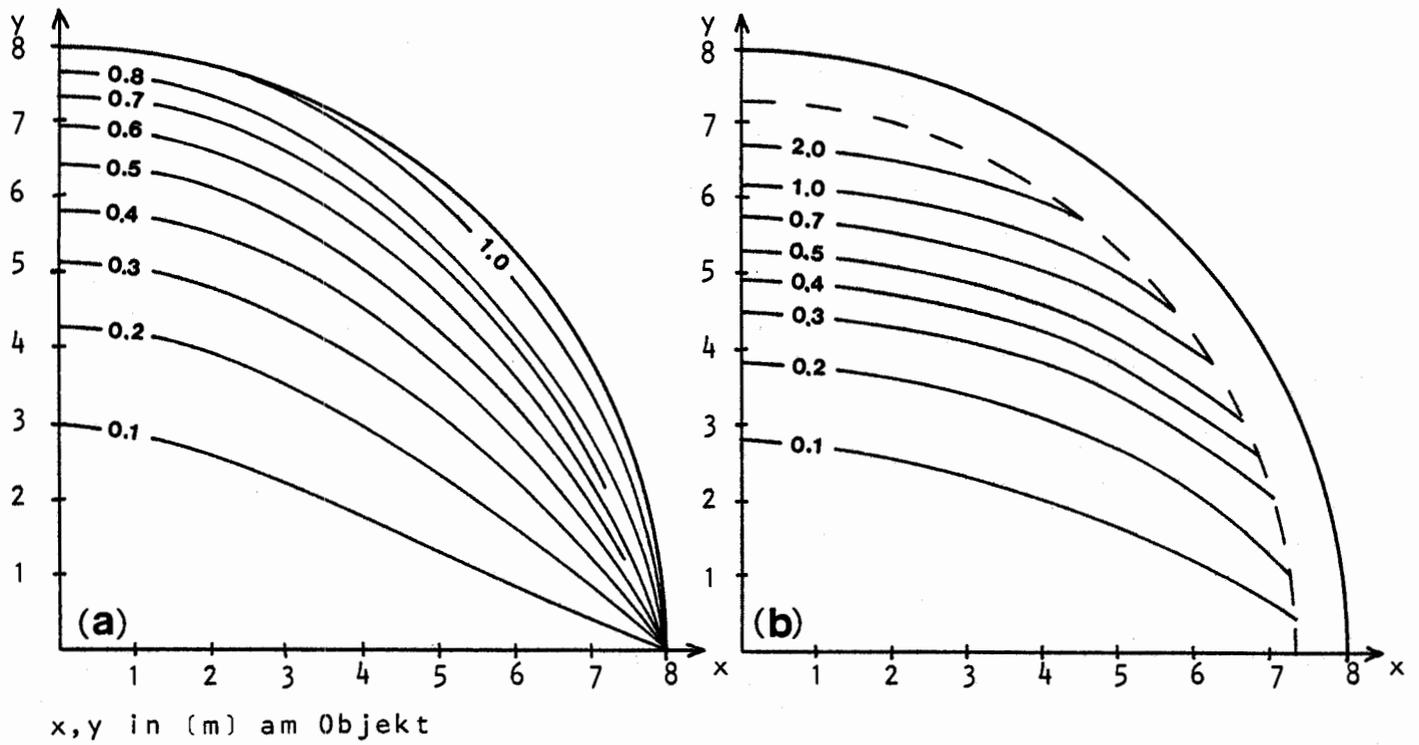


Abb. 6/39 (a), (b) Linien gleicher Bewegungsunschärfen w_r (mm) im Orthophoto bei $t = 1$ mm
 (c), (d) Zulässige Blendenbreiten t (mm) bei Einhaltung einer Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm im Orthophoto
 Standardfläche: Kugel, zentrische Aufnahme
 (a), (c) konkave Krümmung, (b), (d) konvexe Krümmung
 - - - - - Umrißlinie

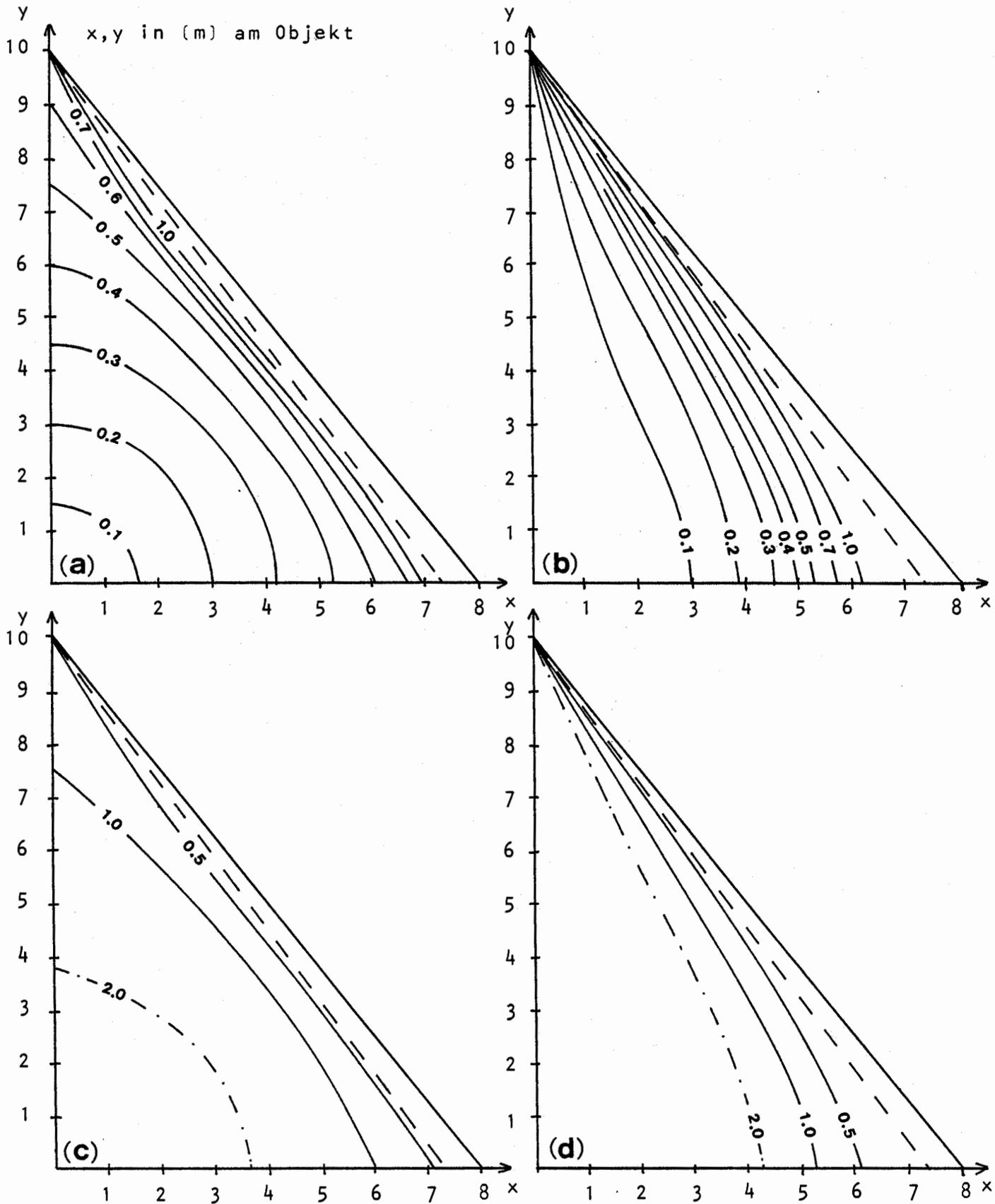


Abb. 6/40 (a), (b) Linien gleicher Bewegungsunschärfen w_r (mm) im Orthophoto bei $t = 1$ mm
 (c), (d) Zulässige Blendenbreiten t (mm) bei Einhaltung einer Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm im Orthophoto
 Standardfläche: Kegel, konvexe Krümmung
 (a), (c) Abtastung in y-Richtung, (b), (d) Abtastung in x-Richtung
 - - - - Umrißlinie

Den Diagrammen für die Standardfläche "geneigte Ebene" (Abb. 6/37) kann entnommen werden, daß bei einer Blendenbreite von $t = 1$ mm das vorgegebene Objektformat von 8×10 m² bis zu einer Neigung von ca. 30° ganz, bei $\beta_x = 45^\circ$ nur zu ca. 40 % ausgewertet werden kann, ohne daß eine Bildwanderung von $w_r = 0,5$ mm überschritten wird. Bei der Umbildung einer um $\beta_x = 60^\circ$ geneigten Ebene treten nahezu im gesamten Orthophoto unzulässige Unschärfen auf. Anders ausgedrückt, können bei dieser Objektausdehnung Neigungen bis zu 30° mit einer Blendenbreite von $t = 1$ mm (Standardgröße) ausgewertet werden, bei $\beta_x = 45^\circ$ bzw. 60° wird eine Reduzierung auf $t = 0,5$ mm bzw. $t = 0,2$ mm erforderlich.

Eine hinreichend scharfe Abbildung einer Zylinderfläche (Abb. 6/38) der vorgegebenen Größe ist mit $t = 1$ mm bei der Version "konkav, zentrisch" bis zu 70 %, im Aufnahmefall "konvex, tangential" bis zu 80 % möglich. Wenn die Blendenbreite bei beiden Varianten auf ca. 0,5 mm reduziert wird, werden auch die seitlichen Zonen des Zylinders weitgehend scharf abgebildet.

Die Linien gleicher Bildwanderung bei der Umbildung einer Kugel-
fläche sind in Abb. 6/39 dargestellt. Eine konkave Fläche kann bei einer Blendenbreite von $t = 1$ mm bis zu ca. 90 %, eine konvexe Fläche nur bis zu 70 % scharf wiedergegeben werden. Für konvexe Flächen dieser Größe wird zur nahezu vollständigen Erfassung eine Blendenbreite von $t < 0,25$ mm erforderlich. Es ist zu erkennen, daß differentielle Entzerrungen von konkaven Flächen (Innenräume, Gewölbe, Kuppeln) günstigere Fehlereigenschaften aufweisen als solche von konvexen Flächen, wie auch aus der Diskussion der Verfahrensfehler (Abschnitt 6.1.2) deutlich wurde.

Die orthophotographische Umbildung eines Kegels (Anordnung siehe Abb. 6/28) kann in zwei Richtungen erfolgen. Bei der Profilabtastung in y-Richtung (parallel zur Kegellachse) werden bei $t = 1$ mm etwa 55 % scharf (d.h. mit $w_r < 0,5$ mm) abgebildet, bei Abtastung in x-Richtung etwa 70 %. Das bedeutet für eine auch in den Randbereichen befriedigende Bildqualität die Herabsetzung der Blendenbreite auf $t = 0,2$ bis 0,5 mm. Die Auswertung in x-Richtung liefert die (zumindest bezüglich der Bewegungsunschärfe) besseren Ergebnisse. Da sich bei einer Abtastung "parallel y" die Meßmarke auf eine Hyperbel bewegt, beginnt die Nachführung bereits mit einer beträchtlichen Längsneigung, die sich im Verlauf des Profils (in Richtung Kegelspitze) langsam steigert. Bei der Streifenrichtung "parallel x" läuft die Meßmarke auf einer Kreislinie. Die Zentralzone der Kegelfläche ist hier frei von Bildwanderung, die Unschärfen werden erst bei starker Krümmung am Rand der Fläche störend.

6.2.3 Demonstration von Bewegungsunschärfen an praktischen Beispielen

Zur Ergänzung der theoretischen Untersuchungen sollen hier einige Beispiele für Bewegungsunschärfen im Orthophoto gegeben werden. Als Demonstrationsobjekt erschien der bereits in Abschnitt 6.1.1.4 (Abb. 6/11) erwähnte Taubenturm (Mechelen/Belgien, Abb. B/3 im Anhang) als geeignet, weil seine Oberfläche aus den Standardkörpern Zylinder und Kegel, jeweils in konvexer Form, zusammengesetzt ist, und weil damit bei der Umbildung das Auftreten

großer Bewegungsunschärfen sicher zu erwarten ist. Die gleichzeitig in Erscheinung tretenden Verfahrensfehler sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden.

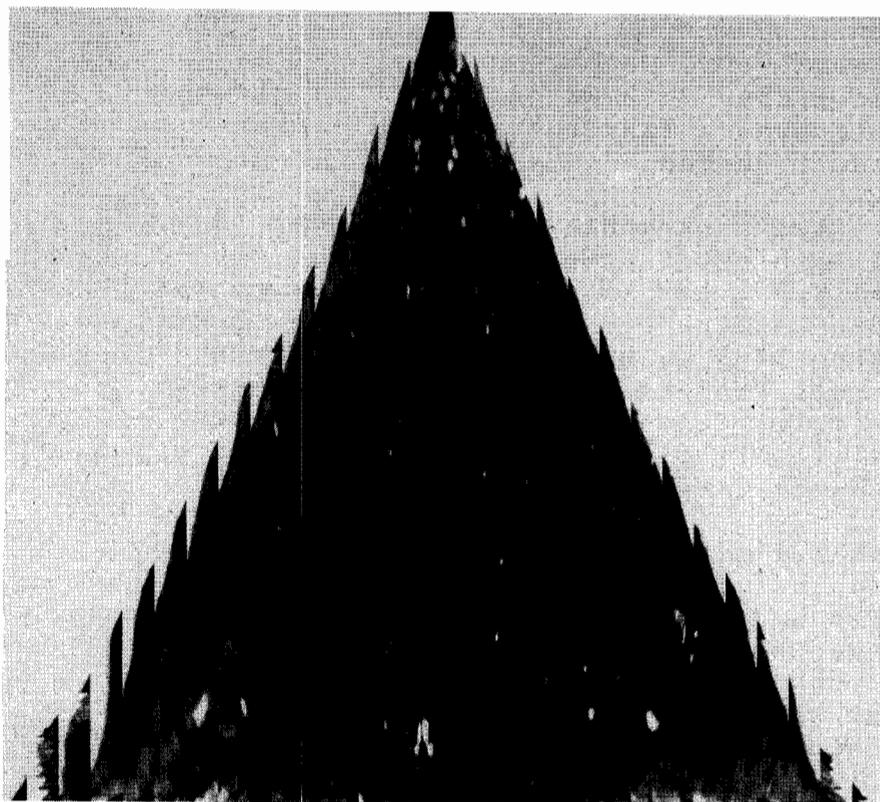
Die Turmfläche selbst kann als senkrechter Kreiszyylinder (Radius 2,9 m), das Dach als Kombination zweier Kreiskegel mit einem Grundkreisradius von 3,0 m bzw. 2,1 m und einer Höhe von 3,5 m bzw. 4,3 m verstanden werden. Die Aufnahmeentfernung zur Mittelachse des Turms betrug 21,6 m, der Ansatz des unteren Kegels lag 6,8 m oberhalb des Projektionszentrums. Die Auswertung erfolgte am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 mit einer Blendenbreite von $t = 1$ mm sowohl im Orthophotomaßstab 1:100 in x- und y-Richtung als auch im Maßstab 1:40 in y-Richtung.

Die reproduktionstechnisch auf einen einheitlichen Maßstab von 1:50 gebrachten Orthophotos der Turmoberfläche sind in den Abbildungen 6/41 und 6/42 wiedergegeben. Zur Abschätzung der in den Abzügen sichtbaren Bewegungsunschärfen wurde für das jeweilige Beispiel die theoretisch zu erwartende Bildwanderung nach Gleichung (6,22) berechnet und graphisch dargestellt. Die sich auf die Orthophotos beziehenden Diagramme enthalten Linien gleicher Bildwanderung.

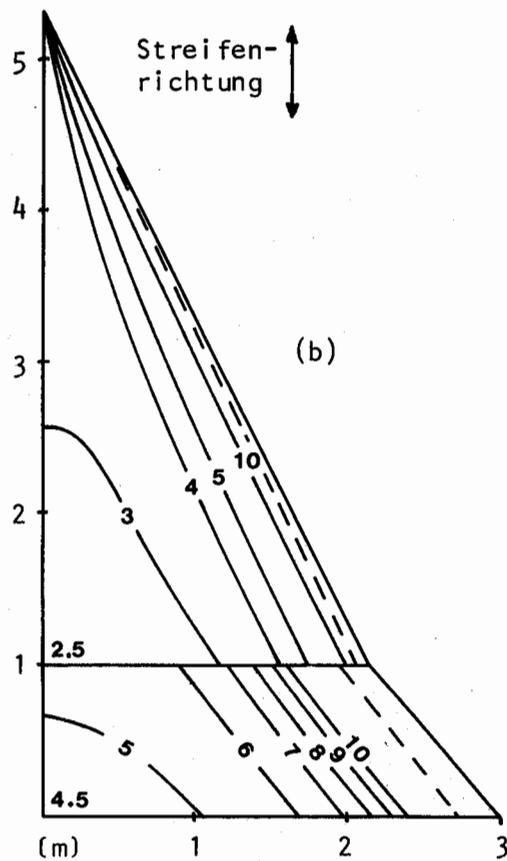
Aus Abb. 6/41 ist die Maßstabsabhängigkeit der Bildwanderung ersichtlich. Bei der Orthoprojektion im Maßstab 1:40 ergaben sich gegenüber der Auswertung in 1:100 bei gleicher Blendenbreite ($t = 1$ mm) um den Faktor 2,5 kleinere Bewegungsunschärfen, wodurch die Bildqualität zwar erheblich verbessert wurde, aber trotzdem noch nicht ausreichend ist.

Der untere Kegelstumpf wird trotz des kleineren Radialabstandes vom Nadirpunkt bei beiden Versionen schlechter wiedergegeben als der obere Teil des Daches, was durch die um ca. 15° größere Oberflächenneigung begründet ist. So erscheint das Orthophoto des unteren Kegelstumpfs bei der Auswertung in 1:100 völlig unbrauchbar, da die Bildwanderung in allen Zonen größer als 4,5 cm am Objekt ist.

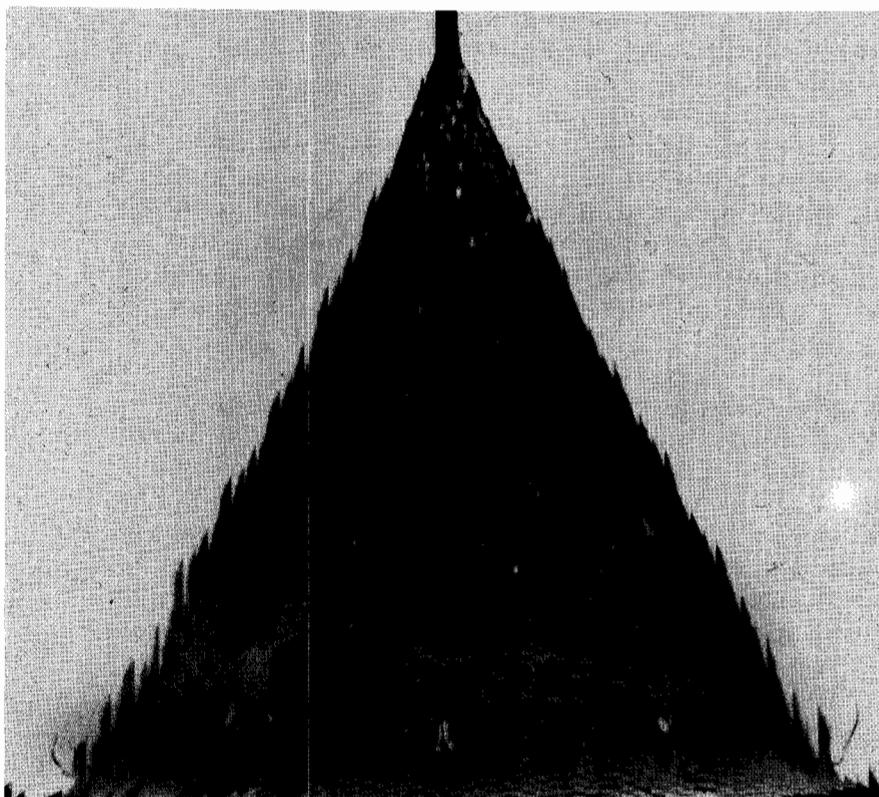
Abb. 6/42 zeigt, daß sich die Bewegungsunschärfen bei x-Profilrichtung für die Standardflächen Zylinder und Kegel ähnlich verhalten. Die Meßmarkenbewegung bei der Profilabtastung erfolgte bei beiden Flächen jeweils auf einer Kreislinie. Beim Vergleich der Profilversionen "parallel y" und "parallel x" (Abbildungen 6/41 a,b und 6/42 a,b) erweist sich (zumindest für die Kegelfläche) die Abtastung in x-Richtung als vorteilhafter, was auch bereits aus der Untersuchung der Standardflächen (Abb. 6/40) zu ersehen war. Bei x-Profilrichtung wird die gesamte Mittelzone des Daches infolge der geringen Flächenneigung (Kreislinie) scharf abgebildet.



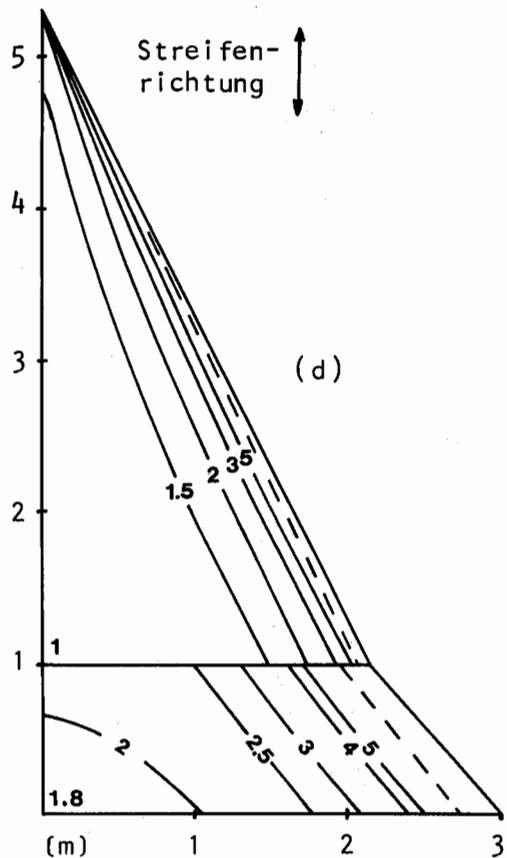
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 6/41 Beispiel für Bewegungsunschärfen bei der Orthoprojektion; Objekt: Mechelen, Taubenturm; Modellabtastung in y-Richtung

(a) Vergrößerung 1:50 aus dem Orthophoto 1:100

(b) Bildwanderung w_r (cm) am Objekt

(c) Verkleinerung 1:50 aus dem Orthophoto 1:40

(d) Bildwanderung w_r (cm) am Objekt

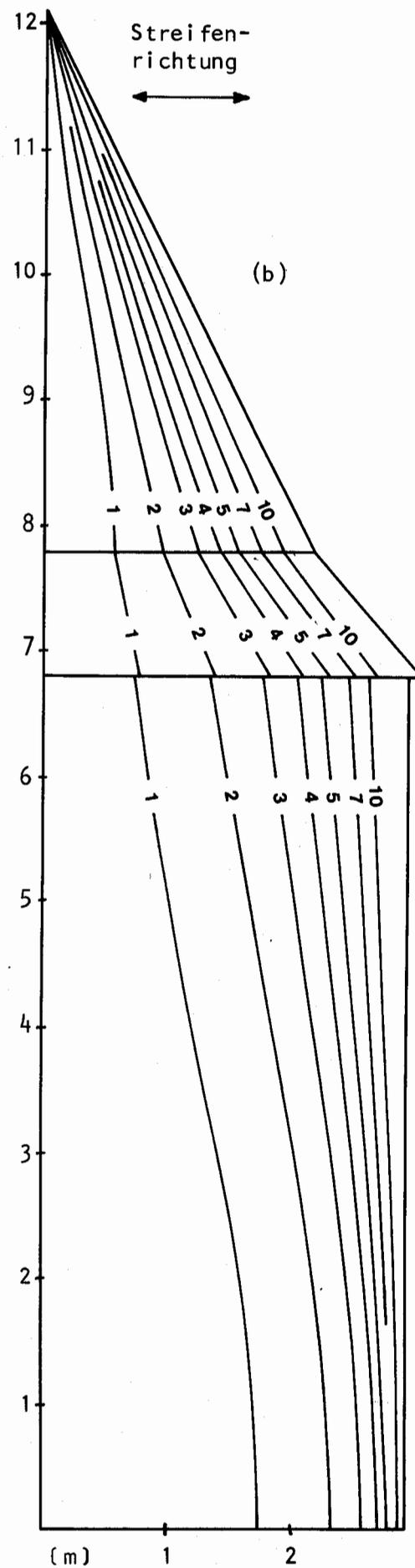
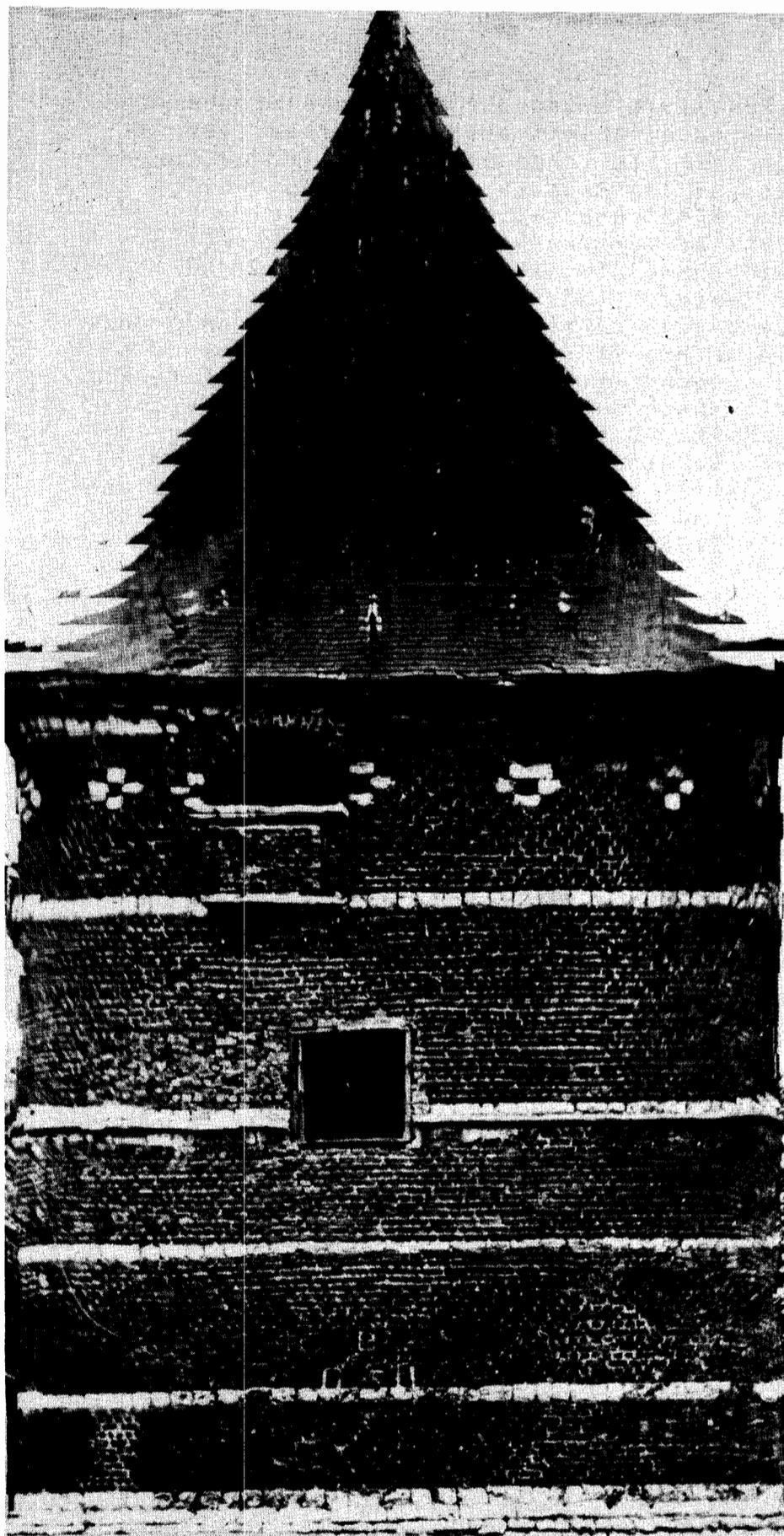


Abb. 6/42 Beispiel für Bewegungsunschärfen bei der Orthoprojektion;
 Objekt: Mechelen, Taubenturm; Modellabtastung in x-Richtung
 (a) Vergrößerung 1:50 aus dem Orthophoto 1:100
 (b) Bildwanderung w_r (cm) am Objekt

Bei Betrachtung der Bildbeispiele und der Diagramme erscheint eine Unschärfe von 2 - 3 cm am Objekt als tolerierbar. Das entspricht ca. $1/5$ der durchschnittlichen Steingröße an der Turmoberfläche. Umgerechnet auf den Maßstab 1:50 der Photoabzüge in den Abbildungen 6/41 und 6/42 bedeutet das eine maximale Bildwanderung von 0.5 mm. Dieser Wert kommt den praktischen Erfahrungen aus der Luftphotogrammetrie nahe (HOBBIE /55, S. 54/). Werden die Orthophotos reproduktionstechnisch vergrößert, so bleibt die Unschärfe am Objekt erhalten, d.h. die Toleranzgrenze verläuft theoretisch weiterhin in der gleichen Objektzone. Die Unschärfe im Bild wird jedoch mitvergrößert, was sich bei feinen Unterstrukturen, die durch den größeren Maßstab erst sichtbar werden, störend auswirkt. Daher kann sich die Toleranzgrenze am Objekt durch optische Vergrößerung oder Verkleinerung dennoch verschieben. Der maximal zulässige Betrag der Bildwanderung ist also in jedem Fall in Relation zur jeweiligen Objektstruktur zu setzen. Feine Detailgliederungen erfordern ein höheres Maß an Abbildungsschärfe.

6.2.4 Folgerungen zur Wahl der Blendenbreite

Im Hinblick auf eine gerade bei Photokarten im architektonischen Bereich befriedigende Bildqualität muß die Bewegungsunschärfe klein gehalten werden. Das kann durch die Aufnahmeanordnung geschehen, indem geneigte Objektpartien in die Bildmitte gelegt werden. Auch die Wahl der Kammer hat einen Einfluß auf die Bildwanderung. Wie in Abschnitt 4.1.2 gezeigt wurde, ist bei Verwendung langbrennweitiger Kammer (bei gleichem Bildmaßstab) durch den schmäleren Bildwinkel die zu erwartende Bewegungsunschärfe geringer als bei Weitwinkelaufnahmen.

Eine (außer bei stark abfallenden Flächen, wenn $y \cdot \tan \beta_y \rightarrow z$ geht) besonders wirksame Maßnahme zur Reduzierung der Bildwanderung ist die Verkleinerung der Blendenbreite. Wie aus obigen Beispielen deutlich wurde, ist für die Umbildung architektonischer Flächen eine Blendenbreite von $t = 1$ mm ungeeignet. Eine effektive Verbesserung der Bildqualität kann dagegen mit $t = 0,1$ bis $0,3$ mm erzielt werden. Diese Möglichkeit ist bei einigen Orthoprojektoren zumindest prinzipiell gegeben, da sich mechanische Spaltblenden in diesen Größen anfertigen lassen.

Eine Reduktion der Blendenbreite um den Faktor 3 bis 10 wirkt aber auf der anderen Seite Probleme bei der Belichtung des Orthophotos auf, da durch den schmalen Spalt nur noch ein Bruchteil des Projektionslichtes hindurchgeht. Das gilt besonders für den Orthoprojektor Zeiss GZ 1 bei Verwendung der "Optischen Interpolationseinrichtung 0-Int", wo durch die Faseroptik etwa 50 % der einfallenden Lichtmenge absorbiert werden (ZEISS, Oberkochen, /146. S. 210/).

Ein Defizit an Lichtenergie kann in der Regel durch einige besondere Maßnahmen behoben werden, die aber ihrerseits wieder gewisse Nachteile aufweisen:

1. Durch Verwendung einer Halogen-Glühlampe kann die Beleuchtungsstärke bis um den Faktor 2 gesteigert werden. Die erhöhte Wärmeentwicklung und das Auftreten von störendem Seitenlicht sowie die verstärkte Reflexionsgefahr im Projektionsraum müssen dabei in Kauf genommen werden.
2. Eine wirksame Methode zur Vergrößerung der auf den Film auftreffenden Lichtenergie ist die Projektion "optisch dünner" Negative. Die Vorlage sollte aber "dicht" genug sein, um alle Bilddetails an das Orthophoto weitergeben zu können.
3. Zur gleichmäßigen Lichtverteilung über das gesamte Orthophoto werden in die Bildträger einiger Orthoprojektoren sog. "Verlauffilter" eingesetzt. Durch Weglassen dieser Deckgläser kann eine Energiesteigerung um den Faktor 2 erreicht werden. Eine homogene Ausleuchtung ist in diesem Fall aber nicht mehr gewährleistet.
4. Die Verwendung von besonders lichtempfindlichem Filmmaterial erfordert zwar auf der einen Seite weniger Energie, vermindert aber andererseits die Bildqualität insgesamt durch eine schlechtere Auflösung, d.h. durch größeres "Korn". Außerdem können durch Streulicht "Schleier" auf dem Film entstehen.
5. Auch die Reduzierung der Blendenlaufgeschwindigkeit vergrößert die pro Zeiteinheit auf das photographische Material auftreffende Lichtmenge. Der dadurch erhöhte Zeitaufwand bei der Orthoprojektion ist jedoch allenfalls bei off-line Betrieb vertretbar.

Durch eine Kombination der genannten Lösungen wird mit Sicherheit eine Energiesteigerung um den Faktor 3 bis 10 möglich sein. Diese Energiesteigerung ist Voraussetzung für die Reduzierung der Blendenbreite und damit für eine befriedigende Bildqualität. Daneben sollte aber bereits bei der photogrammetrischen Aufnahme das mögliche Auftreten von Bewegungsunschärfen bei der Orthoprojektion berücksichtigt werden.

6.3 Abtastgeschwindigkeit

6.3.1 Empirische Untersuchungen zum Höhenabtastfehler

Die Wahl der Abtastgeschwindigkeit bei der Differentialentzerrung gehört neben der Festlegung von Profilabstand, Streifenbreite und Blendenbreite zu den wichtigsten Entscheidungen im orthophotographischen Auswerteprozess. Wie bereits in Abschnitt 3.3.3 erwähnt wurde, entstehen beim kontinuierlichen, streifenweisen Abfahren eines photogrammetrischen Modells Höhenabtastfehler, die hauptsächlich von der Objektstruktur abhängen, aber auch durch die Abtastgeschwindigkeit beeinflusst werden. Diese Höhenfehler im Modell bewirken eine fehlerhafte Projektionsweite bzw. Zoom-Einstellung bei der Orthoprojektion, was im Orthophoto zu radialen Lageversetzungen führt (siehe Abb. 3/10). Gerade in der Architekturphotogrammetrie sind die Höhenabtastfehler durch das in der Regel kleine Basisverhältnis entsprechend groß, so daß sich in den Orthophotos störende Versetzungen einstellen.

Im folgenden soll nun der bei der Profilabtastung an architektonischen Objekten auftretende Abtastfehler empirisch untersucht werden. Die Beispiele entstanden im Zusammenhang mit den Orthophoto-Auswertungen der im Anhang aufgeführten Objekte "Ellwangen, Stuckdecke" (Abb. C/1), "Ottobeuren, Hauptkuppel" (Abb. B/9) und "Straßburg, Hauptportal" (Abb. B/5). Außerdem erfolgten Untersuchungen an einer ebenen, um 309 geneigten Fläche (siehe Abb. 9/1 in Abschnitt 9.1.1). Zur Überprüfung der Abtastgenauigkeit wurden einige Höhenprofile ausgewählt (Abbildungen 6/43 bis 6/45) und im Stereoauswertegerät mehrfach (im Hin- und Rücklauf sowie mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, siehe Tab. 6/46) abgetastet.

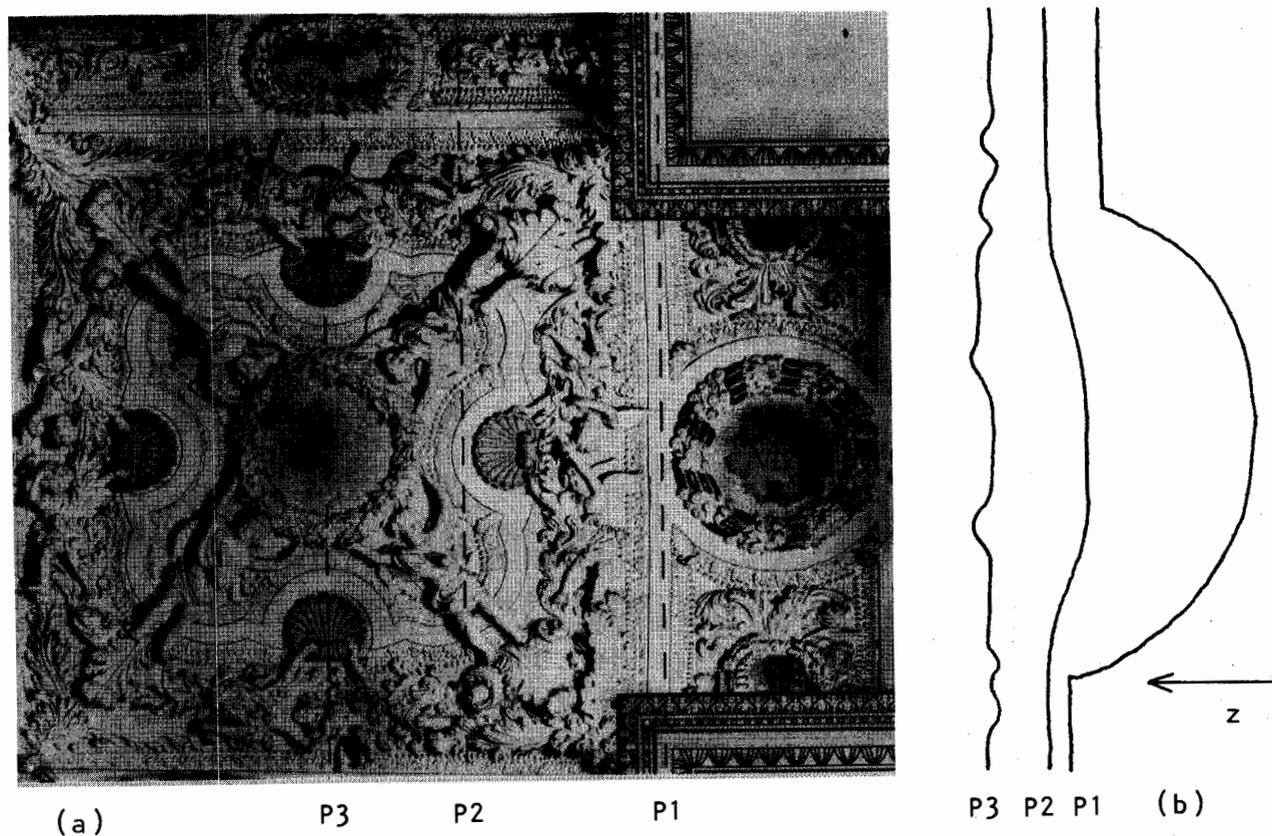
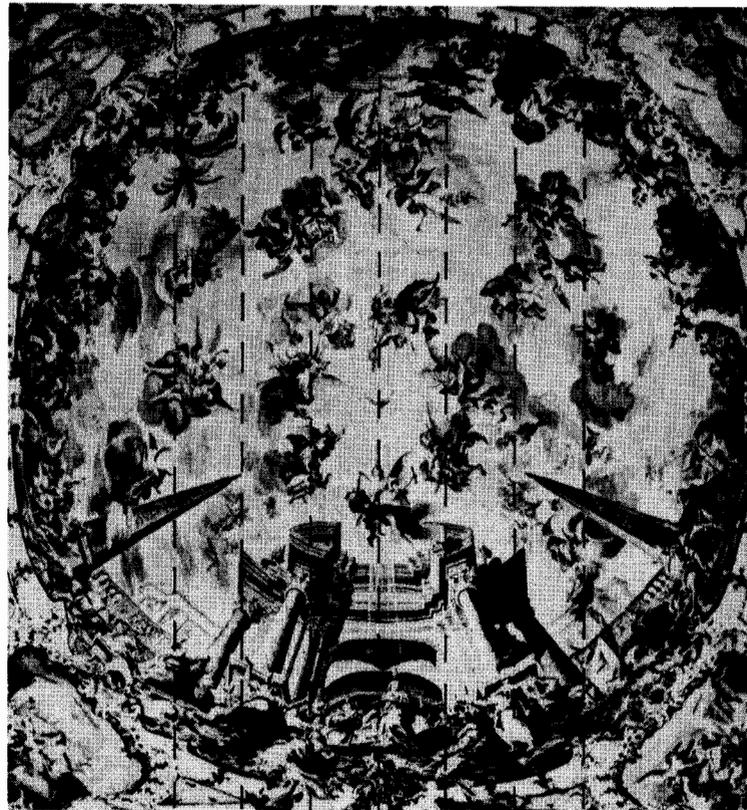


Abb. 6/43 Übersicht der Höhenprofile am Objekt "Ellwangen, Stuckdecke";

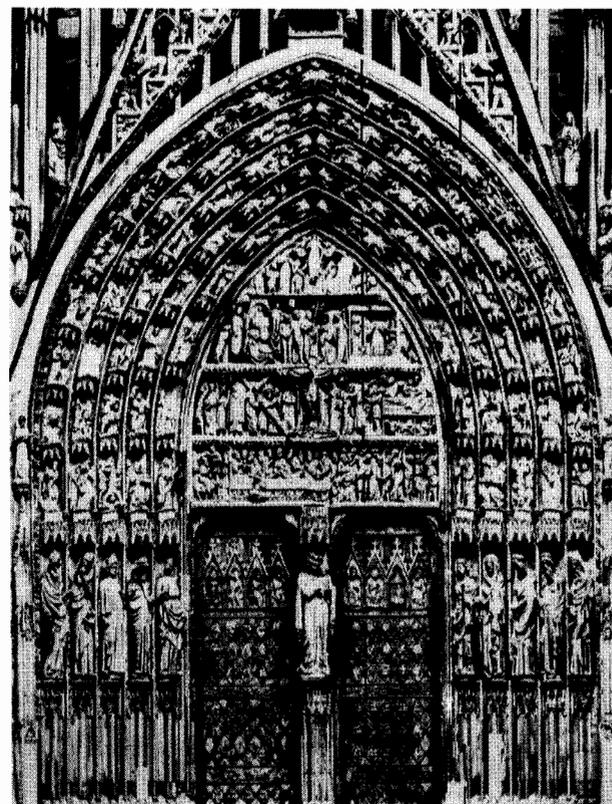
(a) Orthophoto mit eingetragenen Profillinien P1, P2, P3

(b) Verlauf der Höhenprofile P1, P2, P3

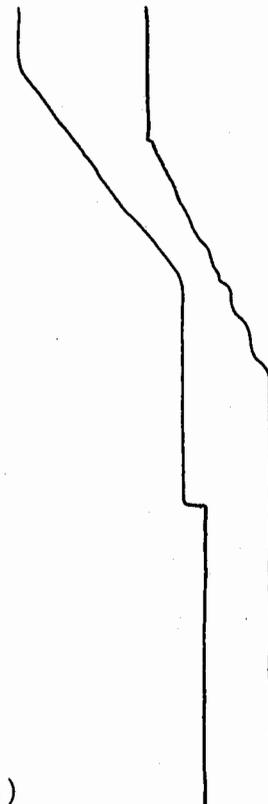


36 43 50 57 64 71 78

Abb. 6/44 Übersicht der Höhenprofile am Objekt "Ottobeuren, Hauptkuppel" ;
Orthophoto mit eingetragenen Profillinien.
Der Profilverlauf ist in Abb. 6/56 dargestellt.



(a)



(b)

P1 P2

P1 P2

Abb. 6/45 Übersicht der Höhenprofile am Objekt "Straßburg, Hauptportal" ;
(a) Orthophoto mit eingetragenen Profillinien P1, P2
(b) Verlauf der Höhenprofile P1, P2

Objekt	Profile	Abtastgeschwindigkeiten			
		Langsam (L)	Mittel (M)	Schnell (S)	Variabel (V)
Ellwangen Stuckdecke	P1	H/R	H/R	H/R	
	P2	H/R	H/R	H/R	
	P3	H/R	H/R		H/R
Ottobeuren Hauptkuppel	37/38- 77/78				21xH/R
Straßburg Hauptportal	P1				2xH/R(N,D)
	P2			H/R(N)	H/R(D)
Geneigte Ebene	P	5xH/R F,G	5xH/R(N) F,G		

Tab. 6/46 Übersicht der für die Bestimmung des Abtastfehlers aufgezeichneten Höhenprofile

Abtastgeschwindigkeit im Modell:

L	Langsam	(1,6 mm/sec)
M	Mittel	(3,3 mm/sec)
S	Schnell	(5,0 mm/sec)
V	Variabel	(1,6 - 5,0 mm/sec)

Abtastrichtung:

H	Hinprofil	(→ + y bzw. + x)
R	Rückprofil	(→ - y bzw. - x)

Objektannäherung:

- D Details wurden abgefahren
- N Abtastung erfolgte auf ausgleichender Näherungsfläche

Z-Handradeinstellung am Stereoplanigraph C 8

- F Feintrieb
- G Grobtrieb

In Tab. 6/46 ist eine Übersicht über die durchgeführten Profilläufe gegeben. Alle Profile wurden in analoger Form gespeichert. Bei den Objektbeispielen "Ellwangen", "Ottobeuren" und "Straßburg" erfolgte die Aufzeichnung durch Schichtgravur am Profilspeichergerät Zeiss SG 1 (mit Planimat D 2), bei der Objektfläche "Ebene" durch direkte Kartierung der Profillinien am Zeichentisch des Stereoplanigraph C 8.

Die miteinander zu vergleichenden Höhenprofile wurden übereinanderkopiert, und die jeweiligen Höhendifferenzen Δz ausgemessen. Die mittleren Abtastfehler m_z wurden nach der Formel

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{[\Delta z \Delta z]}{2n}} \quad (6,23)$$

aus Doppelmessungen errechnet und in den Tabellen 6/47 bis 6/50 zusammengestellt. Die Zahlenwerte gelten in (mm) am Objekt. Zur Überprüfung der Neigungsabhängigkeit des Abtastfehlers wurde teilweise zwischen flachen (FL) und steilen (ST) Objektzonen unterschieden. Systematische Fehler zwischen Hin- und Rücklauf wurden bei den Fehlerbetrachtungen nicht explizit erwähnt.

Profil	Abtastgeschwindigkeiten														
P1	M-M	L-M	L-L	L-S	S-S										
H-R	14		12		20										
H-H		17		16											
R-R		9		10											
P2	M-M	L-M	L-L	L-S	S-S										
H-R	11		7		13										
H-H		8		12											
R-R		6		9											
P3	V - V			L - V			L - L			L - M			M - M		
	FL	ST	Ø	FL	ST	Ø	FL	ST	Ø	FL	ST	Ø	FL	ST	Ø
H-R	6	21	16				5	13	9				8	20	15
H-H				4	12	9				6	17	13			
R-R				4	14	10				4	20	14			

Tab. 6/47 Mittlere Höhenabtastfehler m_z (mm) am Objekt
 Vergleich von Hin- und Rückprofilen (H-H, R-R, H-R)
 beim Abtasten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten
 (Langsam (L), Mittel (M), Schnell (S), Variabel (V))
 bei flachen (FL) und steilen (ST) Objektpartien;
 Ø = durchschnittlicher Wert
 Objekt: Ellwangen, Stuckdecke

Station	1	2	3	4	5	6	7	8
m_z (mm)	49	48	52	102	180	146	85	91
Station	9	10	11	12	13	14	15	16
m_z (mm)	72	63	69	53	47	57	62	51
Station	17	18	19	20	21	22	23	24
m_z (mm)	75	97	80	139	112	62	67	28

Tab. 6/48 Mittlere Höhenabtastfehler m_z [mm] am Objekt, abgeleitet aus den Differenzen zwischen je 21 Hin- und Rückprofilen; variable Abtastgeschwindigkeit, Stationierung entsprechend den Abbildungen 6/56 und 6/57, Objekt: Ottobeuren, Hauptkuppel

Profil	Abtastversionen											
	D - D			D - N			N - N			N - N		
P1	FL	ST	∅	FL	ST	∅	FL	ST	∅	FL	ST	∅
H-R	17	120	85				24	77	57	10	87	62
H-H				36	159	115	6	61	43			
R-R				38	93	71	23	66	50			
P2	D - D			D - N			N - N					
	FL	ST	∅	FL	ST	∅	FL	ST	∅			
H-R	22	82	60				57	55	56			
H-H				50	86	70						
R-R				67	99	84						

Tab. 6/49 Mittlere Höhenabtastfehler m_z [mm] am Objekt, Vergleich von Hin- und Rückprofilen (H-H, R-R, H-R) beim Abtasten mit und ohne Detailnachführung (D-D, N-N, D-N), variable Abtastgeschwindigkeit, steile (ST) und flache (FL) Objektarten; ∅ = durchschnittlicher Wert
Objekt: Straßburg, Hauptportal

Handrad-Einstellung	Abtastgeschwindigkeit	
	Langsam	Mittel
Feintrieb	9	8
Grobtrieb	10	13

Tab. 6/50 Mittlere Höhenabtastfehler m_z (mm) am Objekt (als Abweichungen zum Soll-Profil Gerade), Vergleich der Handradeinstellungen "Feintrieb" und "Grobtrieb" bei unterschiedlicher Abtastgeschwindigkeit;

Objekt: Geneigte Ebene (Abb. 9/1)

Die Zahlenwerte der mittleren Höhenabtastfehler beziehen sich auf die jeweiligen Aufnahmeverhältnisse. Um die Fehleraussagen miteinander vergleichen zu können, wird im folgenden auf relative Fehler ($^{\circ}/_{\infty} \cdot Z$) übergegangen. Das Basisverhältnis in der terrestrischen Photogrammetrie (z.B. $\theta = 0,05$ bis $0,25$) ist in der Regel kleiner als bei der Luftaufnahme. Deshalb werden die relativen Höhenfehler zusätzlich auf ein Basisverhältnis von $\theta_0 = 0,60 \approx 1:1,66$ (für Weitwinkelaufnahmen bei 60 % Längsüberdeckung) umgerechnet, um sie mit den in der Luftbildmessung gebräuchlichen Werten vergleichen zu können. Die tatsächlichen sowie die umgerechneten Höhengenaugigkeiten sind in Tab. 6/51 für die einzelnen Objekte zusammengestellt.

Objekt	Profilversion	Z (m)	θ	m_z (mm)	m_z ($^{\circ}/_{\infty} \cdot Z$)	
					bei θ	bei θ_0
Ellwangen Stuckdecke	P1	6,6	0,18	10	1,5	0,44
	P2	6,6	0,18	15	2,2	0,66
	P3 FL	6,6	0,18	5	0,8	0,25
	P3 ST	6,6	0,18	17	2,6	0,78
Ottobeuren Hauptkuppel	FL	29,0	0,04	58	2,0	0,14
	ST	29,0	0,04	119	4,1	0,28
Straßburg Hauptportal	P1 FL	20,0	0,06	25	1,2	0,12
	P1 ST	20,0	0,06	100	5,0	0,50
	P2 FL	20,0	0,06	52	2,6	0,26
	P2 ST	20,0	0,06	82	4,1	0,41
Ebene	Neigung 30 ^g	9,0	0,13	10	1,1	0,24
Ellwangen Ebene	statische Aufsetzge- nauigkeit	6,6	0,18	2	0,3	0,09
		9,0	0,13	4	0,4	0,10

Tab. 6/51 Mittlere Höhenabtastfehler m_z in $^{\circ}/_{\infty}$ der Aufnahmeentfernung, bezogen auf das jeweilige Basisverhältnis θ sowie umgerechnet auf $\theta_0 = 0,6$.

Der mittlere, auf ein Basisverhältnis von $\theta_0 = 0,6$ umgerechnete Höhenabastfehler entspricht bei flachen Objektpartien ca. 0,2 ‰, bei steilen Zonen oder stark gekrümmten Profillinien ca. 0,6 ‰ der Aufnahmeentfernung. Im Durchschnitt beträgt die mittlere relative Profilhöhen Genauigkeit etwa 0,4 ‰ der Aufnahmeentfernung.

Die statische Aufsetzgenauigkeit wurde an den Objekten "Stuckdecke Ellwangen" und "Geneigte Ebene" untersucht. Sie betrug beim Beispiel "Ellwangen" ca. 70 μm im Modellmaßstab 1:30, d.h. etwa 2 mm am Objekt. Aus den Genauigkeitsuntersuchungen an der "Geneigten Ebene" ergab sich ein mittlerer Aufsetzfehler von 3,8 mm. Reduziert man beide Werte auf das Basisverhältnis $\theta_0 = 0,6$, so erhält man eine statische Aufsetzgenauigkeit von 0,1 ‰ der Aufnahmeentfernung.

Sowohl die statische als auch die dynamische Höhengenaugigkeit (0,1 ‰ bzw. 0,4 ‰ der Aufnahmeentfernung) sind in Übereinstimmung mit den aus der Luftbildmessung bekannten Werten (KONECNY /74/), d.h. die Genauigkeitsparameter sind im allgemeinen vergleichbar. Die Höhenfehler wurden in der bisherigen Untersuchung ausschließlich als zufällige Fehler angesehen. Über das systematische Verhalten wird in Abschnitt 6.3.4 berichtet.

6.3.2 Beispiele für die Auswirkung von Höhenabastfehlern auf das Orthophoto sowie auf Schichtliniendarstellungen

Die bei der Modellabtastung entstehenden Höhenfehler verursachen eine falsche Projektionsentfernung bei der Differentialverzerrung, was zu radialen Lagefehlern im Orthophoto führt. Diese Versetzungen werden in den folgenden Beispielen (Abbildungen 6/52 bis 6/55) demonstriert.

Der Höhenabastfehler wirkt sich außerdem auf eine (aus Profilen abgeleitete) Höhendarstellung durch Schichtlinien aus. Der stetige Höhenlinienverlauf wird in den mit Abastfehlern behafteten Profilen gestört, die Schichtlinien erfahren Lageversetzungen in Profilrichtung. Beispiele für diese Fehlerauswirkung werden in den Abbildungen 6/52 bis 6/54 gegeben. Die gezeigten Schichtlinien entstanden am "Elektronischen Höhenlinienzeichner HLZ" des Orthoprojektors Zeiss GZ 1 während der Orthophoto-Herstellung.

In Abb. 6/52 ist ein Ausschnitt des Orthophotos "Straßburg, Hauptportal" mit dem dazugehörigen Schichtlinienplan wiedergegeben.

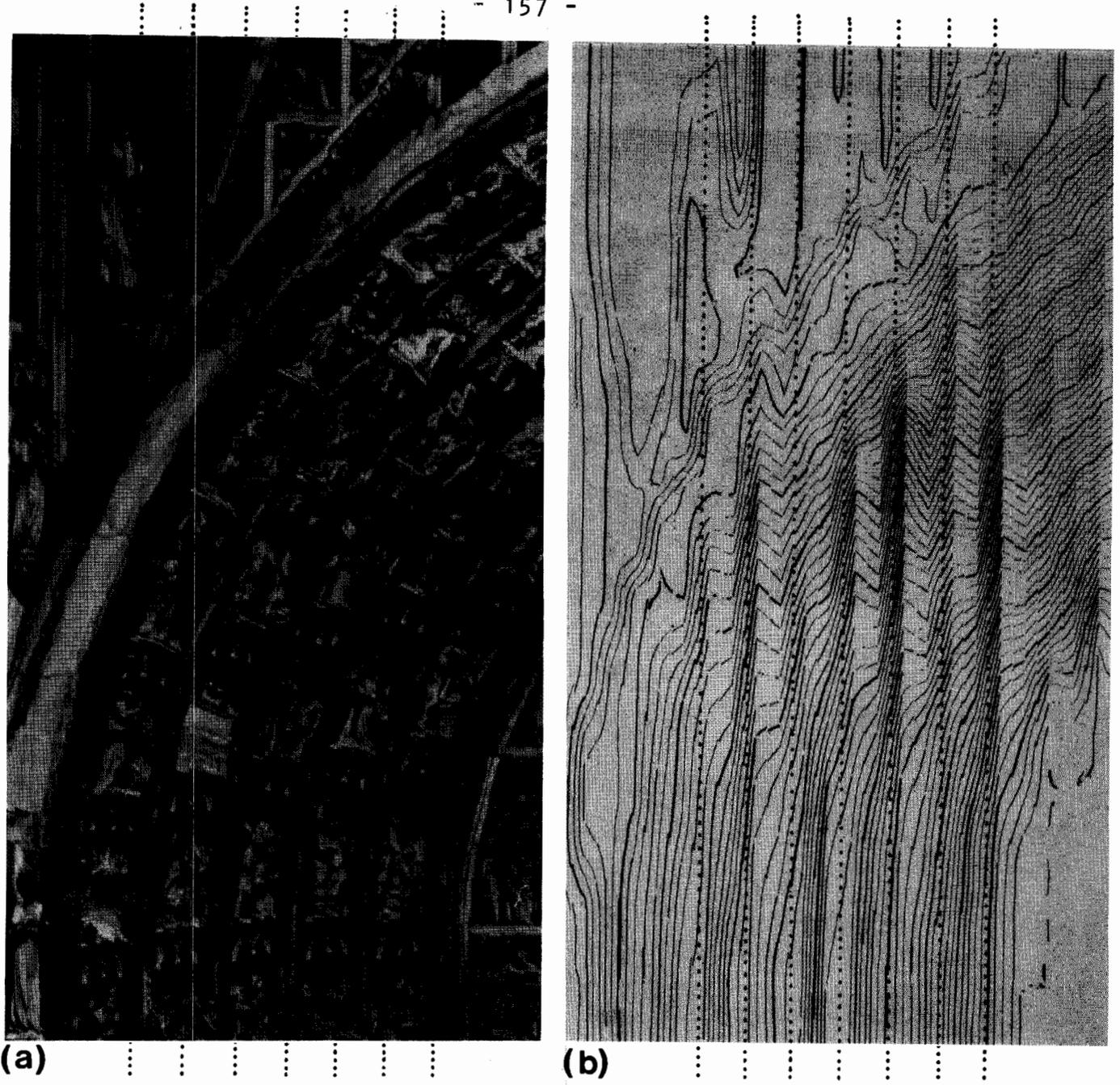


Abb. 6/52 Beispiel für Lageversetzungen im Orthophoto und im Schichtlinienplan, verursacht durch Höhenabtastfehler

(a) Orthophoto 1:40, $\Delta x = 2 \text{ mm}$

(b) Schichtlinien, Äquidistanz: 5 cm

hervorgehobene Linien: 25 cm

..... durch Abtastfehler gestörte Profile

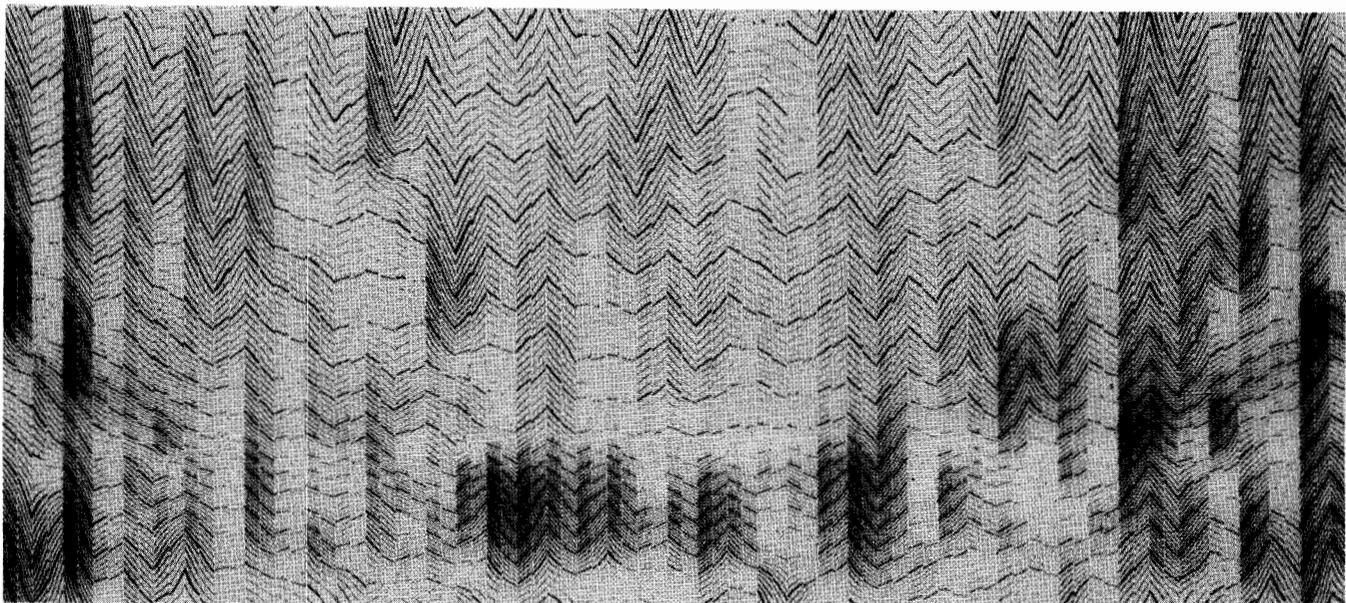
Objekt: Straßburger Münster, Hauptportal

Aus den Lageversetzungen der Schichtlinien wurde (bei einer Objektneigung von 65° in y-Profilrichtung) ein maximaler Höhenfehler von ca. 25 cm am Objekt abgeleitet. Dieser Höhenfehler hat bei einer Aufnahmeentfernung von 20,0 m und einer y-Entfernung von 8,4 m zum Nadirpunkt einen y-Lagefehler von 10 cm am Objekt, d.h. eine Versetzung von 2,5 mm im Orthophoto (1:40) zur Folge.

Die Abbildungen 6/53 und 6/54 zeigen Ausschnitte aus einem Orthophoto und dem dazugehörigen Schichtlinienplan (jeweils im Maßstab 1:58) der Hauptkuppel der Klosterkirche Ottobeuren:



(a)



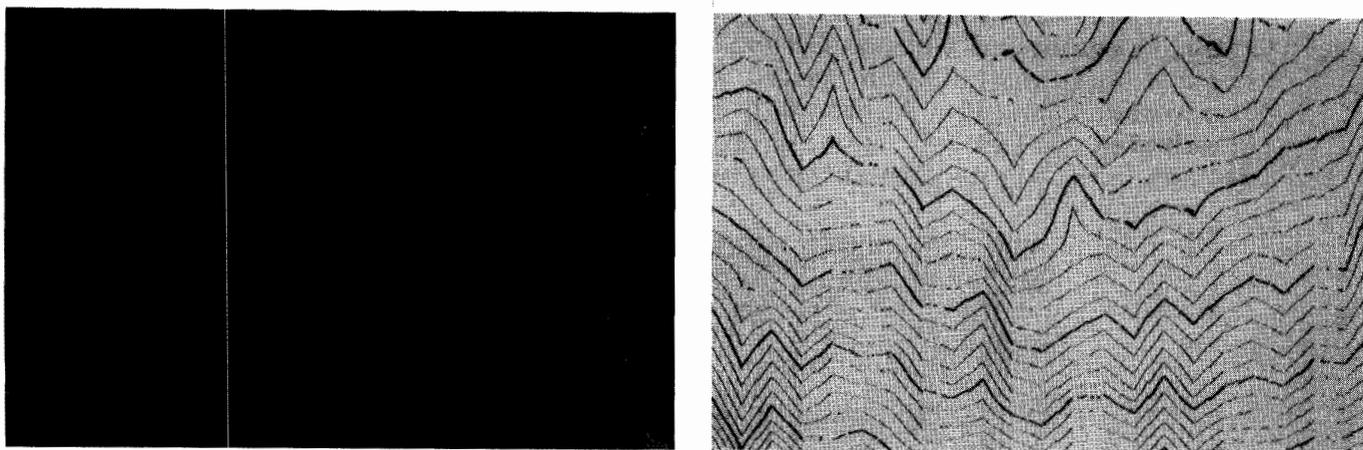
(b)

Abb. 6/53 Beispiel für Lageversetzungen im Orthophoto und im Schichtlinienplan, verursacht durch Höhenabtastfehler

(a) Orthophoto 1:58, $\Delta x = 2$ mm

(b) Schichtlinien, Äquidistanz: 7 cm
hervorgehobene Linien: 35 cm

Objekt: Klosterkirche Ottobeuren, Rand der Hauptkuppel



(a)

(b)

Abb. 6/54 Beispiel für Lageversetzungen im Orthophoto und im Schichtlinienplan, verursacht durch Höhenabtastrfehler

(a) Orthophoto 1:58, $\Delta x = 2$ mm

(b) Schichtlinien, Äquidistanz: 7 cm
hervorgehobene Linien: 35 cm

Objekt: Klosterkirche Ottobeuren, Teil der Hauptkuppel

Die Angaben über die Höhenfehler bei der Auswertung der Ottobeurer Hauptkuppel wurden den Profilvergleichen (Tab. 6/48, Abb. 6/57) entnommen. Der in Abb. 6/53 dargestellte Kuppelrand liegt bei Station 5 ($R = 8,7$ m, $Z = 26,8$ m). Der mittlere Höhenfehler beträgt hier 18 cm, der Maximalfehler 56 cm am Objekt. Nach Gleichung (3,3c) ergeben sich damit folgende Lageversetzungen:

$$dr_{\text{mittel}} = \frac{8,7 \text{ m}}{26,8 \text{ m}} \cdot 18 \text{ cm} = 6 \text{ cm} \quad \text{am Objekt bzw.} \\ 1 \text{ mm im Orthophoto 1:58}$$

$$dr_{\text{max}} = \frac{8,7 \text{ m}}{26,8 \text{ m}} \cdot 56 \text{ cm} = 18 \text{ cm} \quad \text{am Objekt bzw.} \\ 3 \text{ mm im Orthophoto 1:58}$$

In Abb. 6/54 ist ein Bildausschnitt der flachen Zone (Station 10, $R = 4,2$ m, $Z = 32,5$ m) wiedergegeben. Mit einem mittleren Höhenfehler von 6,3 cm und einem Maximalfehler von 22 cm ergibt sich für diesen Bereich:

$$dr_{\text{mittel}} = \frac{4,2 \text{ m}}{32,5 \text{ m}} \cdot 6,3 \text{ cm} = 0,8 \text{ cm} \quad \text{am Objekt bzw. 0,1 mm} \\ \text{im Orthophoto 1:58}$$

$$dr_{\text{max}} = \frac{4,2 \text{ m}}{32,5 \text{ m}} \cdot 22 \text{ cm} = 3 \text{ cm} \quad \text{am Objekt bzw. 0,5 mm} \\ \text{im Orthophoto 1:58}$$

Der hier angegebene Lagefehler ist auf Grund des kleineren Höhenfehlers (mittlere Hangzone statt Steilrand) und des ebenfalls kleineren Bildwinkels etwa um den Faktor 6 geringer als im Beispiel aus Abb. 6/53.

Für ein weiteres Beispiel soll der Höhenabtastfehler dZ aus den Lageversetzungen dr im Orthophoto bestimmt werden. In Abb. 6/55 ist ein Ausschnitt von einem Orthophoto aus Schloß Linderhof wiedergegeben. Um den Abtastfehler gegenüber dem Verfahrensfehler (Abschnitt 6.1.1.4) hervortreten zu lassen, wurde die Orthoprojektion mit einer Streifenbreite von $\Delta x = 2/3$ mm durchgeführt.

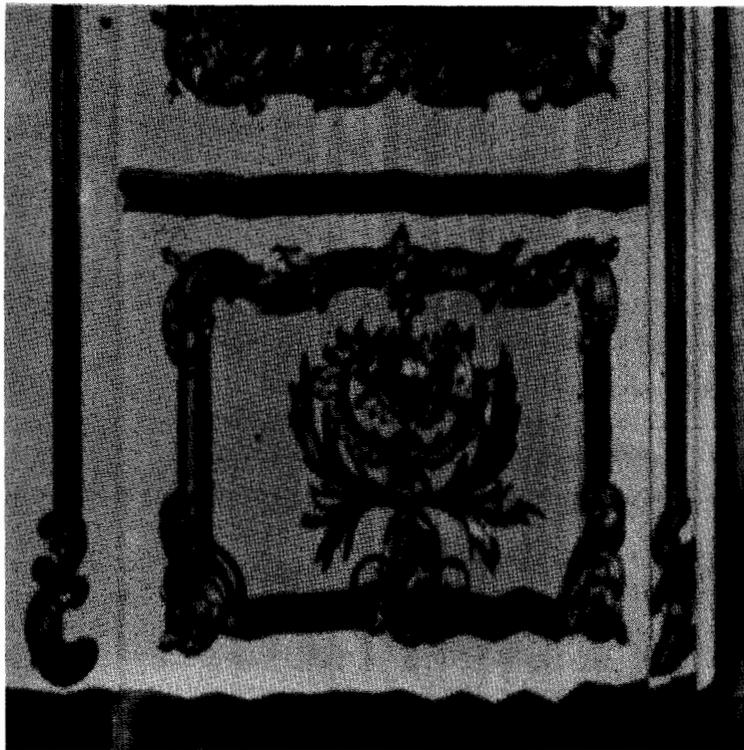


Abb. 6/55 Beispiel für Lageversetzungen im Orthophoto (1:10,5), vorwiegend verursacht durch Höhenabtastfehler
Objekt: Schloß Linderhof, Speisezimmer

Der maximale radiale Lagefehler beträgt an der im Bild dargestellten Leiste $dr_{\max} = 1$ mm, was am Objekt einem Fehler von 10,5 mm entspricht. Nach Gleichung (3,3c) ergibt sich bei einer Aufnahmeentfernung von $Z = 5,4$ m und einem Radialabstand von $R = 2,2$ m der maximale Höhenfehler am Objekt zu:

$$d_{Z_{\max}} = \frac{5,4 \text{ m}}{2,2 \text{ m}} \cdot 10,5 \text{ mm} = 25 \text{ mm}.$$

Dieser Wert entspricht etwa 4,6 ‰ der Aufnahmeentfernung. Er reduziert sich bei Umrechnung auf das Basisverhältnis $\theta_0 = 0,6$ auf $dZ/Z = 0,57$ ‰. Nimmt man an, daß der mittlere Fehler ungefähr 1/3 des Maximalfehlers beträgt, so bekommt man als mittleren Höhenabtastfehler etwa $dZ/Z = 0,2$ ‰, was für die Abtastung einer nicht geneigten Fläche plausibel erscheint.

Die praktischen Beispiele haben gezeigt, daß die bei der Modellabtastung architektonischer Flächen entstehenden Höhenfehler im Orthophoto Lageversetzungen bis zu mehreren Millimetern verursachen können. Die Reduzierung dieser Fehler ist daher eine wichtige Aufgabe bei der Planung von Aufnahme und Auswertung.

Die Ergebnisse der Profiluntersuchungen (Tabellen 6/47 bis 6/51) lassen eine Abhängigkeit des Abtastfehlers von der Objektneigung (insbesondere von Neigungswechseln), von der Abtastgeschwindigkeit, der Abtastrichtung und der räumlichen Detailstruktur der Fläche vermuten. Diese Zusammenhänge werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

6.3.3 Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Objektneigung bzw. -krümmung

Am Beispiel "Ottobeuren, Hauptkuppel" kann der Zusammenhang zwischen Objektneigung und Abtastfehler graphisch veranschaulicht werden. Abb. 6/56 zeigt einen Teil der übereinander kopierten Hin- und Rückprofile. Da der seitliche Abstand der Profillinien am Objekt nur 23 cm beträgt, ist der Höhenunterschied der Sollprofile zwischen Hin- und Rücklauf vernachlässigbar. In Abb. 6/57 sind die über 21 Doppelprofile gemittelten Höhendifferenzen für die Stationen 1 - 24 (aus Tab. 6/48) in einem Diagramm aufgetragen.

Wie aus den folgenden Abbildungen 6/56 und 6/57 zu ersehen ist, hängt der Höhenabtastfehler sehr stark von den Objektneigungen in Profilrichtung ab. Dabei wechselt das Vorzeichen jeweils zwischen Hin- und Rückprofil. Ordnet man die Stationen 1 - 3, 9 - 17 und 22 - 24 in eine "flache Zone (FL)" und die Stationen 4 - 8 und 18 - 21 in eine "steile Zone (ST)" ein, so ergibt sich als Verhältnis der Zonenmittel ($m_z(\text{FL}) = 58 \text{ mm}$, $m_z(\text{ST}) = 119 \text{ mm}$) des Abtastfehlers der Faktor 2. Der Maximalfehler tritt am Kuppelrand bei stärkster Flächenneigung auf und erreicht in diesem Beispiel mit $m_z = 180 \text{ mm}$ das 3-fache des mittleren Abtastfehlers für flaches Gebiet.

Die Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Objektneigung ist auch aus den übrigen Profilaufzeichnungen ersichtlich. Beim Vergleich der mittleren Höhenabtastfehler am Objektbeispiel "Ellwangen, Stuckdecke" (aus Tab. 6/47) ergibt sich zwischen den "flachen" Profilen P2 (maximale Neigung 20° , $m_z = 10 \text{ mm}$) und den "steilen" Profilen P1 (maximale Neigung 60° , $m_z = 15 \text{ mm}$) der Faktor 1,5.

Die Profilgruppen "Ellwangen P3" und "Straßburg P1, P2" unterscheiden sich von den bisherigen Profilen durch Unstetigkeiten und plötzliche Höhensprünge. So erhält der Faktor zwischen "flachen" und "steilen" Zonen beim Versuch "Ellwangen P3" im Mittel den Wert 3 und bei "Straßburg P1" den Wert 4.

Die Abtastgeschwindigkeit bei den Profilen "Straßburg P2" war mit ca. 5 mm/sec im Modell bzw. 50 cm/sec am Objekt bereits so groß, daß eine Generalisierung der Objektstruktur vorgenommen werden mußte. Daher ist hier kein Vergleich zwischen "flachen" und "steilen" Teilen möglich. Bei langsamer, detailgebundener Abtastung ergab sich in den starken Krümmungszonen ein gegenüber den ebenen Flächenstücken etwa 4-facher Höhenfehler.

Die Versuche haben gezeigt, daß eine Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Objektneigung und ganz besonders von der Objektkrümmung gegeben ist. Plötzliche Neigungs- und Krümmungswechsel verursachen beträchtliche Höhenfehler.

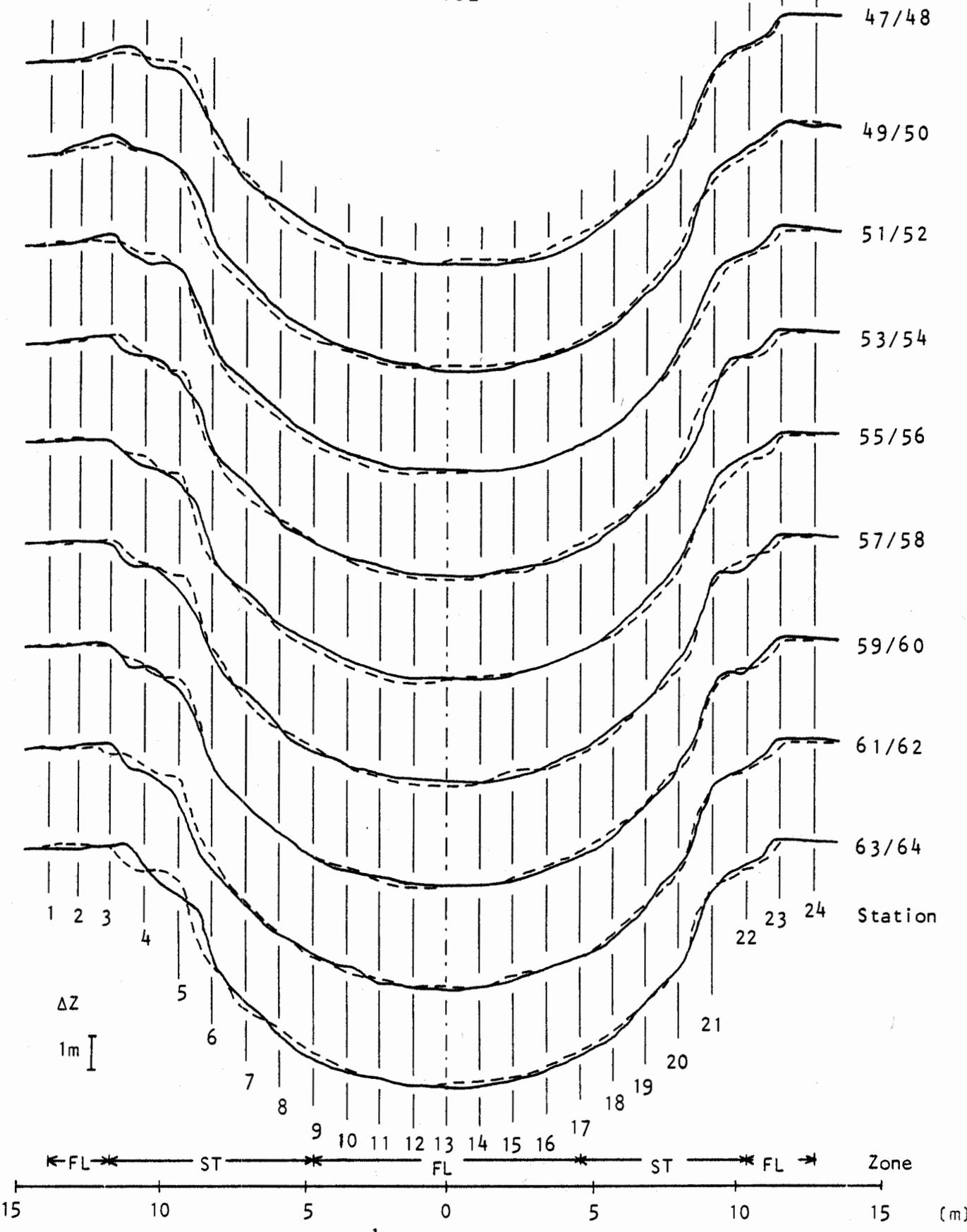


Abb. 6/56 Höhenprofile (47/48 bis 63/64) der Modellabtastung "Ottobeuren, Hauptkuppel"

FL = Flache Zone —————> = Hinprofil
 ST = Steile Zone <----- = Rückprofil

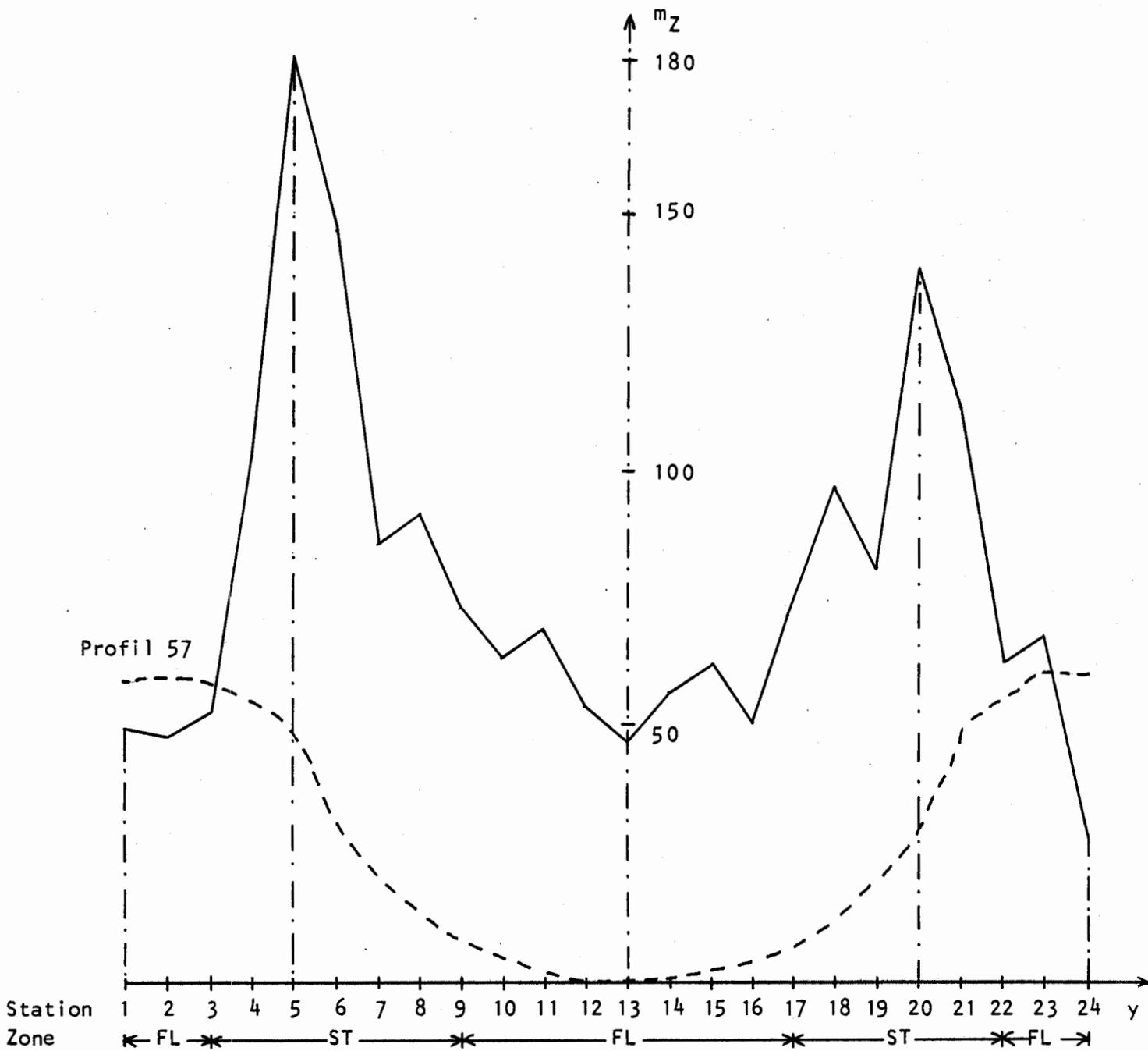


Abb. 6/57 Mittlere Höhendifferenzen mz zwischen Hin- und Rückprofil in [mm] am Objekt in Abhängigkeit von der Stationierung im y -Profil (Mittelwerte aus 21 Doppelprofilen, Nr. 37/38 bis 77/78) — — — Höhenprofil in Kuppelmitte.

Analoge Zusammenhänge wurden für die Modellabtastung im topographischen Bereich von HAMPEL /44/, HOBBIÉ /55/, MEIER /89/, NEUBAUER /104/, SCHNEIDER /113/ und VISSER /134/ aufgestellt. In allen Untersuchungen wurde eine etwa lineare Beziehung zwischen dem Tangens der Geländeneigung in Profilrichtung und dem Höhenabtastfehler abgeleitet. Ein ähnliches Verhältnis ergab der Höhenvergleich an der "Hauptkuppel Ottobeuren" (Abb. 6/57). Bei starken Reliefsprüngen und plötzlichen Objektkrümmungen wird dieser lineare Zusammenhang verlassen, was auch in den erwähnten Arbeiten zum Ausdruck kam.

6.3.4 Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Oberflächenstruktur

Am Beispiel der Auswertung der "Stuckdecke Ellwangen" soll das systematische Verhalten des Höhenabtastfehlers beim Abfahren stark gegliederter Oberflächen verdeutlicht werden (Abb. 6/58).

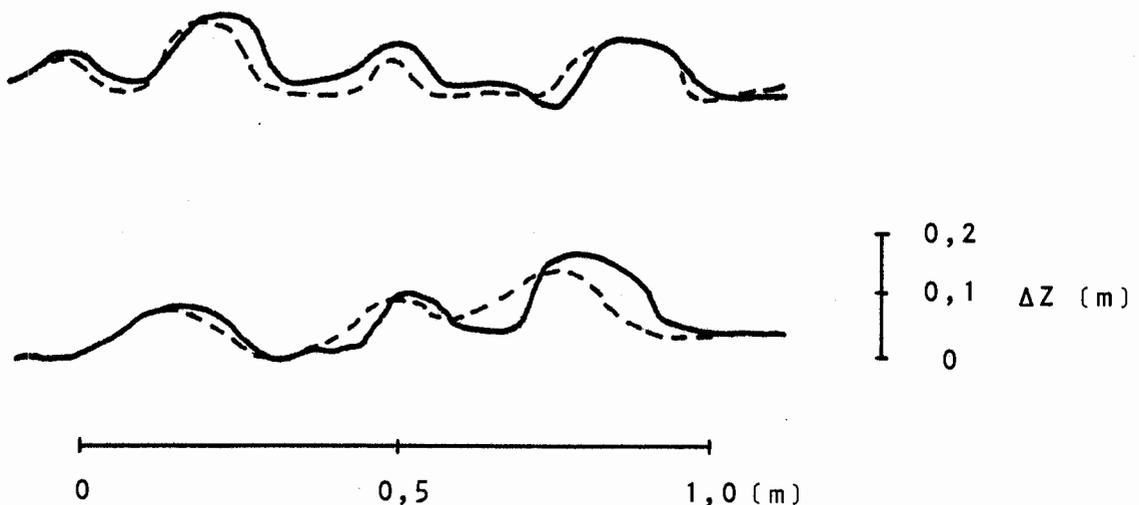


Abb. 6/58 Schleppefehler bei stark gegliederten Oberflächen, 10-fache Vergrößerung der analog aufgezeichneten Höhenprofile (Ausschnitt), Maßstab 1:12

————— Hinprofil ← - - - Rückprofil

Objekt: Stuckdecke Ellwangen

Wie Abb. 6/58 zeigt, entstehen beim Abtasten stark strukturierter Oberflächen Nachlauffehler im Profil. Im Nachbarstreifen treten entsprechende Versetzungen in der Gegenrichtung auf. Obwohl die abgebildeten Höhenprofile mit einer Geschwindigkeit von nur 2 mm/sec im Modell, d.h. ca. 6 cm/sec am Objekt abgetastet wurden, ergaben sich Höhenfehler von bis zu 5 cm an der Oberfläche. Liegen diese fehlerhaften Partien am Bildrand, so treten entsprechend große Lageversetzungen auf.

Durch Vernachlässigung der auf ebenen oder gekrümmten Grundflächen aufgetragenen Details lassen sich die systematischen Nachlauf-
fehler weitgehend ausschalten. So können beim Abfahren reichhaltig
verzierter Stuckpartien oder plastisch gestalteter Wände die auf-
gesetzten Leisten oder Figuren ignoriert werden. Die Meßmarke wird
dabei vom Operateur auf der Grundfläche weitergeführt. Dasselbe
geschieht beim Abtasten großmaßstäbiger Luftbilder. Die aus der
Geländeoberfläche herausragenden Objekte (Häuser, Bäume) werden
bei der Erfassung der Höhenprofile in der Regel nicht berücksich-
tigt. Sie unterliegen weiterhin der Zentralperspektive und werden
teilweise verzerrt bzw. versetzt wiedergegeben, was an Hand von
Abb. 6/59 demonstriert werden soll.

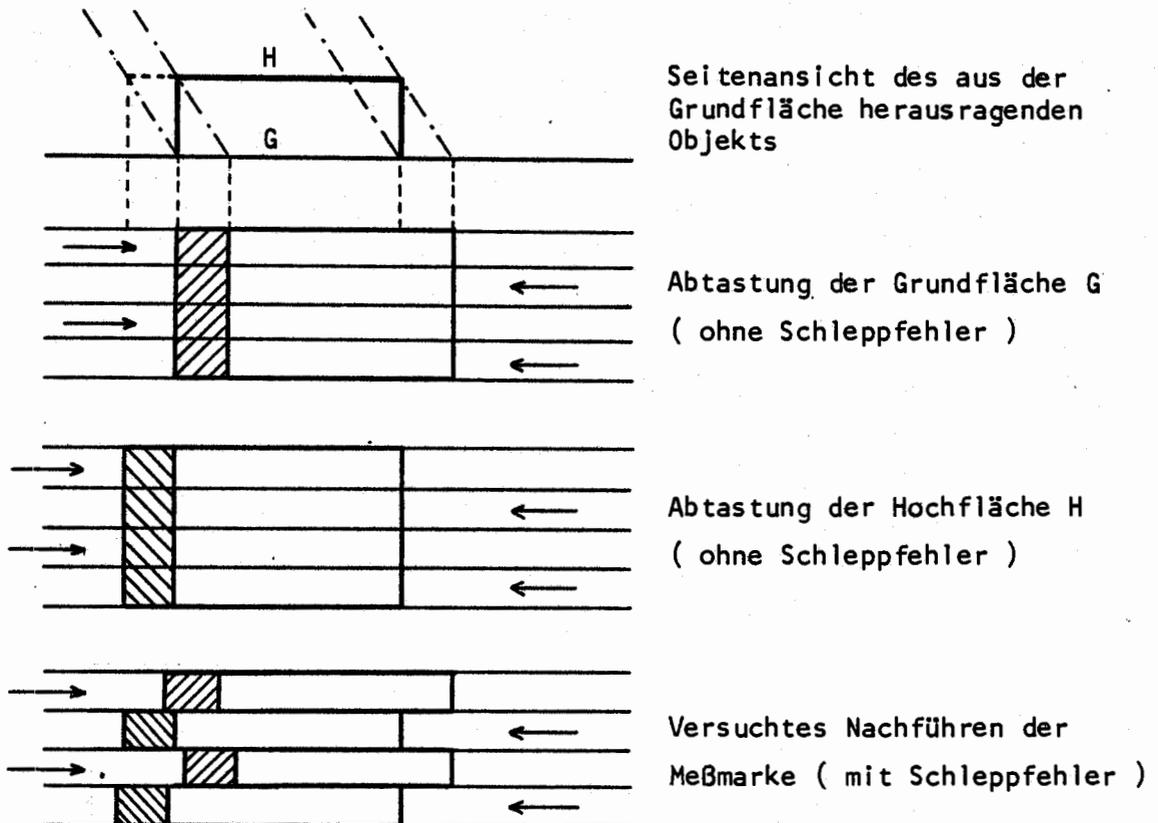


Abb. 6/59 Lageversetzungen bei unterschiedlicher Höhennachführung an Objekten, die aus der Grundfläche herausragen

Die absoluten Höhenfehler beim Abtasten der Grundfläche sind im allgemeinen nicht kleiner als bei versuchter Detailnachführung. Entsprechende Zahlenwerte können aus Tab. 6/49 für die Profilabtastung am Objekt "Straßburg Hauptportal" abgelesen werden. Der mittlere Höhenfehler bei vollständiger Detailnachführung beträgt hier im Mittel ± 74 mm am Objekt, bei Vernachlässigung der stark gegliederten Steinfiguren dagegen ± 87 mm. Die vor oder hinter der gewählten Grundfläche liegenden Verzierungen (Figuren, Konsolen) werden beim generalisierenden Abtasten jedoch als homogene Details wiedergegeben, wodurch optisch ein verbesserter Eindruck entsteht, was besonders bei Verwendung der Orthophotos als Photokarten wichtig ist.

Allerdings muß die abzutastende Grundfläche sorgfältig ausgewählt und beim Hin- und Rückfahren in gleicher Weise angehalten werden. Zum Beispiel erfolgte die Abtastung des Straßburger Hauptportals (Abbildungen 6/10 und 6/52) in der Tiefe der Zwischendienste, was dazu führte, daß die aus der Grundfläche herausragenden Baldachinkonsolen zentralperspektivisch (d.h. gekrümmt) abgebildet wurden. Dieses Ergebnis ist irreführend. Die Abtastfläche hätte in den Zwischenbereichen ausgleichend (jedoch ohne Nachführung sämtlicher Reliefdetails) über die Figuren gelegt werden sollen.

6.3.5 Abhängigkeit des Höhenabtastfehlers von der Abtastgeschwindigkeit

In den bereits erwähnten Untersuchungen zur Höhengenaugigkeit der Profilabtastung (HOBBIE /55/, MEIER /89/, NEUBAUER /104/, SCHNEIDER /113/) befinden sich sehr unterschiedliche Angaben über die Abhängigkeit des Abtastfehlers von der Profilgeschwindigkeit. Im Mittel ist ein nahezu linearer Zusammenhang gegeben, der aber erst bei stärkeren Geländeneigungen bzw. -krümmungen signifikant wird. Auch die in dieser Arbeit vorliegenden Versuche zur Erfassung der Oberfläche architektonischer Objekte lassen eine Beziehung zwischen Höhenfehler und Fahrgeschwindigkeit erkennen.

Für die Objekte "Ellwangen, Stuckdecke" und "Geneigte Ebene" wurden die bei langsamer (L:1,6 mm/sec), mittlerer (M:3,3 mm/sec), schneller (S:5,0 mm/sec) und variabler Profiliergeschwindigkeit erhaltenen mittleren Höhenabtastfehler (aus den Tabellen 6/47 und 6/50) in Tab. 6/60 einander gegenübergestellt.

Profilversion	Abtastgeschwindigkeiten					
	L - L	M - M	S - S	L - M	L - S	
Ellwangen P1	12	<	14	<	20	9 < 10
Ellwangen P2	7	<	11	<	13	8 < 12 6 < 9
Ellwangen P3	L - L	V - V		L - V	L - M	9 < 13 10 < 14
	9	<	16			
Geneigte Ebene (Z-Grobtrieb)	L		M			10 < 13

Tab. 6/60 Vergleich der mittleren Höhenabtastfehler m_z (mm) am Objekt bei langsamer (L), mittlerer (M), schneller (S) und variabler (V) Abtastgeschwindigkeit;
Objekte: Ellwangen, Stuckdecke; Geneigte Ebene

Aus der Übersicht (Tab. 6/60) ist eine Erhöhung des Abtastfehlers bei größerer Fahrgeschwindigkeit abzulesen. Auch die Kombinationen Langsam - Mittel bzw. Langsam - Schnell lassen diese Tendenz erkennen. Für die Festlegung einer funktionalen Beziehung sind die Angaben allerdings nicht ausreichend.

6.3.6 Maßnahmen zur Reduzierung des Höhenabstastfehlers

Wie schon in Abschnitt 4.1.2 gezeigt wurde, hat der Tangens des projizierenden Winkels einen linearen Einfluß auf die Größe der Lageversetzungen. Durch die Wahl einer schmalwinkligen bzw. langbrennweitigen Kamera kann dieser Einfluß bereits bei der photogrammetrischen Aufnahme klein gehalten werden.

Die Abtastgeschwindigkeit sollte der Objektstruktur angepaßt sein. Stark geneigte oder gekrümmte Flächen erfordern ein entsprechend langsames Abtasten (ca. 2 mm/sec im Modell). Um nun (aus Wirtschaftlichkeitsgründen) diese reduzierte Geschwindigkeit nicht im ganzen Modell beibehalten zu müssen, sollte eine Veränderung während des Profillaufs möglich sein. Das gilt auf Grund der räumlichen Gliederung in besonderem Maße für die Auswertung architektonischer Objekte.

Einige Orthoprojektionssysteme besitzen bereits eine Einrichtung zur Steuerung der Abtastgeschwindigkeit. Im off-line-Betrieb (z.B. Zeiss GZ 1 mit Speicher- und Lesegerät, Wild Avioplan OR 1) wirkt die Veränderung der Profiliergeschwindigkeit keine Probleme auf, da Abtastung und Orthoprojektion zeitlich getrennt sind. Die Belichtung des Orthophotos erfolgt in jedem Fall mit konstanter Blendengeschwindigkeit.

Allerdings kann die Abtastung beim Zeiss-System nicht beliebig verlangsamt werden. Das Abfahren von extrem geneigten Steilflächen ist dadurch nicht möglich. Auch die Anordnung der beiden Photozellen im Lesegerät sowie die mechanische Trägheit der z- Traverse des Orthoprojektors gestatten keine abrupten Höhengsprünge. Diese Beschränkungen lassen beim Operator eine gewisse Unsicherheit aufkommen, weil beim Abtastvorgang noch nicht abzusehen ist, ob die Photozelle des Lesegerätes den aufgezeichneten Höhengsprung nachvollziehen kann. Aus diesem Zweifel heraus ist der Operator geneigt, steile Partien bei der Abtastung auszugleichen, was jedoch zwischen Hin- und Rückprofil nicht immer gleichmäßig erfolgen kann.

Eine kontinuierliche Veränderung der Abtastgeschwindigkeit ist auch bei einigen on-line-Systemen möglich. Bei den Orthoprojektoren Wild PPO 8 und Jenoptik Topocart-Orthophot wird die auf das Orthophoto auffallende Lichtenergie mit Hilfe eines Graukeils reguliert.

Auf eine Besonderheit beim Profilieren mit variabler Geschwindigkeit soll in diesem Zusammenhang hingewiesen werden. Das Abtasten geneigter Ebenen geschieht in der Regel mit konstanter Geschwindigkeit und gleichförmiger Bewegung des z-Handrades am Stereoauswertegerät. Bei stetig gekrümmten Flächen kann die Geschwindigkeit ebenfalls konstant gehalten werden, während die z-Nachführung durch gleichmäßige Beschleunigung oder Verzögerung der Handradbewegung erfolgt. Bessere Ergebnisse der Modellannäherung werden jedoch erzielt, wenn das z-Handrad gleichförmig bewegt und der Vorschub mit Hilfe des Geschwindigkeitsreglers entsprechend variiert wird. Generell sollte vor jeder Auswertung das Modell durch Probepprofile "erforscht" werden, um eine optimale Abstimmung der Fahrgeschwindigkeit auf die jeweiligen Krümmungsverhältnisse zu erreichen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Abtastfehlers ist, wie bereits erwähnt, die Generalisierung der Oberflächenstruktur. Vor allem ungeübte Auswerter versuchen bisweilen, jedes Detail nachzufahren. Dadurch entstehen unruhige Höhenprofile und als Folge davon unregelmäßige Lageversetzungen im Orthophoto. Besitzt das Objekt Zonen unterschiedlicher Tiefe, so sollten die einzelnen Teilflächen separat umgebildet und dann mosaikartig zusammengesetzt werden. Ein jeweiliges Nachführen der Meßmarke würde zu längeren Abtastzeiten und größeren Höhenabtastfehlern führen.

Bei digitaler Speicherung und Verarbeitung der Höhenprofile kann der systematische Anteil des Abtastfehlers durch geeignete numerische Interpolationsverfahren näherungsweise eliminiert werden (z.B. KRAUS /75/, STANGER /127/). Liegen regelmäßige, mathematisch explizit erfaßbare Objektflächen vor, so ist es nach Messung einiger charakteristischer Parameter möglich, ein digitales Objektmodell zu erstellen, das zur Steuerung des Orthoprojektors verwendet wird. Die Modellabtastung würde hierbei weitgehend entfallen, was das Auftreten dynamischer Höhenabtastfehler von vornherein ausschließt. Als Beispiel für eine derartige Möglichkeit soll die in Abb. 6/55 dargestellte Objektfläche dienen. Durch Digitalisierung der Grundrißlinie der elliptisch gekrümmten Wandfläche wären (unter der Annahme einer regelmäßigen Zylinderfläche) die Parameter für die Umbildung gegeben. Die aus Abb. 6/55 ersichtlichen, durch Höhenabtastfehler hervorgerufenen Lageversetzungen könnten somit vermieden werden. Allerdings würden sich in diesem Objektbeispiel die Voraussetzungen der Regelfläche bereits am Rand des gezeigten Bildausschnitts verändern (siehe Abb. B/10 im Anhang).

6.4 Überlegungen zur Wahl der Abfahrriichtung

Die Richtung der Profilstreifen im photogrammetrischen Modell ist bei den meisten Orthoprojektionssystemen a priori vorgegeben. Sie verläuft in der Regel in y-Richtung, also senkrecht zur Aufnahmebasis. Drei Gründe können hierfür angegeben werden:

1. Die Modellgröße ist bei der Luftbildmessung durch die gewählte Längs- und Querüberdeckung bestimmt. Sie beträgt bei $p = 60\%$ und $q = 20\%$ Überdeckung ca. $9 \times 18 \text{ cm}^2$, d.h. die Ausdehnung in y-Richtung ist etwa doppelt so groß wie in x-Richtung. Wird die Orthoprojektion parallel zur y-Richtung durchgeführt, so ergeben sich im Modell längere Fahrstrecken und damit weniger Δx -Schritte als bei Abtastung in x-Richtung. Dadurch kann eine geringe Zeitersparnis erreicht werden.
2. Bei unterschiedlichen Bildfeldhelligkeiten im Stereoauswertegerät und dynamischer Modellabtastung in Basisrichtung können auf Grund der "Reaktionszeit" des Auges x-Parallaxen auftreten. Dieser sogenannte "Fertsch-Effekt" verursacht Höhenfehler im Modell, die nach HÖBBIE /54/ bis zu $60 \mu\text{m}$ betragen können.
3. Nach Erfahrungen von Auswertern ist bei Modellabtastung in Basisrichtung die Ermüdung größer. Das mag zum einen auf die Gewöhnung an die y-Abtastrichtung zurückzuführen sein, zum anderen Teil aber an der Tatsache liegen, daß die Objektdetails von der Seite in das Blickfeld eintreten und kein "Vorausschauen" im üblichen Sinne möglich ist.

Nahezu alle Orthoprojektionssysteme arbeiten aus diesen Gründen in y-Profilrichtung. Beim Zeiss GZ 1 in on-line-Version sowie bei digital gesteuerten off-line-Orthoprojektoren (z.B. Wild Avioplan OR 1) kann dagegen die Abfahrrichtung vorgewählt werden. Es erhebt sich daher bei derartigen Geräten die Frage, in welcher Richtung für bestimmte Auswertungen die Abtastung erfolgen soll.

Die oben angeführten Argumente gelten natürlich auch hier, jedoch sollte ihnen keine allzu große Bedeutung beigemessen werden, da für Architekturauswertungen andere Faktoren eine wesentlichere Rolle spielen. Architektonische Objekte sind (abgesehen von Kuppeln) vornehmlich in x-Richtung geneigt oder gekrümmt. Dazu gehören alle Innen- und Außenwände an Gebäuden. Bei Abtastung in y-Richtung muß daher die Höhe nur von Streifen zu Streifen geändert werden. Wird in x-Richtung gefahren, so ist in jedem Profil der gesamte Neigungsbereich zu erfassen. Die Frage läuft also, abgesehen von der Bequemlichkeit des Abtastens, darauf hinaus, welche der in den vorigen Abschnitten diskutierten Fehlereinflüsse (Verfahrensfehler, Bildwanderung, Höhenabtastfehler) jeweils am ehesten vernachlässigt werden können. Die Entscheidung darüber hängt natürlich vom zur Verfügung stehenden Auswertesystem ab.

Ist im Orthoprojektor eine Umbildung 1. Ordnung oder eine entsprechende Interpolation möglich, so sollte auf jeden Fall in Richtung der Schichtlinien abgetastet werden, weil dann wegen der geringen Flächenneigung in Profilrichtung die Abtastfehler im Modell sowie die Bewegungsunschärfen im Orthophoto klein sind. Wenn aus gerätetechnischen Gründen (Entzerrung 0. Ordnung) keine Reduktion der Verfahrensfehler erfolgen kann, so ist die Abtastung in Hauptneigungsrichtung zu wählen, vorausgesetzt, daß in den Steilzonen mit kleinster Geschwindigkeit gefahren werden kann, und daß eine Herabsetzung der Blendenbreite möglich ist.

Wird auf Grund der Objektstruktur eine bestimmte Abfahrrichtung gewünscht, und ist die später zu verwendende Geräteausrüstung bekannt, so kann bereits bei der Aufnahme (z.B. durch Querstellen der Basis) eine günstigere Voraussetzung für die Auswertung geschaffen werden. Die Bedeutung der Abfahrrichtung bei doppelt gekrümmten Flächen (Kuppeln) ist gering, weil sich die Vor- und Nachteile der jeweiligen Vorzugsrichtung gegenseitig kompensieren.

6.5 Laufunterbrechung

Bei senkrechten Vorsprüngen am Objekt, wie sie in der Architektur bei Gesimsen, Balkonen, Konsolen oder Balkenwerk häufig vorkommen, ist eine kontinuierliche Abtastung nahezu unmöglich. Um beim Profilieren dem vor- oder zurückstehenden Objektteil mit der Meßmarke folgen zu können, müßte entweder die z-Handradbewegung erheblich beschleunigt oder die Abtastgeschwindigkeit stark reduziert werden. Auf jeden Fall wäre jedoch mit Bewegungsunschärfen und Lageversetzungen in Profilrichtung zu rechnen.

Ein exaktes Nachfahren des senkrechten Vorsprungs in z-Richtung wird dagegen erreicht, wenn der Profillauf an dieser Stelle unterbrochen wird. Beim Modellabtasten im Stereoauswertegerät bereitet dieses Anhalten in der Regel keine Schwierigkeiten. Während der Projektion muß jedoch bei Unterbrechung des Profillaufs die Lichtzufuhr zum Film unterbunden werden. Motor-Stop und Schließen der Blende haben dabei gleichzeitig zu erfolgen. Bei ungenügender Synchronisierung dieser Vorgänge erscheinen im Orthophoto helle oder dunkle Linien der Länge Δx (Streifenbreite) quer zur Profilirichtung.

Die Laufunterbrechung ist bisher nur bei einigen on-line-Orthoprojektoren (Zeiss C 8/D 2 - GZ 1, Jenoptik Topocart-Orthophot) nach geringfügigen Änderungen der elektrischen Schaltabläufe möglich. Das Auslösen der Laufunterbrechung geschieht beim GZ 1 durch Betätigen eines Kippschalters, der am Steuerpult angebracht ist. Im off-line-Verfahren kann der Orthoprojektor GZ 1 nicht gestoppt werden. Die Photozellen im Profil-Lesegerät sind außerdem nicht imstande, vertikale Profile zu erfassen.

Beim digital gesteuerten off-line-Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 ist eine Unterbrechung des Mäanderlaufs zunächst nicht vorgesehen. Es könnte jedoch möglich sein, durch entsprechende Impulse vom Magnetband her das Anhalten und Schließen der Blende sowie die Änderung der funktionalen Zuordnung zwischen Bild und Orthophoto zu veranlassen.

Im Orthoprojektor Kern OP 2 (Kern, Aarau /68/) wird das Orthophoto nicht kontinuierlich, sondern in aufeinanderfolgenden Δy -Schritten ($\Delta y = 1 \text{ mm}$) durch jeweiliges Blitzen belichtet. Damit kann der y-Lauf an jeder beliebigen Stelle unterbrochen werden. Allerdings ist es unwahrscheinlich, daß das Ende eines Δy -Schrittes mit der Kante des Objektvorsprungs zusammenfällt, so daß trotz der Meßmarkennachführung in z-Richtung mit y-Lageversetzungen gerechnet werden muß.

Ein praktisches Beispiel (Abb. 6/61) soll die Wirkung des Profilstops am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 (on-line) verdeutlichen.

Die in Abb. 6/61 dargestellte klassizistische Gebäudefassade wurde in y-Richtung abgetastet. Dabei wurden die vorderen Teile (Balkon, Geländer) und die dahinter liegenden Tür- und Fensterpartien in einem Arbeitsgang unter Zuhilfenahme des Haltschalters umgebildet. Selbst die einzelnen Treppenstufen konnten durch wiederholte Laufunterbrechung nachgefahren werden.

Das ständige Anhalten im Profil erfordert höchste Konzentration. Verspätete Unterbrechung führt zu unangenehmen Lageversetzungen. Aus diesem Grund wäre es bei der gezeigten Fassade sinnvoller gewesen, die vorderen und hinteren Objektteile separat umzubilden. Die Profilhöhen hätten dabei nicht laufend geändert werden müssen.



Abb. 6/61 Beispiel für eine mit ständiger y-Laufunterbrechung und gleichzeitiger Höhenveränderung umgebildete Fassade, Orthoprojektor: Zeiss GZ 1 (on-line)
Objekt: Stuttgart, Reinsburgstraße

An einem zweiten Beispiel (Wandfläche Schloß Linderhof, Speisezimmer, Abb. 6/62) soll gezeigt werden, welche Probleme bei großen Höhengsprüngen auftreten können.

Bei Abtastung in x-Profilrichtung wird die Meßmarke, von rechts kommend, an der Rahmenleiste (R) angehalten und in z-Richtung auf die Türfläche (bei T) aufgesetzt, wo der x-Profillauf fortgesetzt wird. Im Rückprofil fehlt dagegen die "Absprungmarke" T an der Türfläche, so daß die Meßmarke meist zu frühzeitig oder zu spät (z.B. erst an der Stelle S) abgehoben wird. Wie Abb. 6/62 (b) zeigt, entstehen durch diese Profilierfehler beträchtliche Lageversetzungen im Orthophoto. Derartig große Höhengsprünge sollten also (auch bei Vorhandensein von Profilstopmechanismen) nicht nachgefahren werden. Eine Umbildung in Teilflächen liefert in der Regel die besseren Ergebnisse.

Für das Abtasten kleiner Vorsprünge (Leisten, Konsolen, Gesimse) ist dagegen die Laufunterbrechung von Vorteil. Daher sollte diese Einrichtung bei Orthoprojektionsgeräten, die zur Umbildung architektonischer Objekte eingesetzt werden, auf jeden Fall gegeben sein.

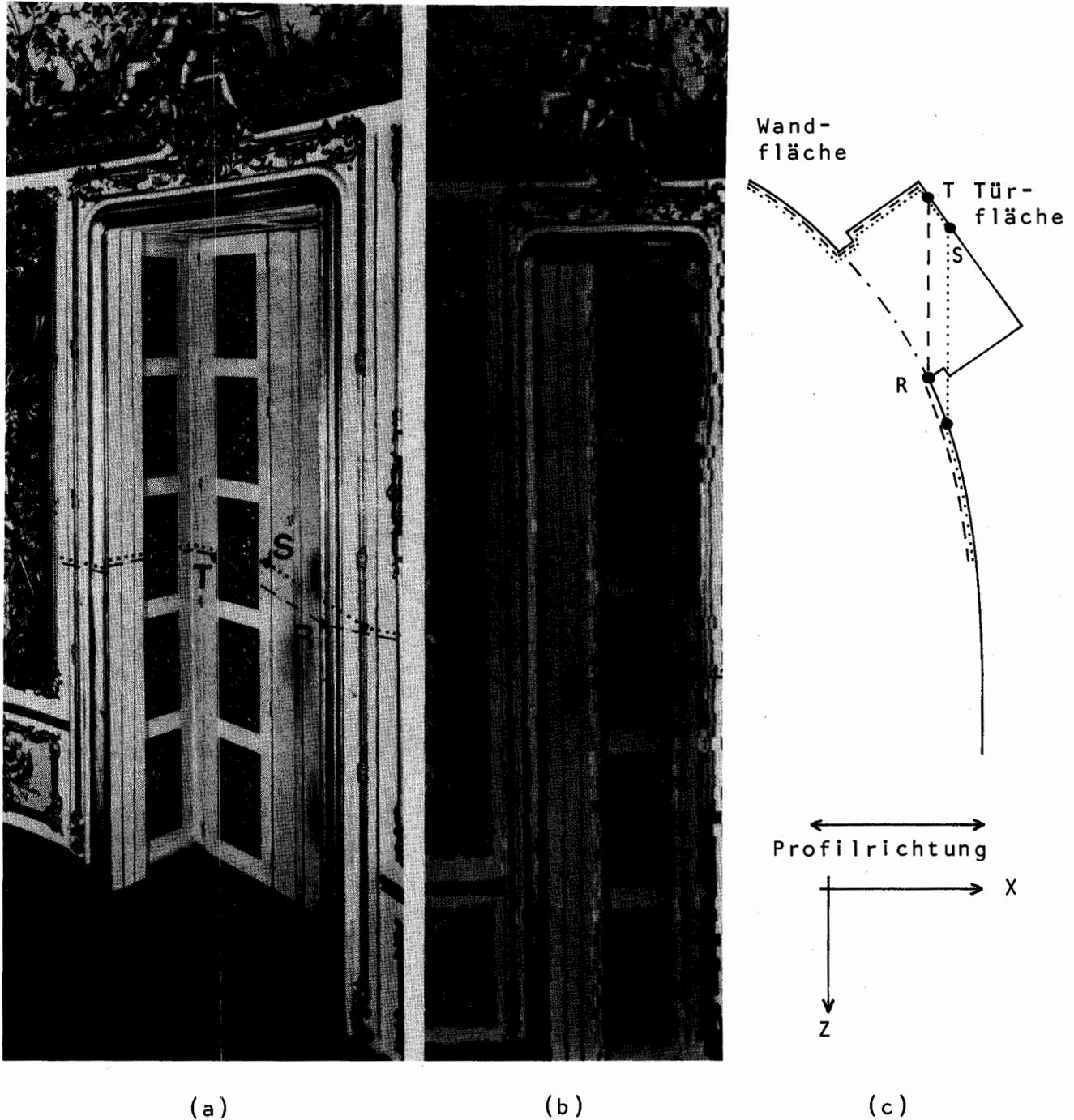


Abb. 6/62 Beispiel für Lageversetzungen beim Nachführen großer Höhenunterschiede

(a) Originalaufnahme (Zeiss SMK 40) mit eingetragener Profillinie

(b) Orthophoto, Abtastung in x-Richtung (Hauptkrümmungsrichtung)

(c) Skizze der Meßmarkenführung in Hin- und Rücklauf (Grundriß)

Hinlauf (→ - X) - - - - Rücklauf (→ + X)

Objekt: Schloß Linderhof, Speisezimmer

7. Weitere Gesichtspunkte bei der Herstellung von Architektur-Bildplänen

7.1 Abwicklungen und allgemeinere Projektionen

Mit Hilfe der photogrammetrischen Auswertetechnik ist es möglich, zentralperspektive Aufnahmen in orthographische Darstellungen umzuwandeln. Strichzeichnungen entstehen dabei in der Regel durch Stereokartierung, Halbtonbilder durch Entzerrung bzw. Differentialentzerrung. In beiden Fällen ist die für die Wiedergabe gewählte Bezugsfläche eine Ebene. Die Parallelprojektion hat sich für die Abbildung von Gebäudefassaden und nahezu ebenflächigen Objekten sowie für die Erstellung von Rissen und Schnitten als eine besonders einfache und geeignete Projektionsart erwiesen. Polygonal gebrochene Bauten lassen sich durch Zusammensetzen orthogonaler Teilabschnitte als Abwicklungen wiedergeben (z. B. Gotische Chorhalle des Aachener Doms, LÖSCHNER /84/85/).

Stark geneigte oder gekrümmte Objekte dagegen erscheinen bei orthographischer Darstellung in den Randbereichen so stark verzerrt (gestaucht bzw. gedehnt), daß eine Detaillerkennung nicht mehr möglich ist. Das gilt besonders für Türme, Gewölbe und Kuppeln (BORCHERS /8/).

Neue Geräteentwicklungen eröffnen jetzt die Möglichkeit der Abwicklung von Zylinder- und Kegelflächen sowie die allgemeine Projektion beliebig gekrümmter Flächen. Zylinderförmige Objekte treten in der Architektur als Türme, Wandflächen oder als Tonnengewölbe auf, während Kegelflächen an Dächern oder in Nischen zu finden sind. Kirchenkuppeln haben meist rotationssymmetrische Gestalt und können durch Kugeln, Ellipsoide, Paraboloiden oder Hyperboloiden angenähert werden. Alle anderen Flächen müssen bei der Umbildung allgemeinen Transformationsprozessen unterzogen werden.

Die Umwandlung in eine neue Projektionsart kann im Rahmen der Stereokartierung an einem analytischen Auswertegerät (Analytical Plotter O.M.I. AP/C-4, Zeiss Planicomp C 100, Matra Traster 77, Bendix US-1 u.a.) erfolgen und liefert Strichzeichnungen auf einem Kartiertisch. Für die allgemeine geometrische Transformation von Halbtonbildern sind digital steuerbare off-line-Orthoprojektoren erforderlich. Da es möglich sein muß, jeden Bildpunkt der Originalaufnahme (nach KRAUS /77/: "Vorlage") an eine beliebige, frei gewählte Stelle im "Abbild" zu positionieren, kann die Transformation nur in Geräten mit optischer oder elektronischer Bildübertragung (funktionale Zuordnung, Abb. 3/3 b, c) vorgenommen werden. Differentialentzerrungsgeräte mit digitaler Steuerung und optischer Bildübertragung sind der Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 (STEWARTSON /130/138/) und der Orthoprinter OP/C-2 der Firma Ottico Meccanica Italiana (O.M.I./106/), wobei der Avioplan wegen seiner größeren Flexibilität und Universalität und nicht zuletzt auf Grund der digitalen Magnetbandsteuerung für allgemeine Umbildungen als besonders geeignet erscheint. Die Transformation der "Vorlage" in das "Abbild" erfolgt in einer Rechenanlage. Als Output wird ein Magnetband (bzw. Lochstreifen) ausgegeben, das alle für die Steuerung des Orthoprojektors notwendigen Befehle enthält.

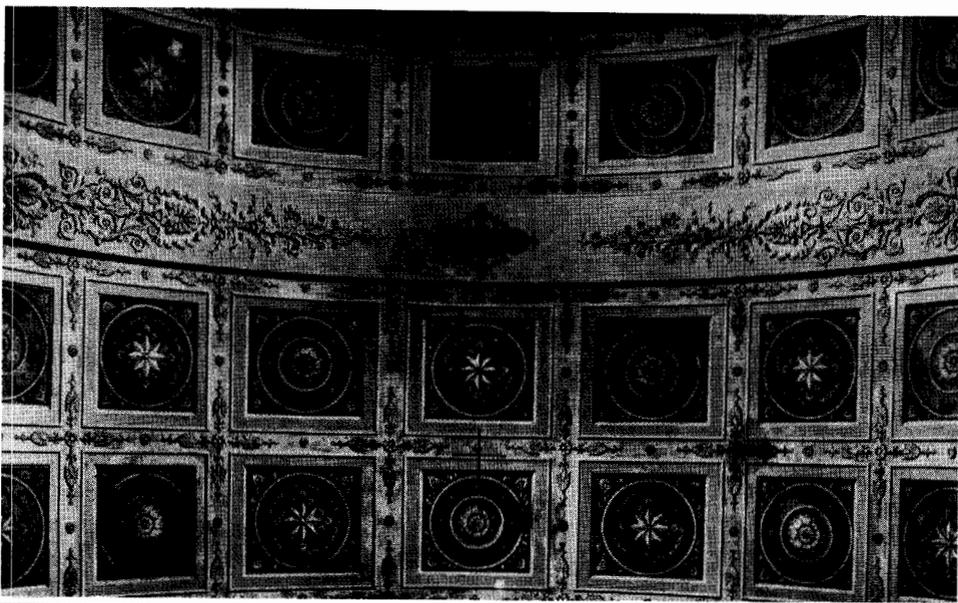
Im off-line-Betrieb ist die Bestimmung der Objektgestalt unabhängig von der nachfolgenden Umbildung. Daher ist es auch unbedeutend, auf welche Weise die Objektinformation gewonnen wird. Ein digitales "Objektmodell" entsteht in der Regel durch profilweises Abtasten der Modellfläche oder durch Messung eines Höhenrasters an einem Stereoauswertegerät. Auch die Digitalisierung von eventuell vorhandenen Schichtlinien liefert Informationen über die Gestalt der Objektfläche. Liegen sehr einfache, mathematisch explizit erfaßbare Oberflächen (Kreiszyylinder, Rotationsfläche) vor, so können die zur Bestimmung der Gestalt notwendigen Parameter durch wenige terrestrische Messungen (z.B. Meßband, Theodolit, elektronische Tachymeter) erhalten werden. In diesem Fall ist für den gesamten Umbildungsprozeß nur eine Einzelaufnahme erforderlich, sofern die äußere Orientierung der Kammer bekannt oder berechenbar ist.

Über erste Anwendungen dieser Technik berichteten KRAUS und TSCHANNERL in /76/. Als Objekt diente die zylinderförmige Decke des Bibliotheksaales des Wiener Schottenstiftes. Die Aufnahme wurde mit einer Meßkammer Wild P 31 durchgeführt. Objektentfernung und Zylinderradius ergaben sich aus stereoskopischen Messungen. Die Berechnungen zur Transformation der Flächen erfolgte am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien. Für die Umprojektion stand der Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 zur Verfügung. Abb. 7/1 zeigt die Originalaufnahme (a), die photographische Abwicklung (b) und (als Prinzipskizze) eine gezeichnete Darstellung der Decke in Parallelprojektion (c).

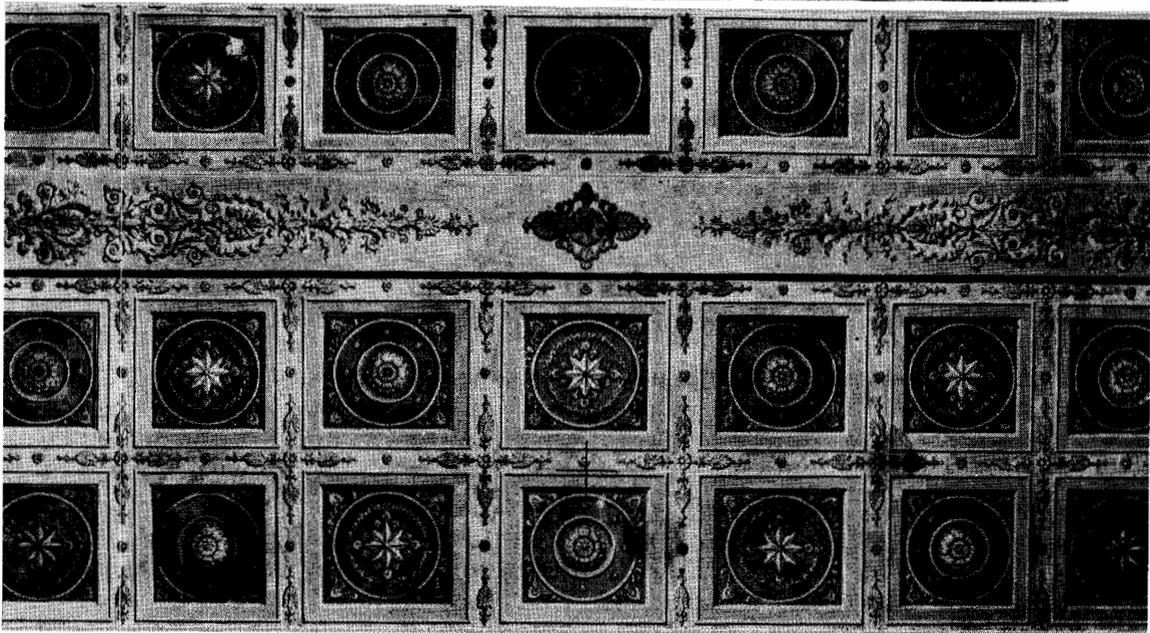
Aus Abb. 7/1 ist ersichtlich, daß die Wiedergabe der Randbereiche des Deckengewölbes bei Parallelprojektion durch die starke Verkürzung in Krümmungsrichtung unbefriedigend ist. Derartige (abwickelbare) Flächen sollten also möglichst auch abgewickelt werden, wenn die gerätetechnischen Voraussetzungen dazu gegeben sind.

JACHIMSKI berichtete in /61/ über den Versuch, ein zylinderförmiges Tonnengewölbe mit Hilfe des on-line-Systems Jenoptik Topocart-Orthophot als Abwicklung darzustellen. Bei der Umbildung war es notwendig, in Abhängigkeit von den Objektparametern streifenweise Maßstabsfaktoren zu bestimmen. Die im voraus berechneten Werte wurden während der Auswertung am Kammerkonstanten-Zählwerk manuell eingegeben. Da bei der Projektion keine Querneigungskorrektur möglich war, zeigt das erhaltene Abwicklungsbild in den Randbereichen starke Verfahrensfehler. Die Umbildung im on-line-Betrieb ist nur möglich, wenn die Abtastung parallel zur Zylinderachse des Gewölbes verläuft. In allen anderen Fällen wird der Einsatz digital gesteuerter off-line-Orthoprojektoren erforderlich.

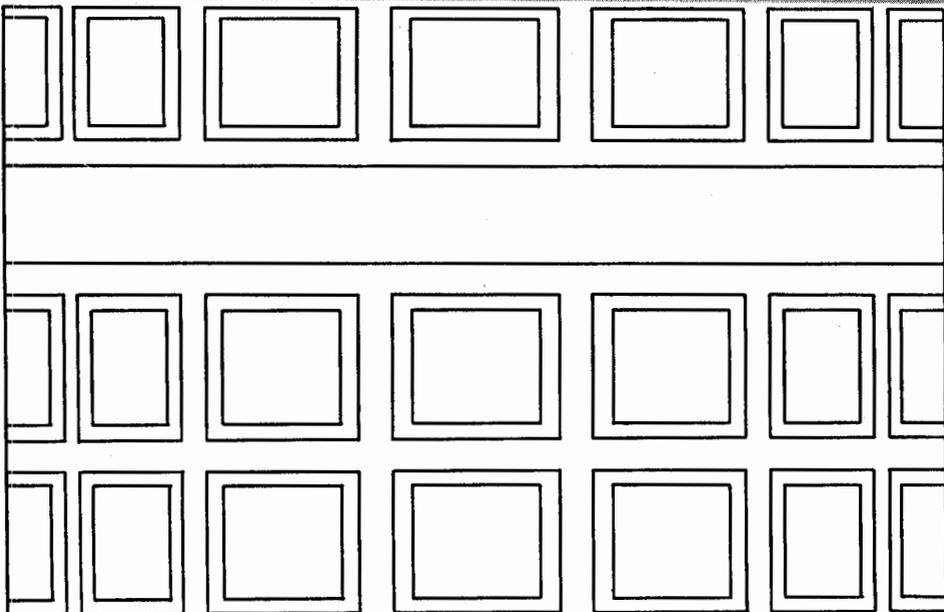
Ein besonderer Einsatz der allgemeinen photographischen Umbildetechnik ergibt sich für die Arbeit des Restaurators. Durch die digitale Orthoprojektorsteuerung ist es zum Beispiel möglich, Teilbereiche einer Kugelfläche in "konformer Abbildung" wiederzugeben. Die auf den Originalmaßstab (1:1) gebrachten Halbtonbilder (oder bereits hochgezeichnete Strichbilder) werden an der Objektoberfläche befestigt. Fresken, Figuren oder Mosaikdarstellungen können auf diese Weise auf die Deckenschicht übertragen und vom Restaurator nachgearbeitet werden.



(a)



(b)



(c)

Abb. 7/1 Darstellung einer Zylinderdecke in verschiedenen Projektionsarten. Objekt: Wiener Schottenstift, Decke

- (a) Originalaufnahme
- (b) photographische Abwicklung (siehe Abb. A/11 im Anhang)
- (c) Parallelprojektion (Skizze)

Die Verallgemeinerung der Orthophototechnik durch den Übergang von der ebenen zur beliebig gekrümmten Bezugsfläche eröffnet zahlreiche neue Anwendungs- und Darstellungsmöglichkeiten. Daher erscheint diese Generation von Differentialentzerrungsgeräten gerade für architekturphotogrammetrische Zwecke als besonders geeignet.

7.2 Höhendarstellung

Für die vollständige Dokumentation architektonischer Objekte sind neben Ansichts- und Schnittzeichnungen vielfach auch Schichtlinienpläne erforderlich. Die gebräuchlichste Methode zu deren Erstellung ist die photogrammetrische Stereokartierung an einem Analogauswertegerät. Die Genauigkeit direkt kartierter Schichtlinien beträgt nach bisherigen Erfahrungen (KONECNY /74/) bei einem Basisverhältnis von $\theta = 0,6$ ca. $0,2 \text{ ‰}$ der Aufnahmeentfernung.

Im Rahmen der Orthophotoherstellung eröffnen sich nun neue Möglichkeiten zur Gewinnung und Darstellung der Höheninformation. Die verschiedenen Verfahren beruhen auf der Profilhöhenbestimmung während der Modellabtastung. Am einfachsten ist die automatische photographische Aufzeichnung von Profilverpunkten gleicher Höhe durch sog. "Höhenschraffen" (dropped lines). Diese Methode ist bei den Orthoprojektoren Zeiss GZ 1 (SCHMIDT-FALKENBERG /112/, SCHNEIDER /113/, Zeiss /144/147/) und Jenoptik Orthophot (SZANGOLIES /132/) technisch realisiert. Da die Ableitung von Schichtlinien aus Höhenschraffen manuell erfolgen muß und dabei gerade an steilen Flächen (Architektur) Zuordnungsschwierigkeiten zwischen benachbarten Profilen entstehen, kommt dieses Verfahren für den terrestrischen Anwendungsbereich nicht in Betracht.

Eine Weiterentwicklung der Schraffenmethode ist die direkte Erzeugung von Schichtlinien aus Profildaten mit Hilfe des "Elektronischen Höhenlinienzeichners HLZ" (Zusatzgerät zum Orthoprojektor GZ 1 (HOBBIE /53/, Zeiss /146/)). Diese Einrichtung kann nur im Speicherverfahren (off-line) eingesetzt werden, weil zur Interpolation der Höhenlinienpunkte Angaben über die Höhen der Nachbarprofile erforderlich sind. Auch die elektronisch erzeugten Schichtlinien müssen überarbeitet werden. Da der Verlauf aber bereits vorgegeben ist, beschränkt sich diese Tätigkeit auf das bloße Hochzeichnen. Zwei Beispiele solcher während der Orthophotobelichtung automatisch gewonnener Schichtlinienpläne sind in den Abbildungen 7/2 und 7/3 dargestellt. Die Orthophotos dazu befinden sich im Anhang in den Abbildungen B/5 und B/9.

Wie die beiden Beispiele zeigen, hat der Höhenabtastfehler (Abschnitt 6.3.1) einen entscheidenden Einfluß auf die Güte der Schichtlinien (siehe auch die Abbildungen 6/52 bis 6/54 in Abschnitt (6.3.2)). Durch eine entsprechende Generalisierung des Linienverlaufs ist im Zuge einer graphischen Überarbeitung eine für Übersichts- und Dokumentationszwecke ausreichende Höhendargestellung erzielbar.



Abb. 7/2 Beispiel für direkte Schichtlinienprojektion mit dem Elektronischen Höhenlinienzeichner Zeiss HLZ

Äquidistanz am Objekt: 5 cm

Hervorgehobene Linien: 25 cm

Objekt: Straßburger Münster, Hauptportal

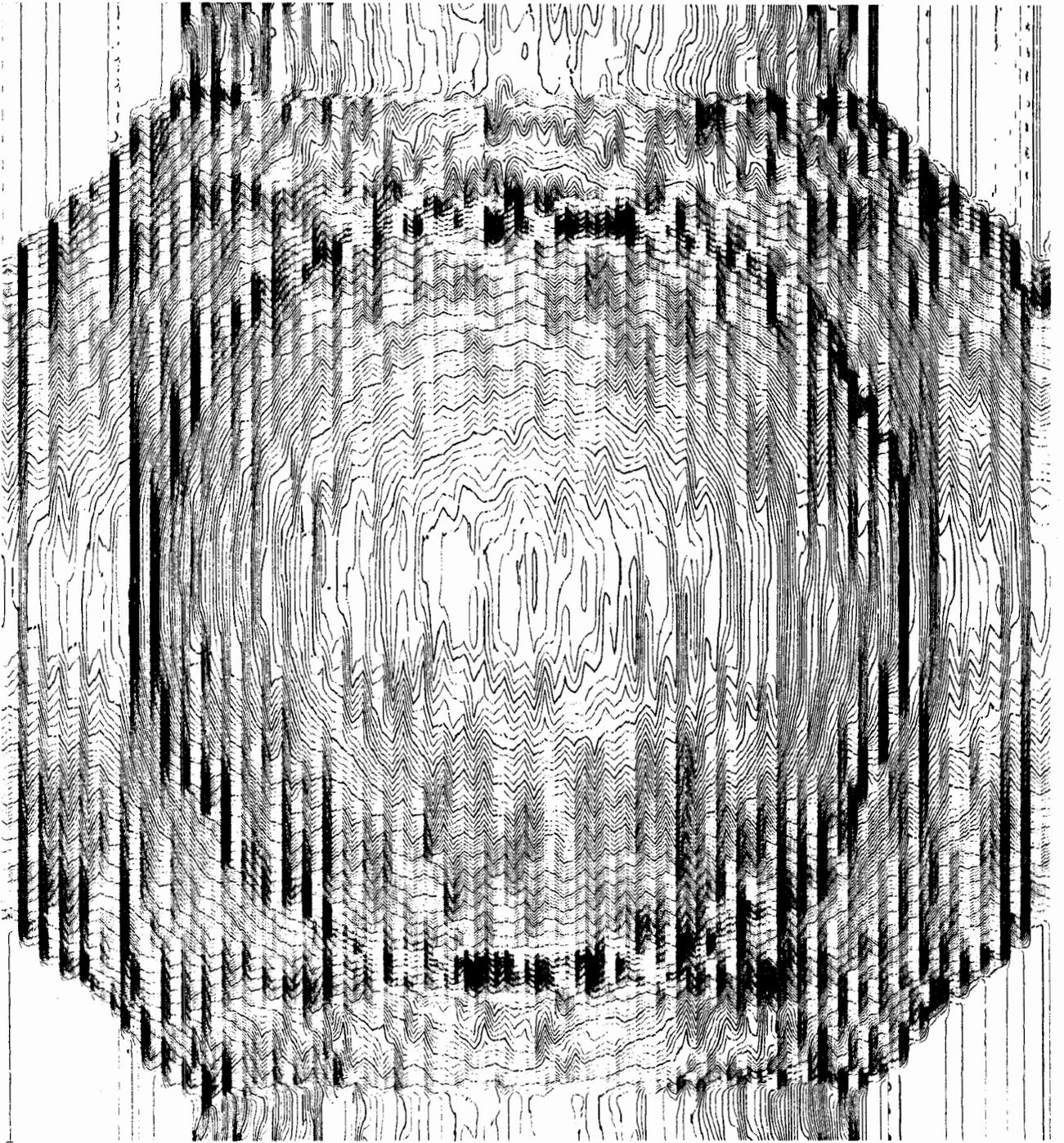


Abb. 7/3 Beispiel für direkte Schichtlinienprojektion mit dem Elektronischen Höhenlinienzeichner Zeiss HLZ

Äquidistanz am Objekt: 7 cm

Hervorgehobene Linien: 35 cm

Objekt: Klosterkirche Ottobeuren, Hauptkuppel

Bei digitaler Profilspeicherung können Schichtlinien entweder direkt in die Profile eingerechnet oder über ein "digitales Höhenmodell" aus Rasterpunkten interpoliert werden. Bei dieser u.a. von KRAUS /75/ und STANGER /127/ beschriebenen Methode ist eine teilweise Filterung des systematischen Abtastfehlers möglich. Die Auszeichnung der digital gewonnenen Schichtlinien erfolgt an einem automatischen Kartiertisch in Tusche oder als Schichtgravur. Eine derartige Höhenliniendarstellung kann als "kartographisches Endprodukt" angesehen werden, da in der Regel keine Überarbeitung notwendig ist.

Die bei Profilmessungen erreichbare Höhengenaugigkeit beträgt im Durchschnitt etwa $0,4\text{‰}$ der Aufnahmeentfernung, bezogen auf ein Basisverhältnis von $\theta = 0,6$. Durch digitale Filterung des systematischen Abtastfehlers kann dieser Wert auf ca. $0,3\text{‰}$ · Z gesenkt werden.

Bei strengeren Anforderungen an den Schichtlinienplan sollte eine direkte Stereokartierung angefertigt oder ein aus Einzelpunktmessungen (Genauigkeit ca. $0,1\text{‰}$ · Z bei $\theta = 0,6$) gewonnenes digitales Höhenmodell zur Gewinnung von Schichtlinien herangezogen werden.

7.3 Weiterverarbeitung von Halbtonbildern

Je nach Aufgabenstellung werden Halbtonbilder entweder auf photographischem Weg zu Bildplänen und Photokarten weiterverarbeitet oder durch Hochzeichnen bzw. automatische Bildwandlung in Strichkarten umgesetzt. Hinsichtlich der Weiterverarbeitung braucht dabei kein Unterschied zwischen den einzelnen Umbildetechniken gemacht zu werden. Bildvergrößerung, ganzflächige Entzerrung, Differentialentzerrung und allgemeine Umbildung können in diesem Fall als jeweils adäquate Verfahren angesehen werden.

7.3.1 Photographische Weiterverarbeitung zu Bildplänen und Photokarten

Für die Herstellung von Bildplänen und Photokarten (siehe Abschnitt 2.4.1) ist bei der photographischen Bearbeitung des belichteten Films große Sorgfalt angebracht (photographische Dichte, Kontrastumfang, Vermeidung von Wasserflecken). Das entwickelte, fixierte, gewässerte und getrocknete Filmnegativ (bzw. -positiv) wird in der Regel einer geringfügigen Retusche unterzogen. Die Retusche dient der Beseitigung von Emulsionsfehlern und der Ausgleichung von eventuellen Lageversetzungen, die durch Verfahrensfehler oder Abtastfehler bei der Orthoprojektion entstanden sein können. Jegliche Retuschierarbeit ist als photographisches "Make up" zu verstehen. Die semantische sowie die geometrische Aussage des Halbtonbildes dürfen dabei jedoch keinesfalls verfälscht werden. Die Retusche erfolgt zweckmäßigerweise sowohl im Negativ als auch im Positiv. Helle Zonen im Negativ werden im Positivabzug als dunkle Flächen wiedergegeben, die nur mühsam abzuschwächen sind. Deshalb sollten fehlerhafte Stellen bereits im Negativ abgedunkelt werden.

In den Reproduktionsprozeß sollte zur Verbesserung der photographischen Bildqualität ein Kontrastausgleich (siehe Abschnitt 5.1) mit einbezogen werden. Für große Bildformate ist das optische Verfahren der "unscharfen Maske" am geeignetsten. Kleine Negative (bzw. Positive) können an elektronischen Geräten (z.B. LogEtronics, Milligan) ausgeglichen werden.

Ein Bildplan besteht bisweilen aus mehreren, mosaikartig zusammengefügten Teilbildern. Die Montage der einzelnen Bildausschnitte (Photopapier) erfolgt auf einer stabilen, maßhaltigen Unterlage, z.B. auf einer Aluminiumplatte, auf Correctostat, Stabilen oder Polyesterfolie (JORDAN-EGGERT-KNEISSL /64, S. 547/). Das Einpassen und geometrische Zuordnen der Teile bereitet oft Schwierigkeiten, weil die Photopapiere undurchsichtig sind und daher keinen Vergleich des Bildinhaltes mit den auf der Unterlage aufgetragenen Paßlinien bzw. Paßpunkten gestatten. Für Mosaikarbeiten sollte wegen des starken Affinverzugs kein normales Photopapier verwendet werden. Zu empfehlen sind polyesterhaltige Spezialpapiere, die sich durch hohe Maßhaltigkeit auszeichnen (siehe Abschnitt 9.1.7).

Nach einem an die Photomontage anschließenden Reproduktionsprozeß erhält man den fertigen Bildplan, der in der Regel das photographische Endergebnis darstellt. Beispiele architektonischer Bildpläne befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Abbildungen A/1 bis B/12). Durch Hinzufügen von Beschriftung, von Symbolen, Gitterkreuzen oder Schichtlinien sowie durch graphisches Hervorheben besonderer Details kann der Bildplan zur Bildkarte bzw. Photokarte ergänzt werden. Der Photokarte kommt in der Architektur weniger Bedeutung zu als in der topographischen Kartographie (KRAUSS /78/, VOSS /136/, WINKELMANN /139/).

Für die Vervielfältigung von Bildplänen und Photokarten kommen prinzipiell drei Methoden in Betracht:

- die Herstellung von photographischen Papierabzügen
- das Lichtpausverfahren
- das Druckverfahren.

Die Herstellung photographischer Papierabzüge ist gegenüber den beiden anderen Vervielfältigungsmethoden das teuerste und aufwendigste Verfahren, garantiert aber auf der anderen Seite eine vollständige Detailwiedergabe bei hoher Auflösung und Bildqualität, was gerade bei der Darstellung architektonischer Objekte von Bedeutung ist. Da Architekturpläne (für Restaurierungen oder bauhistorische Untersuchungen, nicht in der Inventarisierung) meist nur in wenigen Exemplaren vorliegen müssen, bietet sich das photographische Verfahren in besonderer Weise an.

Das Lichtpausverfahren kommt bei Architekturbildplänen nicht in Betracht. Drucke werden dagegen für die Dokumentation architektonischer Objekte in Büchern oder sonstigen Veröffentlichungen benötigt.

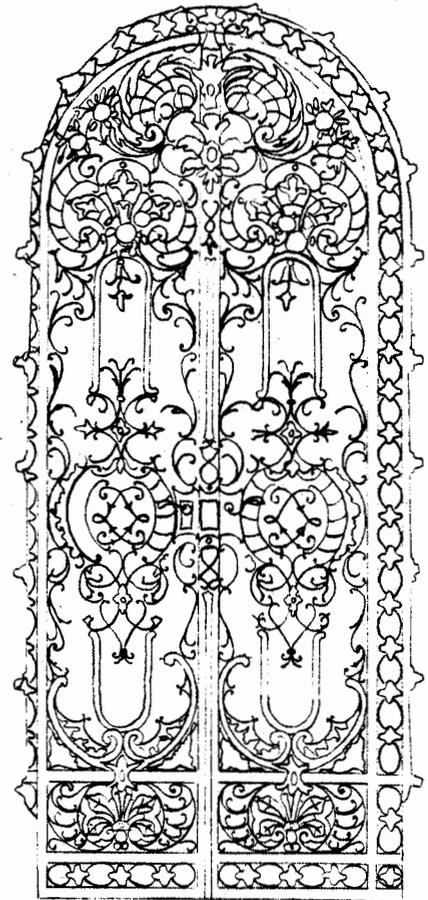
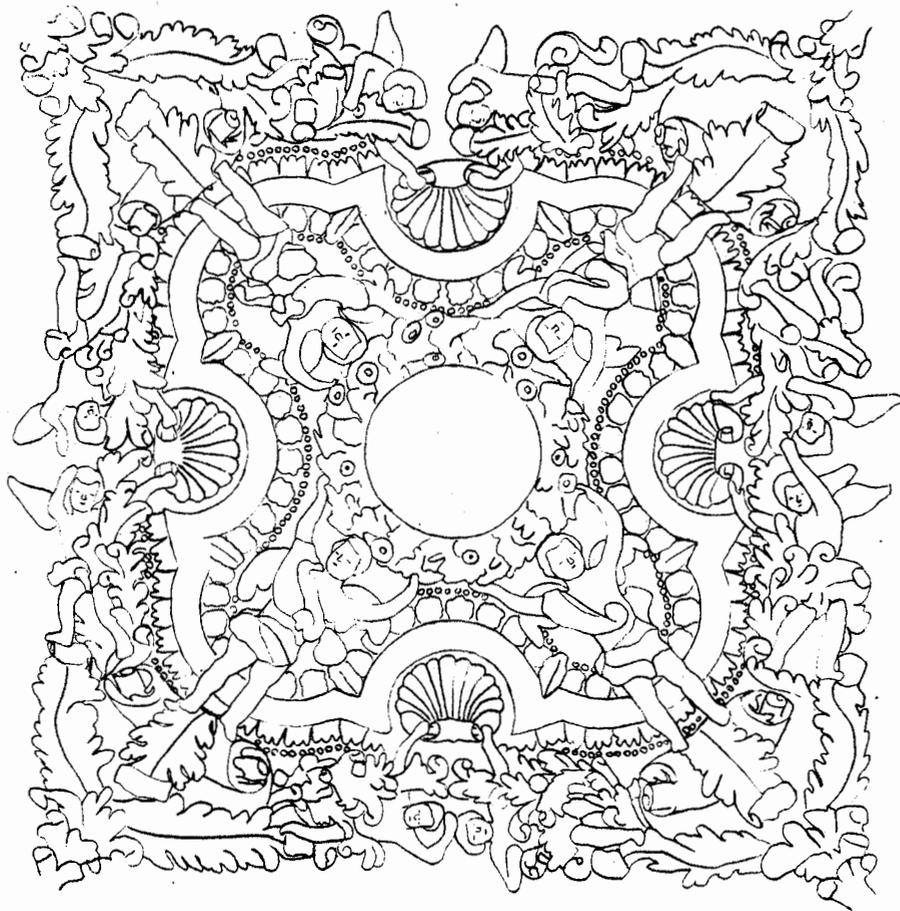
7.3.2 Herstellen von Strichkarten durch manuelles Hochzeichnen von Halbtonbildern

Werden vom Auftraggeber als Ergebnis der Bauaufnahme Strichdarstellungen gewünscht, so kann das Orthophoto (oder generell das entzerrte Halbtonbild) hochgezeichnet werden (siehe Abschnitt 2.4.2). Das Verfahren der Hochzeichnung wird bei der Kartierung von Detailansichten in der Architekturphotogrammetrie bereits häufig angewandt. Allerdings liegen den Bildern meist großmaßstäbige, mit nicht-metrischen Kammern gefertigte Aufnahmen zu Grunde, was für die Detaildarstellung hinsichtlich der Genauigkeit ausreichend ist. Für die Hochzeichnung größerer Objektgruppen muß das zu unterlegende Halbtonbild durch entsprechende Umbildung (Entzerrung, Differentialentzerrung) auf einen einheitlichen Maßstab gebracht werden. Die Hochzeichnung erfolgt zweckmäßigerweise am Leuchttisch auf eine über den Halbtonfilm gelegte Zeichenfolie mit Bleistift bzw. Tusche oder durch Ritzung in eine beschichtete Gravurfolie. Die Interpretation der darzustellenden Details wird erleichtert, wenn daneben ein Stereoskop zur räumlichen Betrachtung der Meßbilder verwendet wird.

Der Architekturplan soll die Ist-Form des Objekts wiedergeben, d.h. die Kartierung darf nicht durch die Vorstellung des Interpretierenden beeinflußt werden. Gerade bei der Hochzeichnung aus Halbtonbildern ist der Zeichner versucht, bei nahezu geraden Linien mit Lineal zu arbeiten. Der so entstehende Plan stellt eine hineininterpretierte Soll-Form des Objekts dar. Andererseits sind aber auch bei freihändiger Hochzeichnung individuelle bzw. durch mangelnde Erfahrung des Zeichners bedingte Verfälschungen möglich. Erkennbare Auswirkungen von orthophotographischen Verfahrens- oder Abtastfehlern sollten dagegen in jedem Fall durch ausgleichende Linien beseitigt werden. Die Entscheidung über die Linienführung erfordert ein hohes Maß an bauhistorischer sowie graphischer Erfahrung.

Die Interpretation und die Auswahl von Liniengefügen aus architektonischen Aufnahmen sollte nicht von fachfremden Operateuren durchgeführt werden, sondern in der Hand von eingearbeiteten und spezialisierten Architekten, Bauhistorikern und Denkmalpflegern liegen. Die Hochzeichnungstechnik ermöglicht gegenüber der Stereokartierung eine Trennung von rein photogrammetrischen Arbeiten (Orientierung der Bilder, Entzerrung bzw. Differentialentzerrung) und anwendungsbezogener Interpretation durch den jeweiligen Fachmann.

In den Abbildungen 7/4 und 7/5 sind drei Beispiele für Hochzeichnungen gegeben. Die Kartierung erfolgte in den jeweiligen Orthophoto- bzw. Entzerrungsmaßstäben mit Bleistift auf Pocalon-Folie. Eine weitere Steigerung der wiedergegebenen Detailfülle war in diesen Maßstäben nicht möglich. Vergleichende Untersuchungen über die Genauigkeit und den Zeitaufwand von Hochzeichnungstechniken werden in den Abschnitten 9 und 10 vorgelegt.



(a)

(b)

Abb. 7/4 Beispiele für Hochzeichnungen (Bleistiftversion)

(a) Hochzeichnung aus einem Orthophoto 1:30;

Objekt: Klosterkirche Ellwangen, Stuckdecke
(Abb. C/1 im Anhang)

(b) Hochzeichnung aus einem entzerrten Halbtonbild 1:24;

Objekt: Schloß Linderhof, Türgitter

An dieser Stelle soll noch einmal erwähnt werden, daß das Verfahren der Hochzeichnung aus Orthophotos im Bereich der Topographie beim Landesvermessungsamt Baden-Württemberg bereits seit 1969 im Rahmen der Fortführung der Kartenwerke 1:25 000 und 1:50 000 mit Erfolg angewandt wird (KÖNIG /73/, STROBEL /131/).

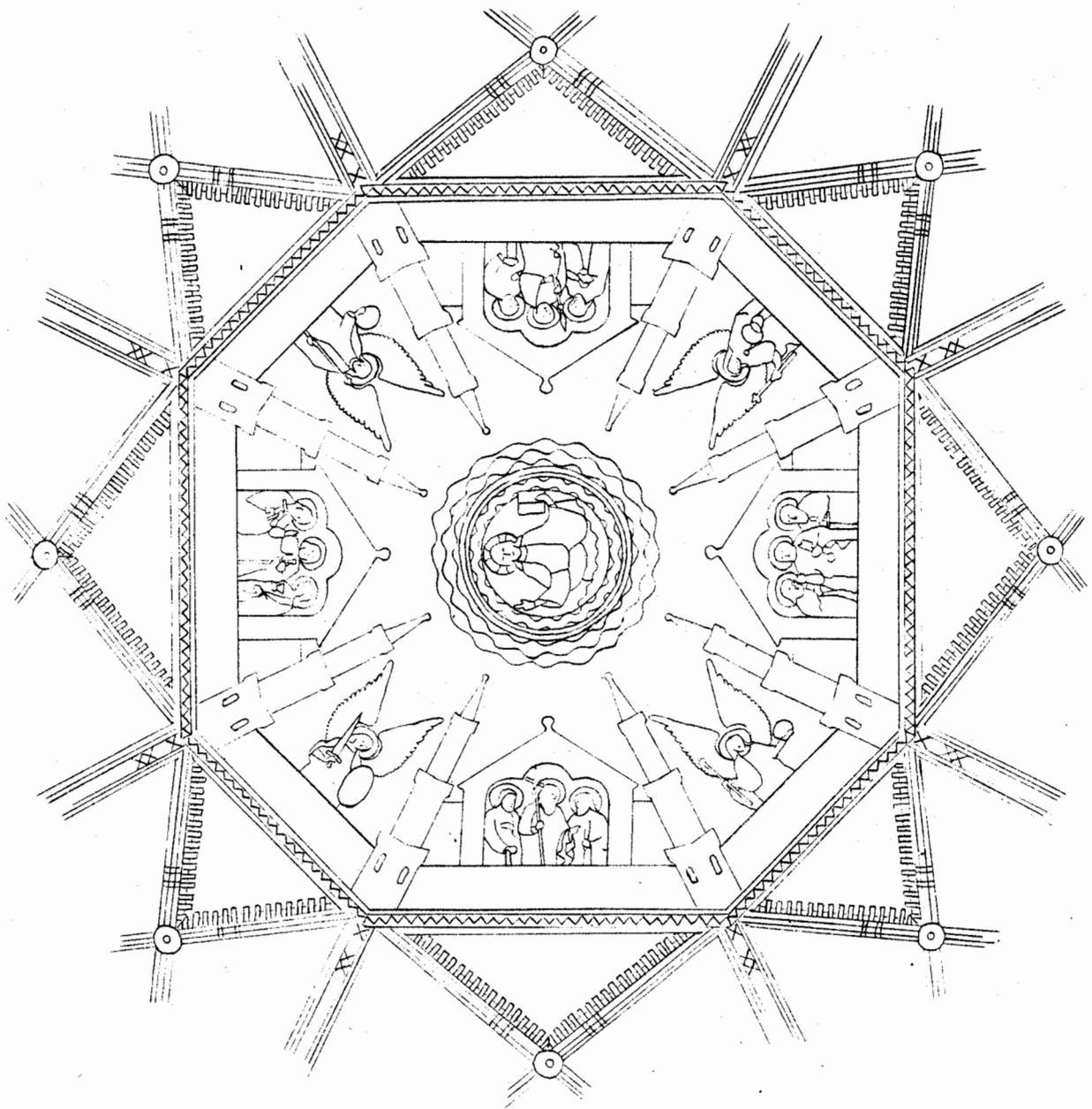


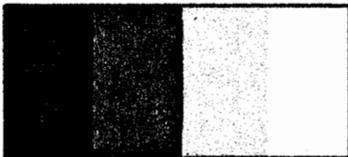
Abb. 7/5 Beispiel für Hochzeichnung (Bleistiftversion)
aus einem Orthophoto 1:62;
Objekt: Vondelkerke, Amsterdam, Deckenansicht

7.3.3 Herstellung von Strichkarten durch automatische Bildwandlung

Die Umwandlung von Halbtonbildern in Strichdarstellungen kann neben der manuellen Hochzeichnung auch mit Hilfe photomechanischer oder elektronischer Methoden erfolgen (MAUELSHAGEN /88/, MORGENSTERN /98/, SCHWEISSTHAL /115/). Im besonderen werden hier das Äquidensitenverfahren sowie die "Pictoline"-Technik angesprochen.

Äquidensitenverfahren

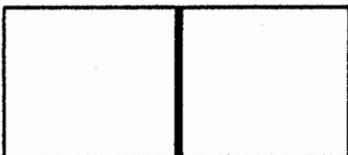
Ein Halbtonbild besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Schwärzungen (Abb. 7/6 a). Durch Messung und Klassifizierung der jeweiligen Dichtewerte innerhalb bestimmter Bandbreiten lassen sich alle Schwärzungen in Dichteklassen (Äquidensiten 1. Ordnung) eingruppierten. Für eine graphische Darstellung ist die Zuordnung zwischen Dichtestufen und Tonwerten frei wählbar (Abb. 7/6 b).



(a) Halbtonbild (Flächen: schwarz / dunkelgrau / hellgrau / weiß)



(b) Äquidensiten 1. Ordnung (Gewählte Tonwerte: schwarz / weiß)



(c) Äquidensite 2. Ordnung (Flächen: weiß, Trennlinie: schwarz)

Abb. 7/6 Schematische Darstellung von Äquidensiten 1. und 2. Ordnung

In einem weiteren Verarbeitungsprozeß können die Begrenzungslinien der Dichteklassen ermittelt und ebenfalls graphisch wiedergegeben werden. Sie werden als Äquidensiten 2. Ordnung (Abb. 7/6c) bezeichnet und repräsentieren die durch Dichteänderungen gekennzeichneten Kanten und Konturen des Objekts.

Die Herstellung von Äquidensiten kann photomechanisch durch Verwendung von "Agfa-Contour"-Film (mehrfaches Umkopieren des Halbtonbildes und der jeweiligen Dichteauszüge auf steil arbeitenden Lith-Film) oder im elektronischen Bildverarbeitungsprozeß erfolgen.

Das Äquidensitenverfahren ist zur Bildwandlung nur wenig geeignet, weil die Tonsprünge am Objekt innerhalb der jeweiligen Bandbreite der herausgefilterten Dichtezone liegen müssen, um zur Darstellung zu gelangen. Daher ist es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, alle Tonsprünge wiederzugeben, was zu einem Verlust an Detailinformation führt. Diese Unterdrückung ist aber nicht gleichbedeutend mit Strukturselektion und Generalisierung im kartographischen Sinn. Für die Bildwandlung architektonischer Aufnahmen gelten dieselben Kriterien (MORGENSTERN /98/).

"Pictoline"-Verfahren

Eine zweite Methode zur Bildwandlung ist das vom US-Army Map Service entwickelte "Pictoline"-Verfahren (Tonlinien-Verfahren). Die Umwandlung vom Halbtonbild in eine Strichzeichnung geschieht hierbei auf photomechanischem Weg durch die Kombination von Negativ-Positiv-Masken (MORGENSTERN /98/).

Vom Halbton-Negativ wird im Kontaktverfahren ein paßgerechtes Halbton-Positiv auf Polyesterfilm (z.B. Agfa N 31 p) hergestellt. Dabei ist zu beachten, daß sich die Dichtewerte der beiden Filme zu einem exakt einheitlichen Grauwert ergänzen.

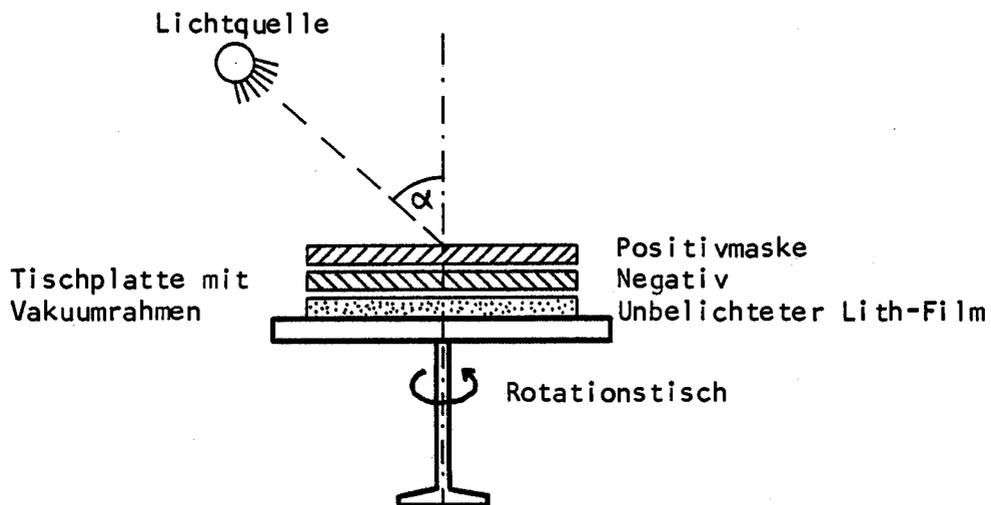


Abb. 7/7 Prinzipskizze zur Herstellung von Strichbildern nach dem "Pictoline"-Verfahren (aus /115/).

Die beiden Halbtonfilme werden mit den schichtfreien Trägerseiten aufeinandergelegt und über Paßkreuze eingerichtet. Diese Montage wird oberhalb eines "hart" arbeitenden Lith-Films (z.B. Agfa N 81 p) auf einem Rotationstisch mit Vakuumrahmen (Abb. 7/7) angebracht. Bei der Belichtung, die unter einem Winkel von etwa 45° erfolgt, werden die Lichtstrahlen an den Tonsprünge der Halbtonvorlagen abgelenkt und gelangen so auf den Strichfilm, wo ein latentes Abbild der Linienstruktur entsteht.

Die Abbildungen 7/8 bis 7/10 zeigen Strichdarstellungen, die nach dem "Pictoline"-Verfahren aus Orthophotos hergestellt wurden (Abbildungen B/1, B/5 und B/9 im Anhang). Die Bildwandlung erfolgte am Institut für Kartographie und Topographie der Universität Bonn. Nach Ansicht des Bearbeiters hätten die Ergebnisse durch eine sorgfältigere Vorbereitung der Halbtonvorlagen verbessert werden können. Diese Feststellung bezieht sich auf die Verwendung von Acetatfilm, der nicht die erforderliche Maßkonstanz aufwies, sowie auf die kontrastarmen Halbtonnegative. Durch den "weichen" Übergang der Grauwerte konnten die Tonsprünge nicht deutlich genug hervortreten und somit auch nicht vollständig zur Darstellung gelangen.

Dennoch demonstrieren die Beispiele eine prinzipielle Eignung des Verfahrens für die linienhafte Wiedergabe architektonischer Objekte. Dabei erweist sich die Fachwerkfassade aus Abb. 7/8 als besonders geeignet, weil die klaren Abgrenzungen zwischen den Balken und Feldern des Fachwerks bereits eindeutige Tonsprünge ergeben. Außer den eigentlichen Umrißlinien ist im Pictoline-Bild teilweise noch die Holzstruktur des Balkenwerks zu erkennen, was gerade in bauhistorischer Sicht von Interesse sein kann.

Auf der anderen Seite versagt das Verfahren bisweilen an denjenigen Objektstellen, wo gleichartige Materialien zusammengefügt sind. An dem in Abb. 7/8 dargestellten Fachwerkhaus treten z.B. die baulich wichtigen Trennlinien zwischen Pfetten, Schwellen und Deckenbalken nicht in Erscheinung, weil alle Elemente aus dem gleichen Holz bestehen bzw. mit gleicher Farbe angestrichen sind.

Durch die automatische Bildwandlung kommt es vor, daß unwichtige Details überbewertet werden. Die Vorhänge im Erd- und Obergeschoß des Hauses werden z.B. mit der gleichen Strichstärke wiedergegeben wie die körperbegrenzenden Umrißlinien. Ebenso ist eine unerwünschte Hervorhebung von Schattenzonen möglich.

Die unregelmäßigen Fachwerk- bzw. Putzränder werden bei der photomechanischen Bildwandlung vom Orthophoto in das Strichbild übernommen. Es liegt also eine exakte Darstellung des Ist-Zustandes des Bauwerks vor. Demgegenüber ist, wie bereits erwähnt, der Auswerter am Stereokartiergerät sowie bei der manuellen Hochzeichnung von Objekten mit weitgehend geradlinigen Strukturen versucht, eine Begradigung und damit Generalisierung vorzunehmen, was der Hinein-Interpretation einer Soll-Form entspricht.

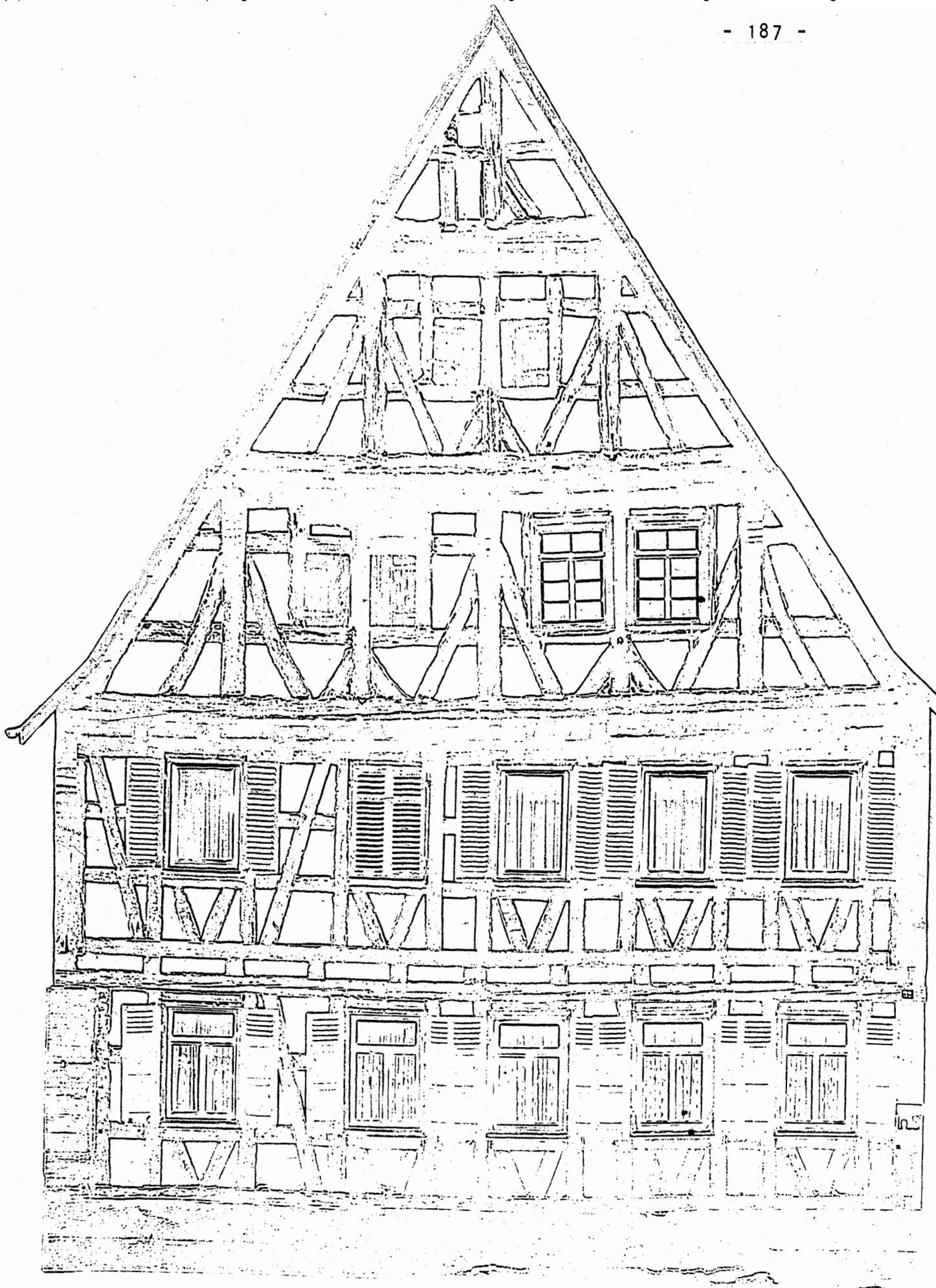


Abb. 7/8 Beispiel für photomechanische Bildwandlung:
Pictoline-Bild aus dem Orthophoto in Abb.B/1 (Anhang)
Objekt: Eltingen, Fachwerkhaus

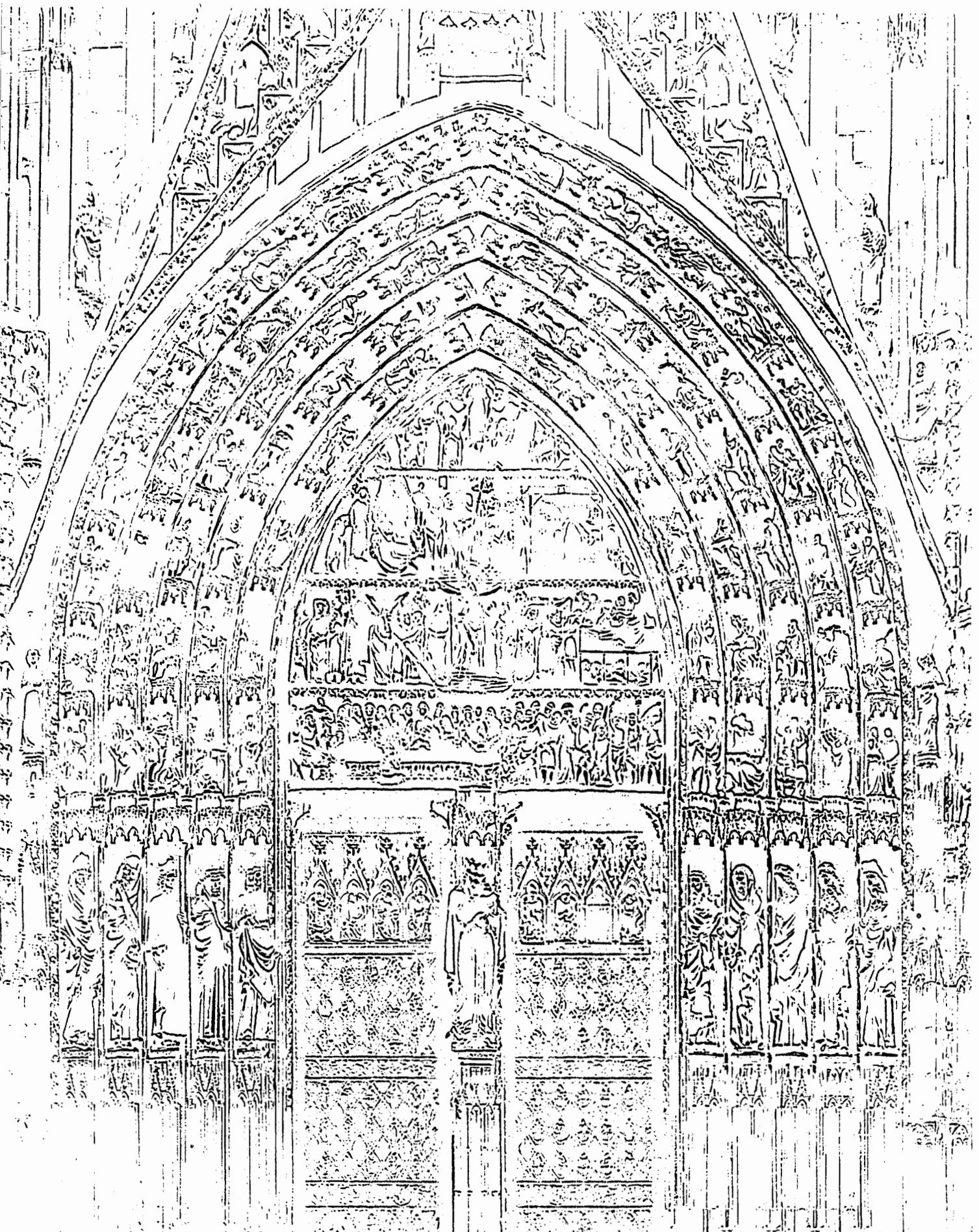


Abb. 7/9 Beispiel für photomechanische Bildwandlung:
Pictoline-Bild aus dem Orthophoto in Abb. B/5 (Anhang)
Objekt: Straßburger Münster, Hauptportal

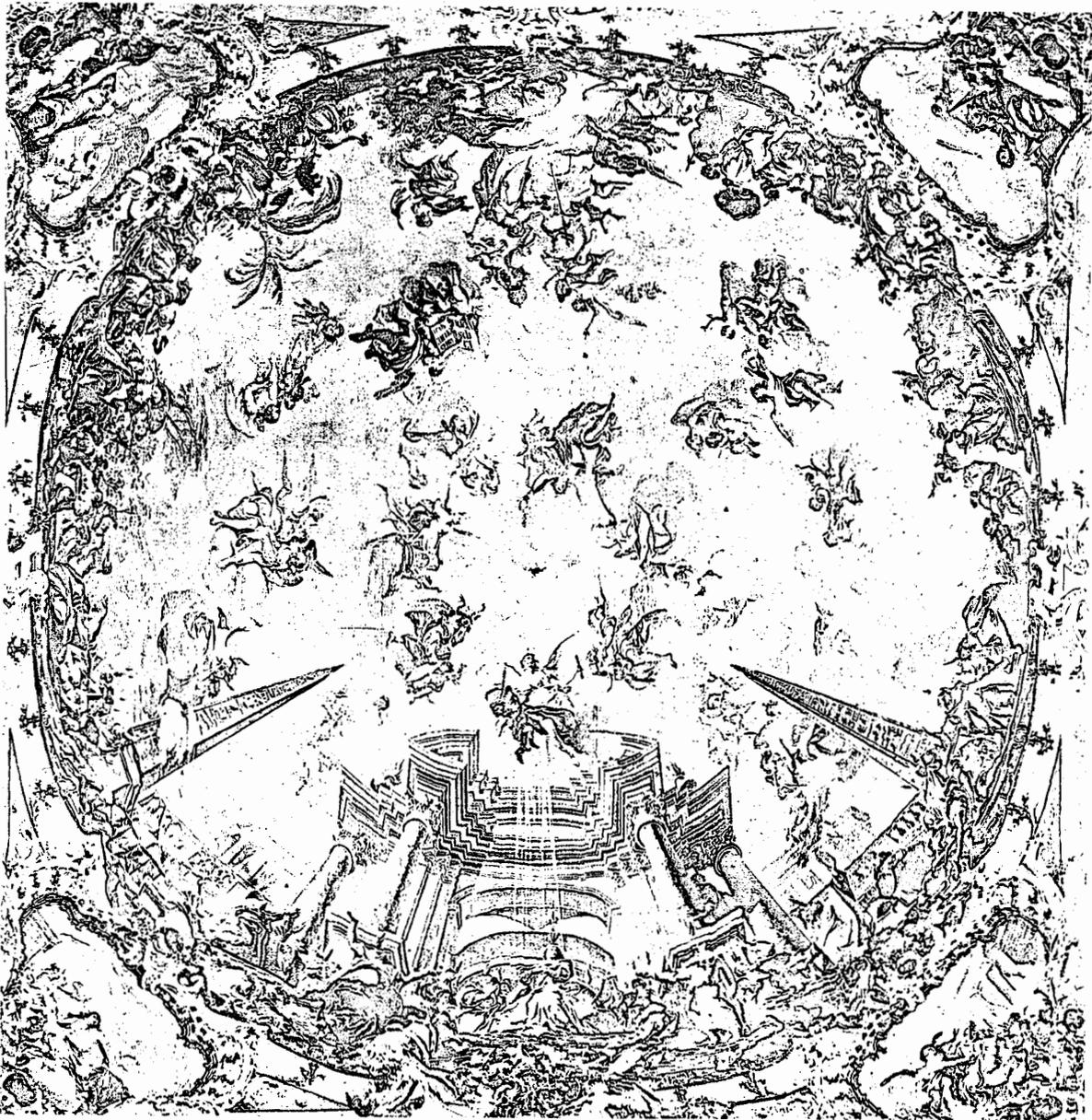


Abb. 7/10 Beispiel für photomechanische Bildwandlung:
Pictoline-Bild aus dem Orthophoto in Abb.B/9 (Anhang)
Objekt: Klosterkirche Ottobeuren, Hauptkuppel

Die Bearbeitungszeit für die Bildwandlung des Fachwerkhauses betrug etwa 1 Stunde. Für die entsprechende Bleistifthochzeichnung derselben Fassade waren (einschließlich der Wiedergabe der Fensterläden) etwa 3 Stunden notwendig. Das Pictoline-Verfahren stellt also gegenüber der Hochzeichnung eine zeitsparende Methode dar und ist bei derartigen Objekten mit Erfolg anwendbar. Für die Erstellung einer Reinzeichnung müssen beide Strichversionen zusätzlich überarbeitet und ergänzt werden.

Als ein ebenfalls gelungenes Beispiel für photomechanische Bildwandlung (aus der Literatur: MAUELSHAGEN /88/) kann die Wiedergabe einer klassizistischen Gebädefassade der Bonner Südstadt bezeichnet werden. Die Tonsprünge treten an den Fugen des Ziegelmauerwerkes klar hervor.

Der Versuch, das Orthophoto eines gotischen Gewändeportals (Abb. B/5 im Anhang) mit Hilfe des "Pictoline"-Verfahrens in ein Strichbild umzuwandeln, war weniger erfolgreich. Wie bereits erwähnt, hätte das Ergebnis durch sorgfältigere Bearbeitung der Halbtonvorlage verbessert werden können. Generell jedoch scheint dieses Bild bzw. Objekt für eine Umwandlung im (kleinen) Maßstab 1:52 nicht geeignet zu sein. Die Detailfülle der Steinfiguren ist zu hoch, so daß sich im Strichbild ein Durcheinander von Linien ergibt. In einem größeren Maßstab wären z.B. die Details des Tympanon-Reliefs bei der Bildwandlung erhalten geblieben. Das Pictoline-Bild zeigt aber dennoch die generelle Linienführung der Archivolten sowie die Umrisse der einzelnen Figuren auf. Es wäre vorstellbar, daß diese Strichvorlage als Basiskarte für die manuelle Hochzeichnung feingliedriger Strukturen aus großmaßstäbigen Halbtonbildern (evtl. aus nichtmetrischen Aufnahmen) Verwendung finden kann.

Dasselbe gilt für die Bildwandlung der Deckenfresken der Hauptkuppel Ottobeuren (Abb. 7/10). Allerdings enthält das Halbtonbild der bemalten Decke zahlreiche fein abgestufte und kontinuierlich ineinander übergehende Grauwerte, die keine Tonsprünge erzeugen und damit auch keine Pictoline-Darstellung ermöglichen. Auf der anderen Seite ist es gerade bei einer derartig differenzierten Malerei nicht sinnvoll, das Halbtonbild, welches alle Tonwerte vorteilhaft wiedergibt, in eine Strichzeichnung umzuwandeln.

Das Verfahren der photomechanischen Bildwandlung kann also mit Erfolg bei solchen Objekten eingesetzt werden, die von vornherein eine klare Linienstruktur (Stein- oder Ziegelmauerwerk, Mosaiken) aufweisen. Es muß aber bereits bei der Aufnahme auf eine günstige Objektbeleuchtung (starke Scheinwerfer, direkte Sonnenbestrahlung) geachtet werden, damit die Konturen klar hervortreten. Differenzierte Halbtonbilder mit "weichen" Tonübergängen sind für die Bildwandlung bzw. generell für eine Strichdarstellung nicht geeignet.

Obwohl das "Pictoline"-Verfahren prinzipiell anwendbar ist und durchaus befriedigende Ergebnisse liefert, erscheinen dennoch einige kritische Bemerkungen für angebracht.

1. Wenn die gesamte Detailfülle des Objekts im Architekturplan wiedergegeben werden soll, und keine Überladung der Darstellung zu befürchten ist, so bietet sich die Direktverwendung des Halbtonbildes an. Die Umwandlung in eine Strichkarte bringt keine zusätzlichen Vorteile der Lesbarkeit oder Strukturhervorhebung. Die in Abschnitt 2.4.1 angeführten Vorzüge der Photokarte sollten hier in jedem Falle ausgenutzt werden.
2. Ist eine Detail-Selektion erwünscht oder notwendig, so ist es mit dem Verfahren der automatischen Bildwandlung nicht möglich, selbständig eine Auswahl zu treffen, weil alle Tonsprünge mit der gleichen Gewichtung dargestellt werden (z.B. Vorhänge in Abb. 7/8). Nur bei manueller Hochzeichnung (und natürlich bei Stereokartierung) ist eine interpretative Selektion möglich. Außerdem kann bei der Hochzeichnung eine Ausgleichung orthophotographischer Diskontinuitäten erfolgen, die bei photomechanischer Bildwandlung grundsätzlich mit übernommen werden.

Bei umfangreichen Strichkartierungen bleibt also abzuwägen, ob diese Nachteile in Kauf genommen bzw. durch Retuschen oder durch Abdecken unwesentlicher Details kompensiert werden können. In diesem Fall würde sich die kurze Herstellungszeit der Pictoline-Bilder gegenüber der manuellen Hochzeichnung im Verfahrensablauf vorteilhaft auswirken.

7.3.4 Kombinierte Verfahren

Die bisher beschriebenen Methoden zur Darstellung architektonischer Objekte lassen sich gegebenenfalls kombinieren. So können entzerrte oder differentiell entzerrte Halbtonbilder mit Strichzeichnungen (entstanden durch Stereokartierung, Hochzeichnung oder Handkartierung) vereinigt und gemeinsam reproduziert werden.

Die einfachste Art der Strich-Halbton-Kombination kommt in Betracht, wenn Bildpläne vervollständigt werden müssen. Bei mehrfach abgestuften, stark geneigten oder gekrümmten Objektpartien führt die differentielle Entzerrung nicht zu befriedigenden Ergebnissen. Hier ist eine Ergänzung des Halbtonbildes durch Strichzeichnungen angebracht, wie die Abbildungen C/1 (Klosterkirche Ellwangen, Stuckdecke) und C/2 (Kirche Oberstenfeld, Apsis) im Anhang dieser Arbeit zeigen. Zur Anpassung an den Halbtoncharakter des Bildplanes wurde der Strichzeichnung jeweils ein abgesetzter Grauton unterlegt. Die einzelnen Kapitell- und Architravzonen in Abb. C/1 hätten durch entsprechende Maßstabausgleichung auch photographisch umgebildet werden können. Eine differentielle Entzerrung der Dachzone in Abb. C/2 war dagegen nicht möglich, so daß hier nur die Ergänzung durch eine separate Strichzeichnung in Frage kam.

Im Gegensatz zu diesen technisch bedingten "Flickarbeiten" steht die beabsichtigte Kombination von Strich- und Halbtonbildern. Sie erweist sich als ein geeignetes Mittel zur graphischen Hervorhebung von Objektteilen und unterschiedlichen Objektausstattungen sowie zur optischen Trennung von Schnittebenen und dahinter liegenden Ansichtsflächen. Beispiele für die kombinierte Darstellungsform befinden sich in den Abbildungen C/3 bis C/7 des Anhanges.

Abb. C/3 zeigt einen Teil der westlichen Innenansicht der Klosterkirche Ettal. Die Aufnahmen wurden am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 differentiell entzerrt, die Orthophotos von Orgel und Empore wurden zu einem Bildplan zusammengesetzt. Es war vorgesehen, die gesamten Wandflächen in Strichversion darzustellen. So wurde die auf den flachen bzw. leicht gekrümmten Wandzonen aufgebrauchte Ornamentik aus Orthophotos hochgezeichnet. Die Wiedergabe der Säulen, Kapitelle und Architrave erfolgte dagegen am Zeiss Planimat durch direkte Stereokartierung. Die verschiedenen Verarbeitungstechniken wurden neben der gewollten Hervorhebung des Orgelprospekts auch aus praktischen Gesichtspunkten, die im weiteren angesprochen werden sollen, ausgewählt.

Im Verlauf der Projektbearbeitung kann über die jeweils zu verwendenden Darstellungsformen nach folgenden Kriterien entschieden werden:

1. Ebene oder nahezu ebene Objektteile werden zweckmäßigerweise an einem Entzerrungsgerät auf den gewünschten Maßstab gebracht.
2. Räumlich gegliederte oder gekrümmte Oberflächen müssen differentiell umgebildet werden. Bei größeren Neigungen wachsen jedoch Verfahrensfehler, Abtastfehler und Bewegungsunschärfen so stark an, daß das Orthophoto nicht mehr zum Bildplan weiterverarbeitet werden kann.
3. Eine Hochzeichnung ist in diesem Fall noch möglich. Wie in Abschnitt 10.2 gezeigt wird, ist das Hochzeichnungsverfahren gegenüber der Stereokartierung insbesondere zeitsparend.
4. Bei extrem stark geneigten oder abgestuften Objektteilen versagt das Orthophotoverfahren. Diese Objektpartien werden zweckmäßigerweise gleich von vornherein durch Stereokartierung dargestellt.

Die Abbildungen C/4 (Klosterkirche Neresheim, Südkuppel) und C/5 (Klosterkirche Ottobeuren, Deckenansicht) im Anhang zeigen eine mögliche Trennung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen. Steinkanten und Stuckornamentik wurden in der Deckenansicht der Klosterkirche Ottobeuren als Strichzeichnung (Stereokartierung) wiedergegeben. Die farbigen Fresken und Malereien erscheinen in Halbtondarstellung. Die Deckenansicht erhält durch diese Trennung, d.h. durch die Strich-Halbton-Kombination eine ausgesprochen plastische Wirkung.

Als weitere Beispiele für die kombinierte Darstellungsweise sind in den Abbildungen C/6 und C/7 zwei Vertikalschnitte durch Schloß Linderhof wiedergegeben. Abb. 7/11 zeigt den Verlauf der Schnittlinien (Längsschnitte A, B und Querschnitt D) in einem Obergeschoßgrundrißplan des Schlosses.

In graphischen Schnittdarstellungen (die neben Ansichtsplänen, Grund- Auf- und Seitenrissen in der Regel bei der Bauaufnahme verlangt werden) ist es üblich, außer den Schnittlinien selbst auch die in Sichtrichtung dahinterliegenden Flächen wiederzugeben. Wegen der stark detaillierten Wanddekoration der Innenwände im Obergeschoß war eine lineare Stereokartierung aus Aufwandsgründen praktisch nicht durchführbar. So entschloß man sich für eine Halbtonbearbeitung dieser Ansichtsflächen.

Bei der Bauaufnahme des Schlosses Linderhof (HAUG, HUEBER, KNAPPICH /47/, NAGEL /100/, SEEGER /120/) kamen verschiedene Meß- und Kartiermethoden zur Anwendung. Die Schnittlinien im Erdgeschoß ergaben sich aus einfachen Handmessungen, diejenigen im Obergeschoß durch Stereokartierung am Zeiss Terragraph. Die oben genannten Ansichtsflächen wurden aus entzerrten und differentiell entzerrten Halbtonbildern zusammengesetzt. Die Kartierung der Wand- und Türdekoration im Erdgeschoß entstand durch Hochzeichnung aus entzerrten Bildausschnitten.

Der allgemeine Herstellungsablauf für Bildpläne, Photokarten und kombinierte Strich-Halbtonkarten ist in Abb. 7/12 in einem Flußdiagramm zusammengestellt. Die Übersicht zeigt einige Möglichkeiten der Verarbeitung auf. Dabei können einzelne Zwischenprozesse weggelassen oder auch neue eingeschaltet werden. Die Entscheidung über die Art der Darstellung und Verarbeitung hängt von der Objektstruktur, von der zur Verfügung stehenden Geräteausstattung und nicht zuletzt von den Wünschen, den Vorstellungen und den finanziellen Möglichkeiten des Auftraggebers ab.

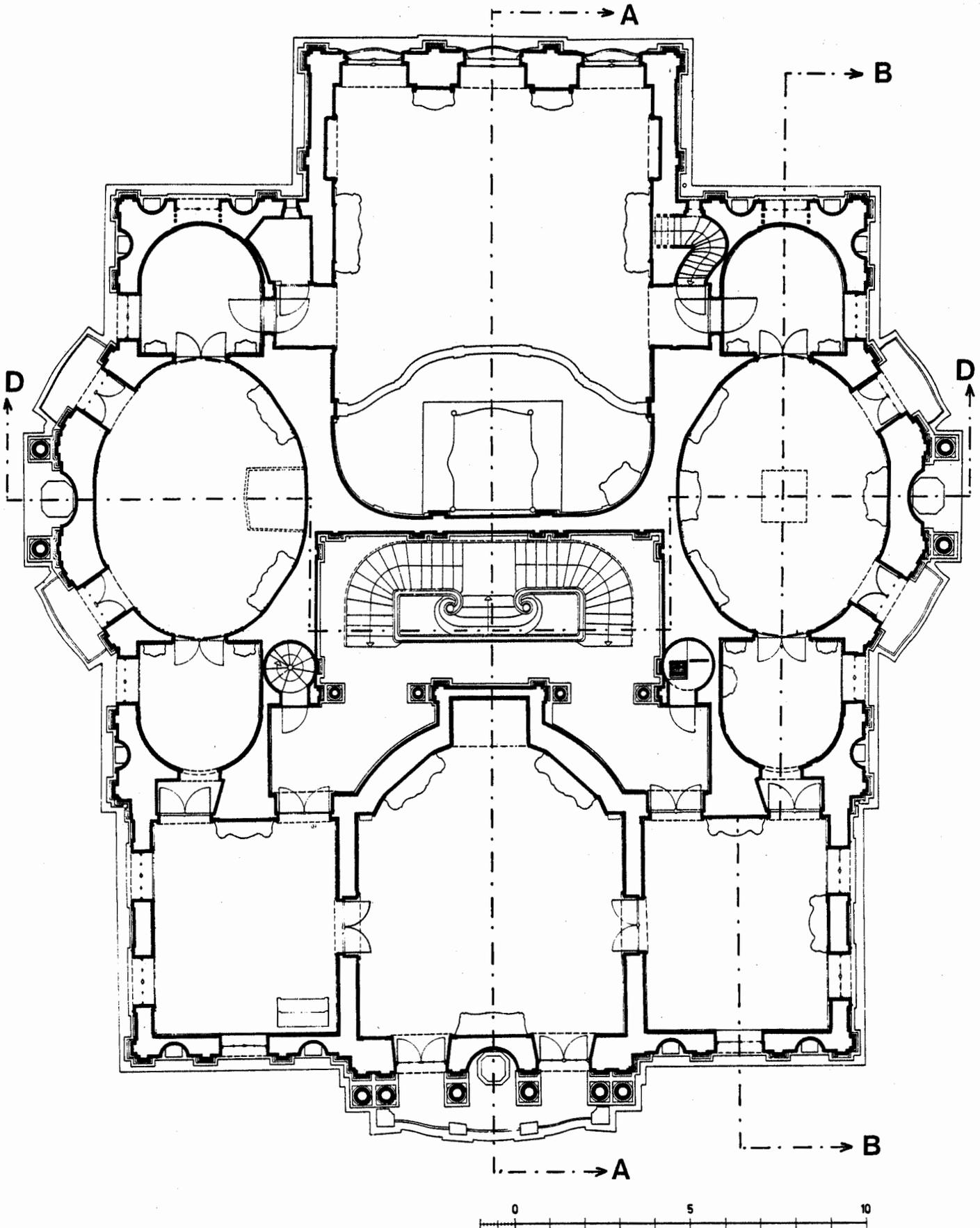


Abb. 7/11. Verlauf der Vertikalschnitte A (Abb. C/6), B und D (Abb. C/7) durch Schloß Linderhof;
Grundrißkartierung am Zeiss Terragraph
- . - . - . Eingetragene Schnittlinien

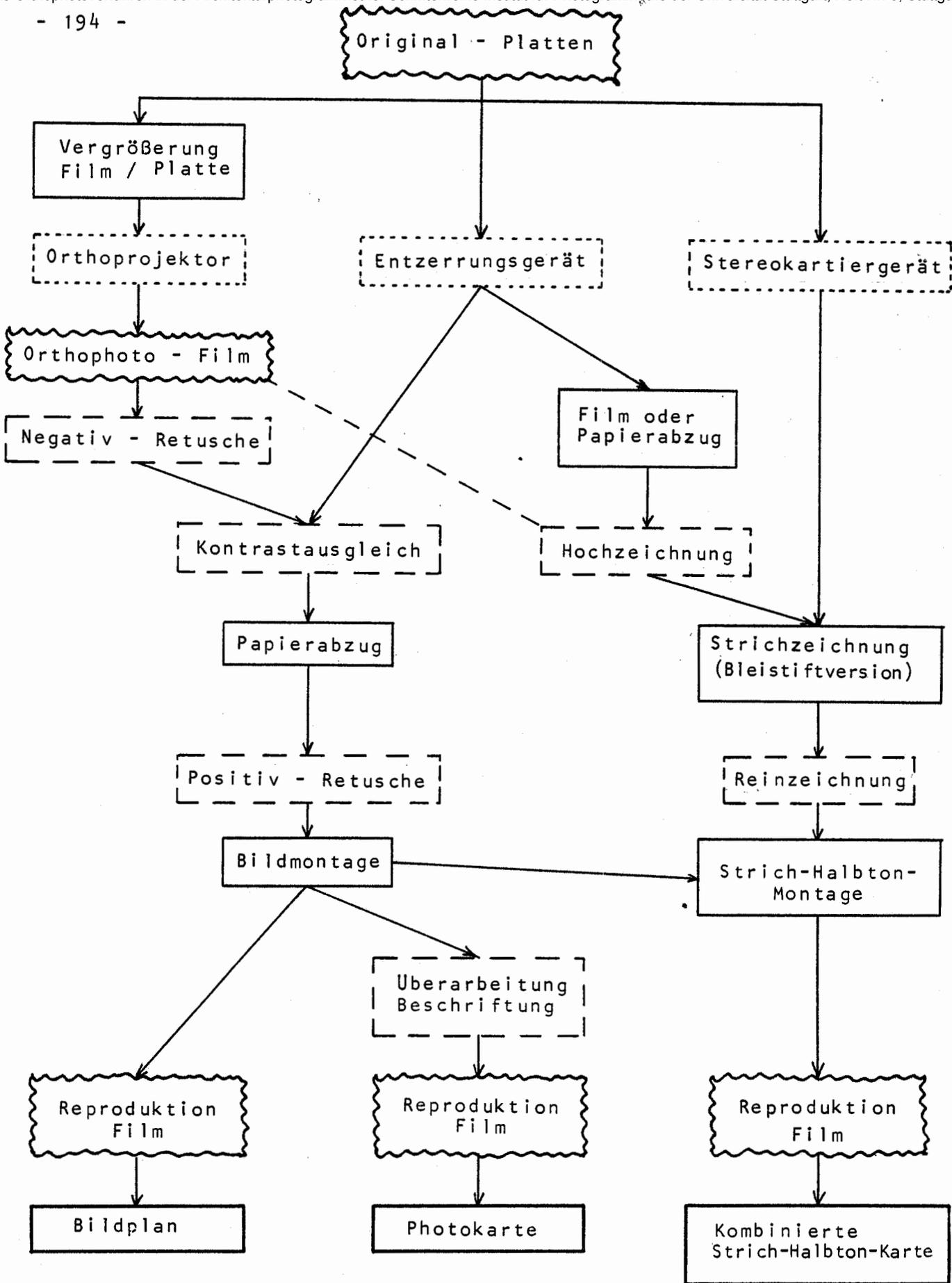


Abb. 7/12 Herstellungsablauf von Bildplänen, Photokarten und kombinierten Strich-Halbton-Karten;

 Positivabzug	 Gerät
 Negativkopie	 Verfahren

8. Allgemeine Übersicht über die bisherige Produktion von Orthophotos in der Architektur

8.1 Beispiele von Architektur-Bildplänen und kombinierten Strich-Halbton-Karten

Im Anhang zu dieser Arbeit sind einige Architektur-Bildpläne und kombinierte Strich-Halbton-Karten zusammengestellt. Teil A (Abbildungen A/1 bis A/12) enthält eine nahezu vollständige Übersicht über die an auswärtigen Instituten bisher erzeugten Orthophotos und Halbton-Abwicklungen. In den Teilen B und C des Anhangs befindet sich eine Auswahl der am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart im Rahmen dieser Untersuchung hergestellten Orthophotos. Die Bilder B/1 bis B/12 entstanden durch Einzelauswertung, die Abbildungen C/1 bis C/7 geben mögliche Kombinationen von Strich- und Halbtonplänen wieder.

Zur Erläuterung der Bildbeispiele wurden die aufnahme- und auswertetechnischen Daten - soweit bekannt - in Tab. 8/1 zusammengestellt. Aus der Übersicht können Angaben über die Art der zur differentiellen Entzerrung herangezogenen Objekte sowie über die jeweiligen Produktionsstätten entnommen werden.

Art der Objekte

Orthophotoauswertungen in der Architektur bezogen sich bisher vorwiegend (zu ca. 60 %) auf Innenraumaufnahmen. Als Objekte dienten Kuppeln, Gewölbe, Deckenteile und Orgelprospekte in Kirchen oder Schlössern. Daneben wurden differentielle Umbildungen an Gebädefassaden sowie an Außenansichten von Türmen und Festungen durchgeführt. Als archäologische Anwendung entstanden zwei Orthophotos eines aus dem Wasser geborgenen Schiffswracks (Abb. B/11). Die großmaßstäbige (1:500 bis 1:2000) Halbtondarstellung von "Dachlandschaften" alter Stadtkerne (aus Luftbildern) gehört ebenfalls in den Bereich der Architekturphotogrammetrie. Das Beispiel (Abb. B/12) zeigt ein Orthophoto der Dachlandschaft des Dorfes Meride im Tessin.

Die in Tab. 8/1 aufgeführten Objekte eignen sich prinzipiell für eine Halbtondarstellung bzw. für die differentielle Entzerrung. Die Objektauswahl kann für die Variationsbreite der möglichen Anwendungen als repräsentativ angesehen werden.

Institutionen

Die bisherigen Versuche zur Herstellung architektonischer Orthophotos wurden vorwiegend an Hochschulinstitutionen (Belgrad, Karlsruhe, Krakau, München, Stuttgart, Wien) durchgeführt, weil dort die notwendigen Geräteausrüstungen (Orthoprojektoren) zur Verfügung stehen. Jeweils ein Orthophoto entstand bei den Geräteherstellern Officine Galileo und Wild sowie bei einem privaten photogrammetrischen Unternehmen. Es ist noch nicht abzusehen, ob in Zukunft auch Behörden der Denkmalpflege Orthophotos selbst herstellen oder eventuell an entsprechend ausgerüstete Institutionen (z.B. Hochschulen, Landesvermessungsämter, Privatfirmen) in Auftrag geben werden.

Abb. im Anhang	Ort	Objekt	Aufnahme durch	Auswertung durch	Aufnahmekammer (Tab. 8/2)	f (mm)	Platten (Film) Format (cm x cm)	θ	Stereoabstufungsgerät	Orthoprojektor evtl. Affinprojektion (affin)	on-/off-line	m _B	m _M	m _K	Opt Int	INT	Δp (mm)	Δx (mm)	t (mm)	v _{Abt} (mm/sec)	v _{Bel} (mm/sec)	T _{Abt} (Std.)	T _{Bel} (Std.)
A/1	Regensburg	Römische Mauer, Teil	Inst Phot Karlsruhe	Wild Heerbrugg	SMK 120	60	9 x 12	0,33	A 8	PPD 8	on	60	15	20	-	-	3	0,2	var	var	var	1,0	0,6
2	Pergamon, TR	Rote Halle, Teil	Inst Phot München	LVA Stuttgart	TAF	160	13 x 18	0,08	Planimat	GZ 1	off	140	100	50	+	1/2	4	1	var	10,0	var	1,0	0,6
3	Ujazd, PL	Mauer, Teil	Inst Phot Krakau	Inst Phot Krakau	UMK	100	13 x 18	-	Topocart	Orthophot B	on	-	-	-	-	-	2	0,5	var	var	var	var	var
4	Krakau, PL	Monument	Inst Phot Krakau	Inst Phot Krakau	UMK	100	13 x 18	-	Topocart	Orthophot B	on	-	-	-	-	-	2	0,5	var	var	var	var	var
5	Krakau, PL	Kirche, Stuckdecke	Inst Phot Krakau	Inst Phot Krakau	UMK	100	13 x 18	-	Topocart	Orthophot B	on	-	-	-	-	-	4	4	1	var	var	1,0	1,0
6	Lezajsk, PL	Kirche, Orgelprospekt	Inst Phot Krakau	Inst Phot Krakau	UMK	100	13 x 18	-	S-Complex	OrthoSimplex	on	300	60	30	-	-	4	4	1	2,5	2,5	1,0	1,0
7	Florenz, I	Donn, Kuppel	Officine Galileo	Officine Galileo	Veroplast	150	13 x 18	0,09	C 8	GZ 1	off	200	60	30	-	-	2	1	var	10,0	var	1,0	1,0
8	Zürich, CH	Opernhaus, Decke	De Waal, NL	Hansa Luftbild	SMK 120	60	9 x 12	-	Planimat	GZ 1	off	-	-	-	-	-	4	8	1	var	var	var	var
9	Wien, A	Nationalbibl., Decke	BDA Wien	IFAG Frankfurt	SMK 120	60	9 x 12	-	A 8	PPD 8	on	-	-	75	-	-	2	0,2	var	var	var	var	var
10	Belgrad, YU	Kalemeđan, Festung	Inst Geod Belgrad	Inst Geod Belgrad	Phototheo	190	13 x 18	-	-	Avioplan OR 1	off	120	-	50	(1)	-	8	0,1	-	var	var	-	-
11	Wien, A	Schottenstift, Decke	BDA Wien	Inst Phot Wien	P 31	100	10 x 15	-	-	Avioplan OR 1	off	120	-	25	(1)	-	8	0,1	-	var	var	-	-
12	Wien, A	Schottenstift, Decke	BDA Wien	Inst Phot Wien	P 31	100	10 x 15	-	-	Avioplan OR 1	off	120	-	25	(1)	-	8	0,1	-	var	var	-	-
B/1	Eitlingen	Fachwerkhaus	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,08	Planimat	GZ 1, affin	on	240	60	60	-	-	2	2	1	2,5	2,5	2,5	2,5
2	Stuttgart	Klassizist. Fassade	LDA Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,08	Planimat	GZ 1, affin	on	250	90	90	-	-	2	2	1	2,5	2,5	3,2	3,2
3	Neuchâtel, B	Taubenturm	De Waal, NL	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,06	Planimat	GZ 1	off	330	100	40	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	0,7	2,0
4	Linderhof	Schloß, Südgiebel	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,19	Planimat	GZ 1, affin	on	100	27	27	-	-	2	2	1	2,5	2,5	1,2	1,2
5	Strasbourg, F	Münster, Hauptportal	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,06	Planimat	GZ 1	off	340	100	40	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	0,8	3,0
6	Amsterdam, NL	Vondelkerke, Decke	De Waal, NL	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,08	Planimat	GZ 1, affin	on	250	62	62	-	-	2	2	1	2,5	2,5	1,8	1,8
7	Etzai	Klosterkirche, Decke	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,09	Planimat	GZ 1	off	220	60	24	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	1,0	2,0
8	Ottobeuren	Kirche, Westkuppel	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,05	Planimat	GZ 1, affin	on	420	110	110	-	-	2	2	1	2,5	2,5	1,5	1,5
9	Ottobeuren	Kirche, Hauptkuppel	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,04	Planimat	GZ 1	off	550	145	58	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	2,5	6,5
10	Linderhof	Schloß, Speisezimmer	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 40	60	9 x 12	0,06	Planimat	GZ 1	off	100	27	10,8	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	1,7	5,0
11	Hastings, GB	Schiffsrumpf, Holz	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 40	60	9 x 12	0,16	Planimat	GZ 1, affin	on	40	11	11	-	-	2	2	1	2,5	2,5	0,7	0,7
12	Meride, CH	Dachlandschaft	Verm Dir Bern, CH	Inst Phot Stuttgart	Wild RC 5	152	23 x 23	0,63	Planimat	GZ 1	on	2500	1000	1000	-	-	2	2	1	2,5	2,5	2,0	2,0
C/1	Eilwangen	Kirche, Stuckdecke	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,18	Planimat	GZ 1	off	110	30	12	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	2,5	5,2
2	Oberstenfeld	Kirche, Apsis	LDA Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,17	Planimat	GZ 1, affin	on	120	30	30	-	-	2	2	1	2,5	2,5	1,5	1,5
3	Etzai	Kirche, Orgelprospekt	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,05	Planimat	GZ 1	off	400	120	48	+	1/2	1,6	2	1	var	5,0	1,5	4,0
4	Mereshim	Kirche, Südkuppel	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,06	Planimat	GZ 1, affin	on	330	100	100	-	-	2	2	1	2,5	2,5	0,9	0,9
5	Ottobeuren	Kirche, Deckenansicht	Inst Phot Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 120	60	9 x 12	0,05	Planimat	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Linderhof	Schloß, Längsschnitt	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 40	60	9 x 12	-	C 8	GZ 1	on	-	-	25	-	-	2	2	1	5,0	5,0	-	-
7	Linderhof	Schloß, Querschnitt	Inst Baug Stuttgart	Inst Phot Stuttgart	SMK 40	60	9 x 12	-	C 8	GZ 1	on	-	-	25	-	-	2	2	1	5,0	5,0	-	-

Tab. 8/1 Zusammenstellung der bisherigen Orthophoto-Projekte in der Architektur, Aufnahme- und Auswertedaten

Inst Phot | Institut für Photogrammetrie
 Inst Geod | Geodätisches Institut
 Inst Baug | Institut für Baugeschichte
 IFAG | Institut für Angewandte Geodäsie
 BDA | Bundesdenkmalamt
 LDA | Landesvermessungsamt
 LVA | Landesvermessungsamt
 Verm Dir | Vermessungsdirektion

θ | Basisverhältnis
 mg | Bildmaßstabzahl
 m_B | Modellmaßstabzahl
 m_M | Orthophotomaßstabzahl
 m_K | Optische Interpolation (GZ 1)
 Opt Int | Entzerrung 1. Ordnung (Avioplan OR 1)
 INT | Interpolationsgrad (Elektrische Interpolation)
 t | Blendenbreite (Belichtungszeit)

Δp | Profilabstand im Stereobauwertegerät
 Δx | Streifenbreite im Orthoprojektor
 v_{Abt} | Abtastgeschwindigkeit im Modell
 v_{Bel} | Abtastgeschwindigkeit bei der Belichtung
 var | variable Abtastgeschwindigkeit
 T_{Abt} | Abtastzeit im Modell
 T_{Bel} | Belichtungszeit des Orthophotos

Erläuterung der Abkürzungen

Bemerkungen zur graphischen Aufbereitung von Bildplänen

Einige der im Anhang befindlichen Bildpläne wurden einer Retusche unterzogen. Dabei wurden insbesondere die im on-line-Verfahren (Zeiss Planimat / GZ 1, Affinprojektion ($k = 2,5$) d.h. kleiner Orthophotomaßstab, differentielle Entzerrung 0. Ordnung, feste Abtastgeschwindigkeit) hergestellten Orthophotos (Abbildungen B/1, B/2, B/4, B/6, B/8, C/2, C/4) graphisch überarbeitet. Die Retusche wurde vorgenommen, um die (durch die ungünstige Auswertekonstellation bedingten) Auswirkungen von Abtast- und Verfahrensfehlern zu beseitigen und damit das photographische Ergebnis den übrigen (mit geeigneterer Geräteausrüstung d.h. mit Entzerrung 1. Ordnung und variabler Abtastgeschwindigkeit produzierten) Bildplänen vergleichbar zu machen. Inwieweit auch die Orthophotos der auswärtigen Institutionen (Abbildungen A/1 bis A/12) einer Retusche unterzogen wurden, ist nicht bekannt.

8.2 Diskussion der Projektparameter für Aufnahme und Auswertung

Im folgenden werden die bei den bisherigen Orthophoto-Projekten im Bereich der Architektur verwendeten Geräte (Aufnahmekammern, Orthoprojektoren) sowie einige wesentliche Projektparameter (Basisverhältnis, Auswertemaßstab, Spaltgröße, Profiliergeschwindigkeit) beschrieben und im Hinblick auf einen vorteilhaften Einsatz (vor allem bezüglich Genauigkeit und Zeitaufwand) miteinander verglichen.

1. Aufnahmekammern

Die im Zusammenhang mit der Herstellung von Orthophotos verwendeten terrestrischen Aufnahmekammern sind in Tab. 8/2 (nach Bildwinkeln geordnet) aufgeführt.

Hersteller	Kammer	Brennweite f (mm)	Platten/Film format (cm ²)	Max. 2 α (°)	Bildwinkel Bezeichnung
Zeiss	SMK 40/120	60	9 x 12	93,7	WW
Jenoptik	UMK	100	13 x 18	91,9	WW
Wild	P 31	100	10 x 15	71,3	ZW
Galileo	Veroplast	150	13 x 18	69,5	ZW
Jenoptik	TAF	160	13 x 18	65,2	ZW
Jenoptik	Phototheo	190	13 x 18	56,7	NW

Tab. 8/2 Terrestrische Aufnahmekammern zu den Abbildungen A/1 bis C/7

Auf Grund des schmalen Bildwinkels (günstige Fehlereigenschaften, siehe Abschnitt 4.1.2) und des großen Bildformates (hohe Bildqualität) erscheint aus dieser Zusammenstellung der Phototheo 19/1318 von Jenoptik für die Aufnahme zu Orthoprojektionszwecken am geeignetesten. Im Gegensatz dazu steht die bisher vorwiegende Verwendung der Weitwinkel-Stereomeßkammer Zeiss SMK 40/120. Dieser (fehlertheoretisch ungünstige) Einsatz kam zustande

- a) auf Grund örtlicher Verhältnisse (z.B. kurze Aufnahmeentfernung),
- b) weil meist keine andere Kammerausrüstung zugänglich war,
- c) weil einige Aufnahmen ursprünglich nicht für die Bildplanherstellung vorgesehen waren.

Wie die Bildbeispiele im Anhang zeigen, konnten auch mit diesen Weitwinkel-Aufnahmen gute Entzerrungsergebnisse erzielt werden. Bei Verwendung langbrennweitiger Kammeren würden sich jedoch zusätzlich die Auswerteparameter Streifenbreite, Blendenbreite und Abtastgeschwindigkeit entsprechend vergrößern lassen, wodurch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit möglich wäre.

2. Basisverhältnis bei der Aufnahme

Das Basisverhältnis bei den durchgeführten Versuchen lag zwischen 1:3 und 1:25 und betrug im Durchschnitt ca. 1:10. Das bei den Kuppelaufnahmen meist kleine Basisverhältnis ist auf die Verwendung der Stereomeßkammer SMK 120 ($b = 1,20 \text{ m}$) zurückzuführen. Wie in Abschnitt 6.3.1 gezeigt wurde, ergab sich dadurch eine Höhenabtastgenauigkeit von durchschnittlich nur 3‰ der Aufnahmeentfernung. Im Hinblick auf eine Reduzierung des Abtastfehlers sollte daher ein größeres Basisverhältnis angestrebt werden.

3. Orthoprojektionssysteme

Die differentielle Entzerrung der Architekturaufnahmen erfolgte bei den Beispielen mit fünf verschiedenen Gerätetypen, die im folgenden kurz beschrieben und bezüglich ihrer Eignung für Architekturumbildungen miteinander verglichen werden sollen.

Zu den Abbildungen A/2, A/8, A/9 sowie B/1 bis B/12 und C/1 bis C/7

Die häufigste Verwendung fand bisher (und auch in dieser Arbeit) das Orthoprojektionssystem Zeiss PLANIMAT D 2 - GZ 1 bzw. STEREOPLANIGRAPH C 8 - GZ 1, das in Abb. 3/5 dargestellt ist.

Eine Beschreibung der Geräte befindet sich in Abschnitt 3.2.3.

Im off-line Betrieb kann bei diesem System mit variabler Abtastgeschwindigkeit gearbeitet werden, was für die Nachführung architektonischer Strukturen besonders wichtig ist. Die Möglichkeit zur "Elektrischen Interpolation" (Abb. 3/7) erlaubt für die Orthoprojektion das lineare Einschalten mehrerer Zwischenprofile ohne zusätzliche Belastung des Operateurs. Durch Verwendung des Zusatzes für "Optische Interpolation" (Abb. 3/8) lassen sich die Verfahrensfehler erheblich reduzieren. Diese Gerätekombination bietet also bezüglich Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit eine Reihe von Vorteilen bei der Produktion von Architektur-Orthophotos.

Zu Abbildung A/7

Das Auswertesystem ORTHOPHOTO-SIMPLEX (Abb. 8/3) von Officine Galileo (FERRI /27/) arbeitet ausschließlich im on-line-Betrieb. Der Orthoprojektion ist das Prinzip der funktionalen optischen Bildübertragung (Abb. 3/3b) zugrunde gelegt.

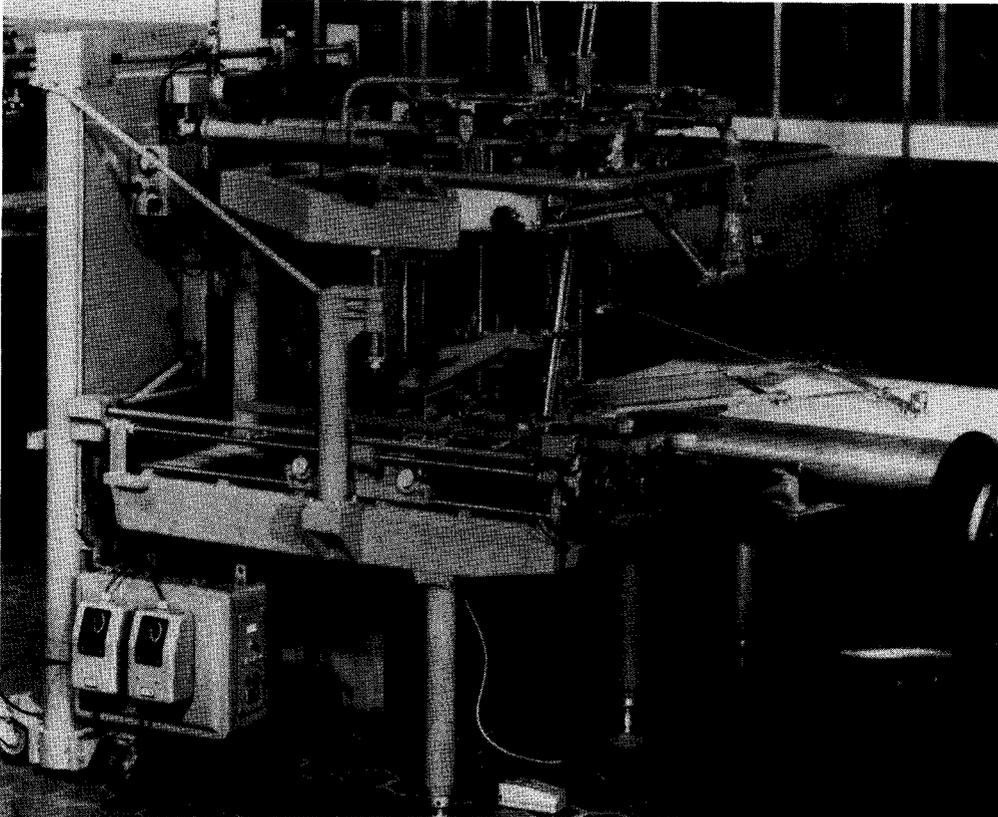


Abb. 8/3 Orthophoto-Simplex, Officine Galileo

Als Projektionsfläche dient eine vertikale Ebene. Die Umbildung erfolgt als Entzerrung 0. Ordnung ohne Korrektur der Objektquerneigung. Die Abtastgeschwindigkeit kann während des Profilaufs nicht verändert werden. Durch die Gerätebereiche des Steuergerätes Stereosimplex II c ($b_{\min} = 92 \text{ mm}$, $z_{\max} = 440 \text{ mm}$) ist das Basisverhältnis auf ein Minimum von etwa 1:5 begrenzt. In Anbetracht des Entzerrungsgrades, der festen Abtastgeschwindigkeit und der Beschränkung im Basisverhältnis dürfte dieses Gerätesystem für Orthophotoarbeiten in der Architektur nur in beschränktem Umfang geeignet sein.

Zu den Abbildungen A/1 und A/10

Der Orthophotozusatz PP0 8 zum Wild A 8 (Abb. 8/4) ist in ähnlicher Weise aufgebaut wie das Gerät von Officine Galileo. Die Projektionsfläche liegt hier jedoch auf einer zylinderförmigen Trommel (PÖLZLEITNER /108/).

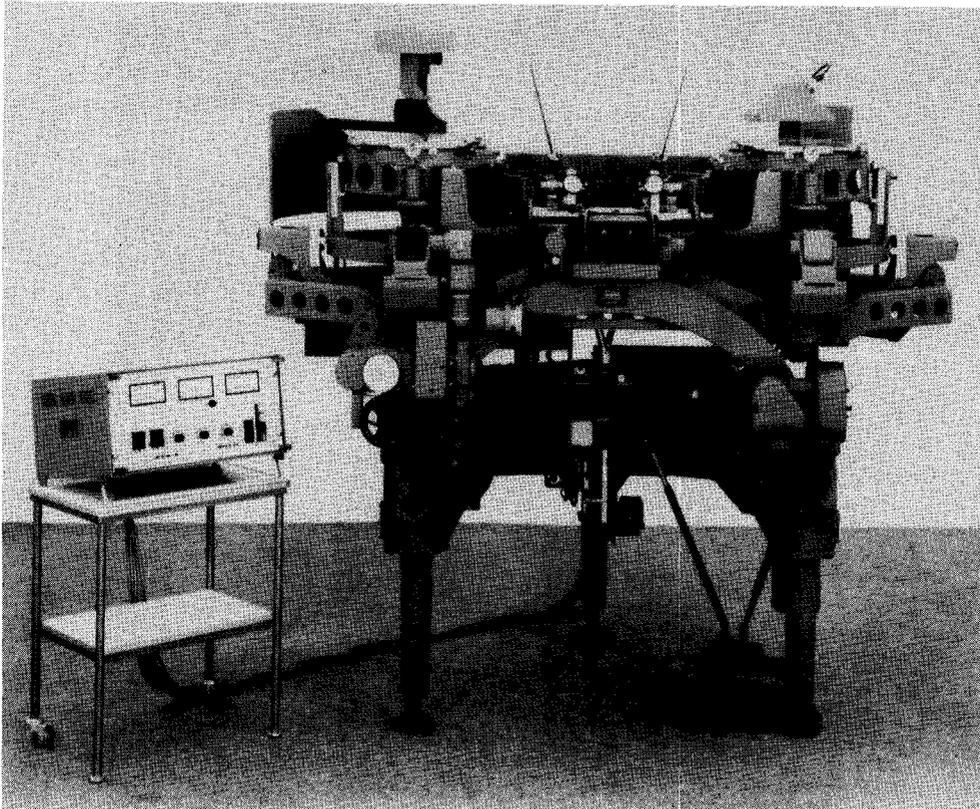


Abb. 8/4 Orthophotozusatz PP0 8 zum Wild A 8

Das realisierbare Basisverhältnis ist bei diesem System größer als $1:5,4$. Die kleinstmögliche Brennweite beträgt $f = 98$ mm, der z-Bereich umfasst 175 mm. Die Entzerrung erfolgt auch hier ohne Querneigungskorrektur. Diese Fakten schränken den Anwendungsbereich des Gerätes für architektonische Zwecke erheblich ein.

Auf der anderen Seite ist eine kontinuierliche Variation der Abtastgeschwindigkeit (Lichtregelung durch Graukeil) und damit eine weitgehende Anpassung an die Objektfläche möglich. Die Blendenbreite beträgt für die Projektion von Schwarz-Weiß-Bildern 0,2 mm, was auch bei steilen Objektpartien eine gute Bildschärfe im Orthophoto garantiert. Das Gerätesystem Wild A 8 - PP0 8 ist also für die Herstellung architektonischer Orthophotos prinzipiell einsatzfähig, unterliegt aber deutlichen Begrenzungen bezüglich der Anwendung.

Zu den Abbildungen A/3 bis A/6

Am photogrammetrischen Institut der Universität Krakau wird seit einigen Jahren mit der Ausrüstung TOPOCART-ORTHOPHOT B (Abb. 8/5) von Jenoptik gearbeitet (SITEK 7/1257, SZANGOLIES 7/1327).

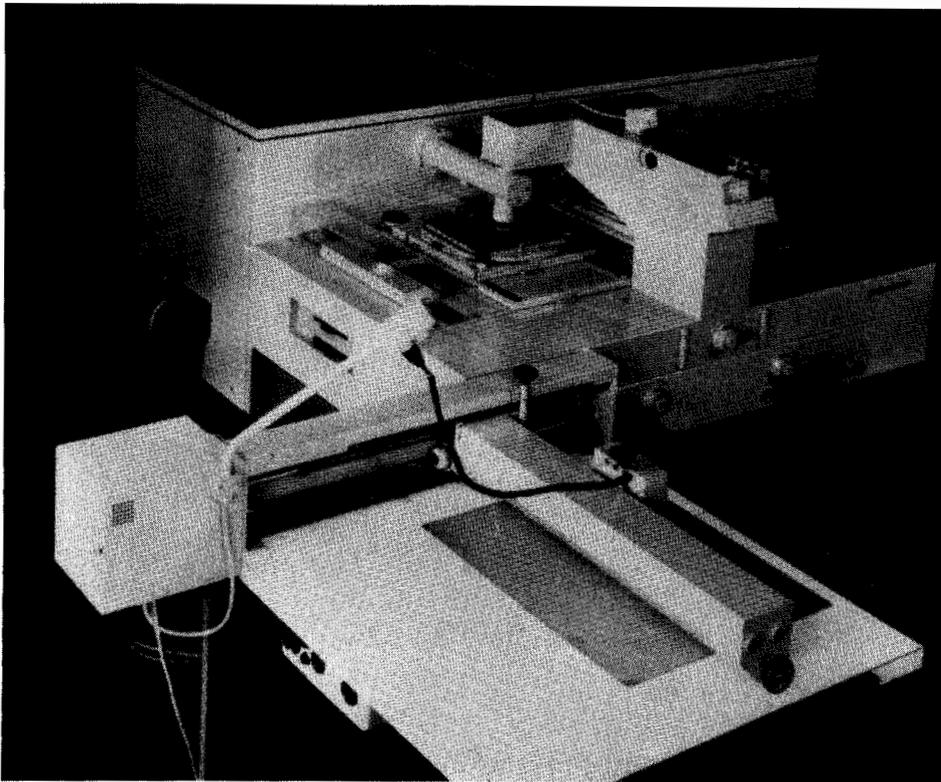


Abb. 8/5 Jenoptik Topocart-Orthophot B

Die Funktionsweise des Gerätes entspricht ungefähr der des Wild PPO 8. Die für eine variable Abtastgeschwindigkeit notwendige Regelung der Lichtzufuhr wird hier ebenfalls von einem Graukeil vorgenommen. Eine Entzerrung 1. Ordnung ist in der Ausbaustufe "B" nicht möglich. Das neue off-line-System Topocart-Orthophot C gestattet dagegen eine gewisse Korrektur der Objektquerneigung. Von Vorteil für die Auswertung terrestrischer Aufnahmen sind der Brennweitenbereich ab $f = 50 \text{ mm}$ sowie die Möglichkeit der Basiseinstellung bis herunter zu $b_x = 0$. Durch eine spezielle Zusatzeinrichtung kann im on-line-Verfahren während des Profilaufs gestoppt werden, um Diskontinuitäten an der Objektfläche zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 6.5).

Zu den Abbildungen A/11 und A/12

Zu einer neuen Gerätegeneration ist der digital gesteuerte offline-Orthoprojektor Wild AVIOPLAN OR 1 (Abb. 8/6) zu zählen (KRAUS und TSCHANNERL /76/, STEWARDSON /130/138/).

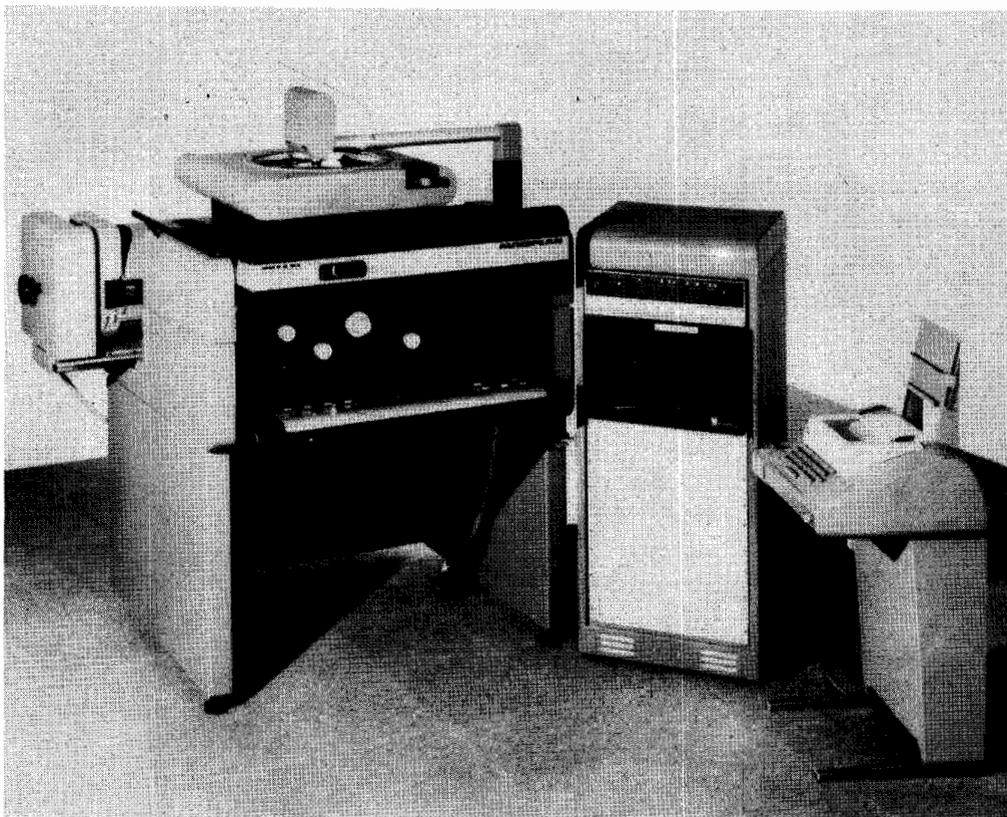


Abb. 8/6 Wild AvioPlan OR 1

Durch die funktionale Zuordnung zwischen Vorlage und Abbild und in Verbindung mit der digitalen Steuerung ist es möglich, Bildpunkte an eine beliebige Stelle der Auffangfläche zu projizieren. Dadurch lassen sich Objekte in den verschiedensten Perspektiven und Projektionsarten (z.B. Abwicklungen, KRAUS und TSCHANNERL /76/) photographisch wiedergeben. Diese Möglichkeiten zeichnen den Wild AvioPlan OR 1 (und auch entsprechende andere Geräte, z.B. O.M.I. Orthoprinter OP/C-2) für architektonische Anwendungen in besonderem Maße aus.

Die Eingabe der Daten erfolgt in der Regel über ein Magnetband, das die direkt gemessenen oder aus Modellkoordinaten berechneten Bildkoordinaten enthält. Diese Werte steuern durch Servomotoren das horizontal eingelegte Bild sowie das Zoom-System für die Maßstabsangleichung und die Prismen zur Bildrotation. Durch Zwischenspeicherung der vorausgegangenen Bildprofile ist eine Korrektur der Objekt-Querneigung, d.h. eine Entzerrung 1. Grades möglich. Die Blendenbreite beträgt für Schwarz-Weiß-Aufnahmen nur 0,1 mm, wodurch eine hohe Bildqualität erzielt wird. Das System erscheint also auch wegen der guten Objektannäherung (in und quer zur Profilstreifenrichtung) insbesondere für Umbildungen im Bereich der Architektur geeignet.

4. Auswertemaßstäbe

Bei den bisher durchgeführten Versuchen lag der Bildmaßstab der Aufnahmen zwischen 1:40 und 1:550. Als Mittelwert ergab sich etwa 1:230. Der Modellmaßstab im Stereoauswertegerät betrug im Durchschnitt etwa 1:70. Der Orthophotomaßstab schwankte zwischen 1:11 und 1:140. Als Mittelwert kann ca. 1:50 angegeben werden. Zu diesem Mittelwert haben u.a. etwa 10 Orthophotos beigetragen, die am Orthoprojektor GZ 1 affin ($k = 2,5$) ausgewertet wurden. Durch die Affinauswertung ergab sich jeweils ein entsprechend kleiner Orthophotomaßstab, was aus fehlertheoretischen Gesichtspunkten (Abschnitt 6.1 und 6.2) ungünstig war. Bei zukünftigen Auswertungen wird man bestrebt sein müssen, den Orthophotomaßstab möglichst groß zu wählen.

5. Dimensionen des Belichtungsspaltes

Die für die Entzerrung verwendeten Schlitzlängen (Streifenbreiten) betragen in der Regel $\Delta x = 2$ mm. Bei den Auswertungen am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 wurde meist mit "Optischer Interpolation" und linearer Einrechnung ("Elektrischer Interpolation") von jeweils einem Zwischenprofil (INT = 1/2) gearbeitet. Bei der photographischen Abwicklung (Abbildungen A/11 und A/12) im Avioplan OR 1 wurde eine Spaltbreite von $\Delta x = 8$ mm eingesetzt.

Die Blendenbreite t ergab sich aus den jeweiligen gerätetechnischen Möglichkeiten und betrug beim Wild Avioplan 0,1 mm, beim Wild PPO 8 0,2 mm und beim Jenoptik Orthophot B 0,5 mm. Alle anderen Auswertungen (vornehmlich am Zeiss GZ 1) wurden mit einem Spalt von $t = 1$ mm Breite durchgeführt.

6. Profiliergeschwindigkeit

Die Abtastgeschwindigkeit im photogrammetrischen Modell war bei den meisten Versuchen variabel. Über den Zeitaufwand bei der Abtastung (am Zeiss Planimat) war es möglich, die mittlere (variable) Profiliergeschwindigkeit zu bestimmen. Sie betrug ca. 3,3 mm/sec. Dieser Wert liegt etwa 40 % über der festen Fahrgeschwindigkeit von 2,5 mm/sec bei on-line-Orthoprojektion am Zeiss GZ 1. Das bedeutet, daß in flachen Objektzonen mit höherer Geschwindigkeit gefahren werden kann.

Die off-line-Projektion am Zeiss GZ 1 erfolgte bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen mit $v = 5$ mm/sec, um einen optimalen Profilmachlauf der Photozelle im Lesegerät zu gewährleisten.

7. Zeitaufwand für die Orthophoto-Herstellung

Die Herstellungszeit für ein Orthophoto im on-line-Betrieb am Zeiss GZ 1 (Affinprojektion, kleiner Orthophotomaßstab) betrug durchschnittlich 1,7 Stunden (ohne Nebenarbeiten). Als Mittelwert für die analoge Profilspeicherung eines Modells ergab sich bei 1,25-facher Profilanzahl ($\Delta p = 1,6$ mm) gegenüber der on-line-Version ($\Delta p = 2$ mm) eine Zeit von etwa 1,5 Stunden. Die Orthoprojektion im Zeiss GZ 1 (off-line) dauerte im Durchschnitt etwa 4 Stunden.

9. Genauigkeit orthophotographischer Auswertungen in der Architekturphotogrammetrie

Bei der Beurteilung der Anwendbarkeit verschiedener Verarbeitungs- und Darstellungstechniken nimmt die Frage der Genauigkeit einen bedeutenden Platz ein. Vor allem bei der Einführung neuer Verfahren muß der Nachweis einer äquivalenten Genauigkeitsleistung erbracht werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist daher die Genauigkeit von Architektur-Orthophotokarten und Hochzeichnungsentwürfen im Vergleich zur konventionellen Stereokartierung von besonderem Interesse. Während in den bisherigen Abschnitten im einzelnen die Fehlereigenschaften der Orthophotos untersucht wurden, soll nun hier der Gesamtprozeß betrachtet werden.

Die Genauigkeit der graphischen bzw. photographischen Endprodukte hängt von der Grundlagengenauigkeit (Paßpunkte), der Genauigkeit der Aufnahme- und Auswerteprozesse (Aufnahme, Modellbildung, Orthophotoherstellung) sowie von der Genauigkeit der Weiterverarbeitungstechniken (Reproduktion, evtl. Hochzeichnung) ab. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Einzelprozesse und des gesamten Verfahrens wurden spezielle Untersuchungen durchgeführt, die im folgenden besprochen werden sollen.

Die Fehlereigenschaften von der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme bis zur Orthophotoherstellung wurden an einem eigens für diese Untersuchung eingerichteten Testfeld (Punktfeld) ermittelt. Die Orthophotogesamtgenauigkeit ergab sich an vier Objektbeispielen durch Vergleich von Orthophoto-Kontrollpunkten mit entsprechenden, unabhängig ermittelten Soll-Werten. Dieselben Vergleichspunkte wurden außerdem zur Überprüfung der Genauigkeit von Hochzeichnungs- und Stereokartiertechniken verwendet. Zusätzlich wurde die Genauigkeit der reprographischen Weiterverarbeitung (Papierverzug, Mosaikarbeiten, Reproduktion) untersucht. Die bei der Bauaufnahme "Schloß Linderhof" im Jahre 1973 angefertigten kombinierten Strich-Halbtton-Pläne im Maßstab 1:50, bei deren Herstellung sämtliche Arbeitstechniken zum Teil unter ungünstigsten Voraussetzungen zum Einsatz kamen, dienten in diesem Rahmen zur Bestätigung der einzelnen Genauigkeitsanalysen.

9.1 Genauigkeit der einzelnen Verfahrensabschnitte

9.1.1 Paßpunktsystem

Die Grundlage photogrammetrischer Arbeiten sind Paßpunkte, die eine Zuordnung zwischen Modellsystem und Objekt erlauben. Paßpunkte können mit geodätischen Methoden oder auch photogrammetrisch bestimmt werden. Ihre Genauigkeit hängt dabei stark vom investierten Meßaufwand und den zur Verfügung stehenden Geräten bzw. Rechenprogrammen ab. Bei Architekturaufnahmen mit Stereo-Meßkammern (Normalfall) kann unter Umständen, d.h. bei niedrigen Genauigkeitsansprüchen, auf Paßpunkte verzichtet werden.

Die geodätische Paßpunktbestimmung erfolgt auch an architektonischen Objekten nach den traditionellen Verfahren, z.B. in der Lage durch Vorwärtseinschneiden, Bogenschnitt oder Polaraufnahme (evtl. mit registrierenden elektronischen Tachymetern, z.B. Zeiss RegElta), in der Höhe trigonometrisch oder durch Nivellement. Bei der übergeordneten Triangulation bzw. Polygonierung wird in der Regel mit Zwangszentrierung gearbeitet. Die Genauigkeit derartig bestimmter Paßpunkte liegt je nach Aufwand etwa im Bereich von 1 mm bis 20 mm. Bei der Vermessung des Aachener Doms wurde nach LÖSCHNER /84/ eine Genauigkeit von 5 mm erzielt. Die für die Bauaufnahme des Schlosses Linderhof (HAUG, HUEBER und KNAPPICH /47/) vermessenen Paßpunkte hatten eine Genauigkeit von etwa 10 mm. Über ähnliche Werte berichtete WROBEL in /140/.

In den letzten Jahren wurden zunehmend Versuche zur photogrammetrischen Punktbestimmung an Bauwerken angestellt (HELL /49/, KUPFER /80/, MOHL und MOHR /97/, WROBEL /140/141/). Dabei kamen Verfahren der Streifen- und Blocktriangulation mit Bündeln und Unabhängigen Modellen zum Einsatz.

KUPFER /80/ erhielt nach der Bündelausgleichung eines Aufnahme-streifens (Fassadenfront in der Bonner Südstadt) für signalisier-te Punkte eine Genauigkeit von 5 mm. Nach WROBEL /140/ ergab sich für natürliche Punkte (an einer Fassadenfront im Innenhof des Klosters Walkenried/Harz) eine Absolutgenauigkeit von etwa 10 mm. Dabei muß erwähnt werden, daß die für die Ausgleichung verwendeten terrestrischen Paßpunkte mit etwa der gleichen Genauigkeit eingemessen waren. Die geodätischen und photogram-metrischen Verfahren zur Punktbestimmung sind bezüglich der (bei jeweils vertretbarem Aufwand) zu erreichenden Genauigkeit von etwa 5 bis 10 mm (am Objekt) annähernd gleich. Diese Genau-igkeit ist in der Regel für Zwecke der photogrammetrischen Bau-aufnahme ausreichend. Im allgemeinen brauchen Paßpunkte nicht wesentlich genauer bestimmt zu werden, als vom Objekt und vom Aufwand her sinnvoll ist.

Testfeld für Genauigkeitsuntersuchungen an Architektur-Orthophotos

Für die Untersuchung der Aufnahme- und Auswertegenauigkeit im orthophotographischen Prozess wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Paß- und Vergleichspunktfeld (Abb. 9/1) angelegt, das im folgen-den beschrieben werden soll.

Dieses Testfeld lag auf einer vertikalen Ebene (Betonwand) und hatte eine Größe von 5 x 5 m². An der Fläche, die später in Orthogonalprojektion dargestellt werden sollte, wurden 81 Punkte (Signale) in rasterförmiger, quadratischer Anordnung angebracht. Um in allen Phasen der Weiterverarbeitung eine optimale Erkenn-barkeit und Identifizierung der Punkte zu gewährleisten, wurde vor der photogrammetrischen Aufnahme ein Signaltest durchgeführt. Die geeignetste Marke bestand bei diesem Versuch aus einem schwarzen Punkt (Papier, Durchmesser 8 mm) auf einer gelben Fläche (Papier) von 12 mm Durchmesser. In die Mitte des schwar-zen Punktes war ein Loch von 1 mm Durchmesser gebohrt (vorherige Zentrierung unter einem Mikroskop), durch welches die gelbe Grund-fläche bei der Theodolit-Einmessung sichtbar war. Das Signal be-fand sich auf grauen Karton-Quadraten der Größe 4 x 4 cm².

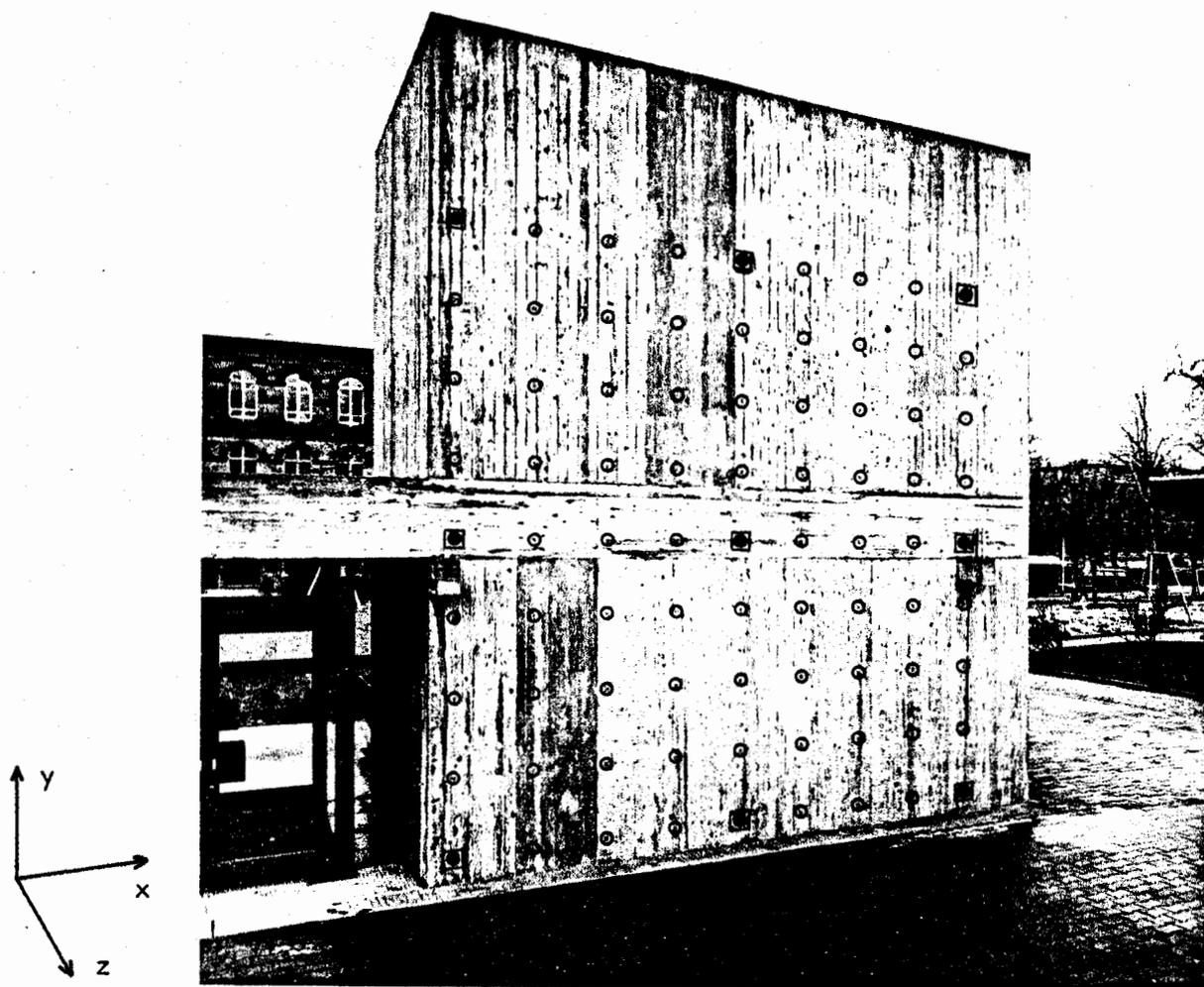


Abb. 9/1 Testfeld mit 81 signalisierten Punkten und Angabe des Objektkoordinatensystems; Die 9 hervorgehobenen Punkte wurden mit dem Theodolit eingemessen.

Da das Testfeld speziell für Genauigkeitsuntersuchungen eingerichtet wurde, mußte auf eine präzise Punktbestimmung Wert gelegt werden. Der geodätische Meßaufwand für 81 Punkte erschien dabei zu hoch, zumal die Vermessung und die photogrammetrische Aufnahme zeitlich beieinanderliegen sollten, weil die Signalzeichen nur auf die Betonwand aufgeklebt waren. Deshalb wurden lediglich 9 symmetrisch verteilte Rasterpunkte (siehe Abb. 9/1) durch Vorwärtsschnitt und trigonometrische Höhenübertragung (Wild T 2) bestimmt. Die Koordinaten der übrigen (72) Punkte sollten photogrammetrisch ermittelt werden. Die Aufnahme erfolgte mit der Stereomeßkammer Zeiss SMK 120 aus einer Entfernung von 8 m. Um eine gute Abstandsgenauigkeit (m_z , Koordinatensystem nach Abb. 9/1) zu erhalten, wurde eine Basis von 4,4 m (Basisverhältnis 1:1,8) gewählt. Es waren also zwei Einzelaufnahmen mit einer Teilkammer der SMK erforderlich. Die Photoplatten wurden am Präzisions-Stereokomparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Die relative und absolute Orientierung des Modells sowie die Bestimmung der 72 Neupunkte erfolgten rechnerisch. Für die Transformation standen 9 (geodätisch vermessene) Paßpunkte zur Verfügung.

Die Genauigkeit der terrestrisch bestimmten Paßpunkte wurde aus der Richtungsgenauigkeit ($m_r = 7^{\text{cc}}$) sowie aus den Höhendifferenzen dy der von beiden Theodolit-Standpunkten aus berechneten Objektpunkte abgeleitet. Sie betrug in allen 3 Koordinatenrichtungen

$$m_x = m_y = m_z = 0,1 \text{ mm.}$$

Die Länge der Standlinie wurde mit der Basislatte gemessen und ergab sich zu $12,707 \text{ m} \pm 0,6 \text{ mm}$. Sie wurde für die weitere Untersuchung als fehlerfrei angenommen, weil sich ein Basisfehler nur auf den Maßstabsfaktor des gesamten Systems auswirkt.

Die Genauigkeit der photogrammetrisch bestimmten Objektpunkte kann mit Hilfe der Fehlerformeln (STARK 7/28/) für den stereophotogrammetrischen Normalfall, der hier genähert vorlag, abgeschätzt werden. Mit einer (aus mehreren Versuchen abgeleiteten) Bildkoordinatengenauigkeit von $\sigma_k = 3 \mu\text{m}$ (Abschnitt 9.1.2) bei Messung am Zeiss PSK 2, mit einem Bildmaßstab von 1:133 und einer Aufnahmebasis von $4,4 \text{ m}$ erhält man aus diesen Formeln eine mittlere theoretische Koordinatengenauigkeit am Objekt von

$$\sigma_x = 0,4 \text{ mm} \quad \sigma_y = 0,4 \text{ mm} \quad \sigma_z = 1,0 \text{ mm.}$$

Im Vergleich dazu ergab sich aus der rechnerischen absoluten Orientierung eine empirische Einpaßgenauigkeit (quadratische Mittelwerte der Restfehler an den 9 geodätisch bestimmten Paßpunkten) von

$$\mu_x = 0,4 \text{ mm} \quad \mu_y = 0,7 \text{ mm} \quad \mu_z = 1,2 \text{ mm.}$$

Es zeigt sich (abgesehen von μ_y) eine gute Übereinstimmung zwischen der empirischen und der theoretisch abgeschätzten Genauigkeit.

Das Beispiel macht deutlich, daß sowohl bei geodätischer Punktbestimmung durch Vorwärtseinschneiden als auch bei photogrammetrischer Punktbestimmung im Einzelmodell unter ähnlichen Maßstabsverhältnissen Genauigkeiten von etwa 1 mm am Objekt erreicht werden können. Bei den folgenden Fehlerbetrachtungen im orthophotographischen Prozeß kann also für die 81 Kontrollpunkte des Testfeldes dieses Genauigkeitsniveau zugrunde gelegt werden.

Die angegebenen Werte sind für praktische Architekturvermessungen nicht repräsentativ. Wie bereits erwähnt wurde, entstehen bei der Triangulierung und Polygonierung sowie bei der Identifizierung natürlicher Objektpunkte Fehler, die bisweilen in der Größenordnung von 10 mm liegen. Diese Einflüsse übertragen sich auf das gesamte System, so daß im allgemeinen an Bauwerken nur mit Paßpunktgenauigkeiten von etwa $5 - 10 \text{ mm}$ gerechnet werden kann.

9.1.2 Photogrammetrische Aufnahme

Bei der Diskussion der photogrammetrischen Punktbestimmung wurde bereits im vorigen Abschnitt die Aufnahmegenauigkeit implizit angesprochen. Die Zahlenangaben werden hier durch weitere Meßergebnisse bestätigt bzw. fundiert.

Das Testfeld wurde im Hinblick auf die Überprüfung der Orthophotogenauigkeit (Abschnitt 9.1.5) von 4 verschiedenen Standpunkten aus mit der Stereomeßkammer Zeiss SMK 120 aufgenommen. Die mittlere Aufnahmeentfernung betrug 8,5 m, als Bildmaßstab ergab sich daraus etwa 1:150. Die Photoplatten wurden am Komparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Nach rechnerischer Modellbildung und Transformation von 4 x 25 Modellpunkten auf die teils geodätisch (9), teils photogrammetrisch (16) bestimmten Paßpunkte zeigten sich Restfehler (quadratisches Mittel über 100 Punkte) von

$$\mu_x = 0,9 \text{ mm} \quad \mu_y = 0,9 \text{ mm} \quad \mu_z = 3,8 \text{ mm}$$

am Objekt.

Bei Zurückrechnung auf den Bildmaßstab nach den Fehlerformeln für den stereophotogrammetrischen Normalfall (aus STARK /128/) ergibt sich mit einer Basis von $b = 1,20 \text{ m}$ eine Bildkoordinatengenauigkeit von etwa $3 \mu\text{m}$.

In diesem Betrag sind die Genauigkeit der geodätisch bzw. photogrammetrisch vermessenen Paßpunkte, alle Fehlereinflüsse der Aufnahmekammer (Objektivverzeichnung, Plattenlage im Andruckrahmen) und des photographischen Materials (Unebenheiten und Emulsionsverzug) sowie die Einstell- und Meßgenauigkeit am Komparator (etwa $1 - 2 \mu\text{m}$) enthalten. Als maximale Verzeichnung von terrestrischen Aufnahmeobjektiven wird von den Herstellern etwa $5 \mu\text{m}$ angegeben. Nach AHREND /1/ sowie BRUCKLACHER und LÜDER /10/ ist bei Verwendung von Glasplatten im Mittel zusätzlich ein Betrag von $5 \mu\text{m}$ für unregelmäßigen Schichtverzug anzusetzen. Zusammen mit den übrigen Fehlereinflüssen (Justierzustand der Kammer, Plattenlage) muß also bei der Aufnahme mit terrestrischen Meßkammern (z.B. Zeiss TMK, SMK) im allgemeinen mit einer aufnahmebedingten mittleren Bildkoordinatengenauigkeit von etwa $5 \mu\text{m}$ gerechnet werden. Je nach Aufnahmekonstellation (Bildmaßstab, Basisverhältnis) entspricht dies einer Genauigkeit von etwa 1 mm am Objekt.

9.1.3 Zwischenprozesse

Zur Brennweiten- oder Bildformatanpassung sowie zur Herstellung von Duplikatbildern für die Orthoprojektion werden häufig Umbildungen (Abschnitt 5.2.3) erforderlich. Die Genauigkeit der photographischen Umbildung hängt von der Genauigkeit des verwendeten Umbildegerätes (Vergrößerungsgerät, Entzerrungsgerät, Reduktor) sowie von der Planlage und Maßhaltigkeit des Film- oder Plattenmaterials ab. Neigungsfehler werden entweder direkt am Umbildegerät durch Justierung oder bei der Auswertung im Zuge der relativen Orientierung beseitigt.

Die mittlere Verzeichnung kann beim Umbildegerät Zeiss Reduktor sowie bei den meisten Entzerrungsgeräten zu etwa $5 \mu\text{m}$ angenommen werden. Der unregelmäßige Schichtverzug bei Polyesterfilm liegt je nach Filmformat in der Größenordnung von etwa $5 - 10 \mu\text{m}$ (Abschnitt 9.1.7). Bei Verwendung von Film ist die Frage der Ebenflächigkeit von besonderer Bedeutung, da sich die Abstände von der Bezugsfläche mit dem Tangens des Projektionswinkels auf die Lagegenauigkeit auswirken. Zum Beispiel verursacht ein Planlagefehler von $0,2 \text{ mm}$ bei einem Winkel von 30° bereits Radialversetzungen von etwa $0,1 \text{ mm}$. Die Zuhilfenahme von Deckglasplatten kann wegen der auftretenden Parallelversetzung der Strahlen nicht empfohlen werden. Am geeignetsten sind ein Ansaugtisch oder eine entsprechende Vakuumplatte.

Die im Rahmen der Testfeldauswertung aufgenommenen Photoplatten wurden zur Angleichung der SMK-Kammer-Brennweite (60 mm) an die Gerätebrennweite im Stereoplanigraph C 8 (150 mm) am Entzerrungsgerät Zeiss SEG V 2,5-fach auf Polyesterfilm Agfa N 31p vergrößert. Eine Ansaugvorrichtung stand nicht zur Verfügung. Auf 8 Filmen sowie auf den dazugehörigen Originalplatten wurden insgesamt 368 (3×81 und 5×25) signalisierte Rasterpunkte am Komparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Die Filmpunkte wurden anschließend mit einer ebenen Ähnlichkeitstransformation auf die entsprechenden Punkte der 8 Originalplatten eingepaßt. Die jeweiligen Restfehler geben Aufschluß über die Umbildegenauigkeit. Abb. 9/2 zeigt an einem Beispiel die Vektoren der Restfehler.

Auf der linken Seite des Diagramms (Abb. 9/2) sind Zonen systematischer Fehler (Maximum: $60 \mu\text{m}$ im Film) zu erkennen. Sie werden auf unzureichende Planlage des Filmes auf der Tischfläche des Entzerrungsgerätes zurückgeführt.

Die mittlere Einpaßgenauigkeit (Restfehler aus Helmertransformation, Film auf Platte) ergab sich zu $5 \mu\text{m}$ im Plattenmaßstab 1:133 bzw. $12,5 \mu\text{m}$ im Filmmaßstab 1:53. In diesem Betrag sind die Einstell- und Meßgenauigkeit (PSK 2) der Plattenpunkte mit $2 \mu\text{m}$ sowie der Filmpunkte mit $4 \mu\text{m}$ (bzw. $1,6 \mu\text{m}$ im Plattenmaßstab) enthalten. Reduziert man die Transformationsgenauigkeit um diese Werte, so erhält man $4 \mu\text{m}$ im Plattenmaßstab 1:133 bzw. $10 \mu\text{m}$ im vergrößerten Filmmaßstab 1:53. Der Fehler setzt sich jetzt aus der Gerätegenauigkeit (SEG V), der Objektivverzeichnung, dem Filmverzug und der Unebenheit des Filmes zusammen. Die Gesamtumbildegenauigkeit ist also im vorliegenden Fall, der als repräsentativ angesehen werden kann, besser als 1 mm , bezogen auf das Objekt.

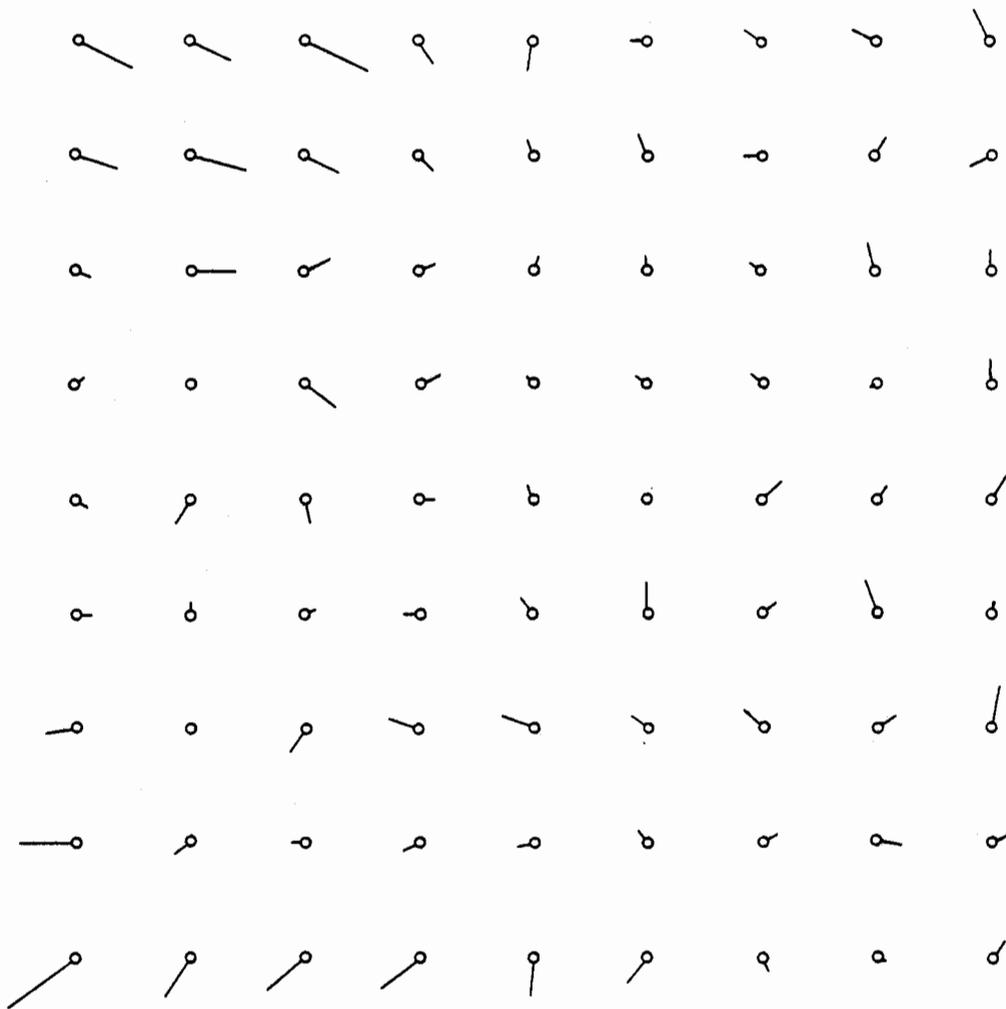


Abb. 9/2 Beispiel für die Genauigkeit der optischen Umbildung, Vektordiagramm der Restfehler an 81 Vergleichspunkten, ermittelt durch Helmerttransformation

Rastermaßstab		Vektormaßstab	
Objekt	1 m	Objekt	2,7 mm
Platte	7,5 mm	Platte	20 µm
Film	18,8 mm	Film	50 µm

9.1.4 Modellbildung

Die Genauigkeit der analogen Modellbildung am Stereoauswertegerät ist von der Güte der relativen Orientierung sowie von der Gerätegenauigkeit abhängig. Im allgemeinen kann bei der Verwendung von Präzisions-Auswertegeräten mit Fehlern von $< 10 \mu\text{m}$ im Bild bzw. $< 20 \mu\text{m}$ im Modell gerechnet werden.

Um diese Werte praktisch zu bestätigen, wurden die Testfeldaufnahmen bzw. die am Entzerrungsgerät SEG V vergrößerten Filme im Zeiss Stereoplanigraph C 8 eingelegt, orientiert und punktweise ausgemessen. Eine räumliche Ähnlichkeitstransformation von 140 (81 + 59) Modellpunkten auf die entsprechenden Objektpunkte des Testfeldes ergab eine mittlere Einpaßgenauigkeit (quadratische Mittelwerte der Restfehler) von $\mu_x = \mu_y = 1,2 \text{ mm}$ an der Objektfläche und $\mu_z = 4,5 \text{ mm}$ in der Tiefe (Koordinatensystem nach Abb. 9/1).

Reduziert man den Wert von 1,2 mm um die Fehler der Paßpunkte und der Aufnahme (0,9 mm), um die Umbildefehler der vergrößerten Filme (0,5 mm) sowie um die Einstell- und Meßgenauigkeit im Modell (ca. $20 \mu\text{m}$ bzw. 0,5 mm am Objekt), so erhält man eine Orientierungs- und Modellgenauigkeit von

0,4 mm am Objekt	bzw. 16 μm im Modellmaßstab 1: 23
	bzw. 3 μm im Bildmaßstab 1:133.

Sie ist im allgemeinen bei ähnlichen Maßstabsverhältnissen mit Sicherheit besser als 1 mm am Objekt bzw. $50 \mu\text{m}$ im Modell, d.h. $10 \mu\text{m}$ im Bild.

9.1.5 Orthophotoherstellung

Die Genauigkeit des Orthophotos wird, abgesehen von den bisher beschriebenen Faktoren (Paßpunktsystem, Aufnahme, Zwischenprozesse, Modellbildung), von der Ankopplung zwischen Steuergerät und Orthoprojektor, von Gerätefehlern des Projektionssystems, von Filmfehlern sowie von Verfahrens- und Abtastfehlern beeinflusst.

9.1.5.1 Genauigkeit der Ankopplung

Die Zuordnung von Stereoauswertegerät und Orthoprojektor geschieht nach der Übertragung der Orientierungselemente durch elektrisch-mechanische Ankopplung der Geräte. Zur Überprüfung der Zuordnungsgenauigkeit zwischen Planimat und GZ 1 (on-line) wurden die 81 Vergleichspunkte des Testfeldes im Modell exakt angefahren und am angekoppelten Orthoprojektor (Orthophotomaßstab = Modellmaßstab) durch jeweils kurzes Öffnen der Blende einzeln auf Film belichtet. Das photographische Ergebnis wird im folgenden als "Punktweises Orthophoto" bezeichnet.

Gleichzeitig mit dem Anfahren der Punkte wurden am Planimat die Modellkoordinaten registriert. Die Ausmessung der Punktweisen Orthophotos erfolgte am Komparator Zeiss PSK 2. Durch vektoriel- len Vergleich der Lagepunkte im Modell mit den entsprechenden Signalen im Punktweisen Orthophoto ergab sich für zwei Modelle

ein mittlerer Übertragungsfehler von $30 \mu\text{m}$ im Orthophoto (1:50) bzw. $1,5 \text{ mm}$ am Objekt (Testfeld). Die in einem Diagramm aufgetragenen Fehlervektoren zeigten keine systematischen Effekte, Reduziert man die Ergebnisse um die Meßgenauigkeit im Planimat-Modell ($20 \mu\text{m}$) und um die Einstellgenauigkeit der Filmpunkte im PSK ($4 \mu\text{m}$), so ergibt sich für die Ankopplung der Geräte eine (maßstabsunabhängige) Genauigkeit von etwa $20 \mu\text{m}$ im Modell bzw. $1,0 \text{ mm}$ am Objekt bei einem Modellmaßstab von 1:50.

9.1.5.2 Abbildegenuigkeit

Die Abbildegenuigkeit bei der Orthoprojektion setzt sich zusammen aus der Gerätegenauigkeit des Orthoprojektors (dynamische Fehler beim Mäanderlauf, Objektivverzeichnung, Unebenheit der Projektionsfläche) sowie aus den durch Verzug und Nichtplanlage verursachten Filmfehlern. Zur Untersuchung der Gesamtwirkung dieser Einflüsse wurde eines der am Entzerrungsgerät SEG V vergrößerten Bilder des Testfeldes im Orthoprojektor eingelegt und streifenweise auf Film projiziert. Dabei wurde die Projektionsentfernung nicht verändert. Die Parallelstellung von Bildträger und Projektionsfläche erfolgte mit Hilfe einer empfindlichen Kreuzlibelle.

Abbildung und Original wurden jeweils am Komparator Zeiss PSK 2 punktwise ausgemessen. Der Vergleich der beiden Filme durch Helmertransformations mit 78 Punkten ergab eine mittlere (ebenfalls maßstabsunabhängige) Abbildegenuigkeit (quadratischer Mittelwert der Restfehler) von $60 \mu\text{m}$ im "Orthophotomaßstab" 1:23 bzw. $1,4 \text{ mm}$ am Objekt. Eine Reduktion um die Meßgenauigkeit von $8 \mu\text{m}$ im "Orthophotofilm" (1:23) sowie von $4 \mu\text{m}$ im Originalfilm (1:53) bzw. $9 \mu\text{m}$ im Maßstab 1:23 bringt keine merkliche Verbesserung des Ergebnisses.

9.1.5.3 Verfahrens- und Abtastfehler

Zur empirischen Untersuchung von Verfahrens- und Abtastfehlern wurde das Testfeld von 2 Standpunkten aus mit der Stereomeßkammer Zeiss SMK 120 unter einem Winkel von $\phi = 309$ aufgenommen. Die im Planimat gebildeten Modelle (M1 und M2) wurden in verschiedenen Richtungen sowie mit unterschiedlichen Spaltbreiten und Fahrgeschwindigkeiten abgetastet (siehe Tab. 9/3). Da die Ebene nur in x-Richtung (Koordinatensystem nach Abb. 9/1) geneigt war, erfolgte die Abtastung für die Untersuchung des Verfahrensfehlers in y-Richtung, für den Abtastfehler in x-Richtung. Die erhaltenen Orthophotos wurden am Komparator Zeiss PSK 2 ausgemessen und mit den für die beiden Modelle eigens erstellten Punktweisen Orthophotos, die wegen Einzelprojektion der Punkte frei von Verfahrens- und Abtastfehlern sind, durch vektorielle Subtraktion verglichen. Es ergaben sich daraus als quadratische Mittelwerte der Koordinatendifferenzen in insgesamt 527 Punkten die in Tab. 9/3 zusammengestellten mittleren Restfehler. Diese Werte repräsentieren ausschließlich die Wirkung von Verfahrens- und Abtastfehlern.

Modell	Ortho- photo	Abtast- richtung	Streifenbreite Δx bzw. Δy (mm)	Abtastge- schwindigkeit v (mm/sec)	ϵ_k	
					(μm)	(mm)
M1	A	y	2	2,5	52	2,6
	B	y	4	2,5	80	4,0
	C	x	4	2,5	44	2,2
	D	x	4	5,0	58	2,9
M2	A	y	2	2,5	78	3,9
	B	y	4	2,5	166	8,3
	C	x	4	2,5	64	3,2

Tab. 9/3 Mittlere Koordinatendifferenzen ϵ_k (μm) (in 1:50 bzw. (mm) am Objekt) zwischen den Orthophotos M1/A bis M2/C und den Punktweisen Orthophotos der Modelle M1 und M2, Auswertung am Planimat + GZ 1 (on-line)

Die Differenzvektoren zwischen den Orthophotos M1/A, M1/D, M2/B und den jeweiligen Punktweisen Orthophotos sind in den Abbildungen 9/4 bis 9/6 graphisch dargestellt. Die Vektordiagramme zeigen sehr deutlich das radiale, teils systematische, teils zufällige Verhalten der Wirkungskomponenten von Verfahrens- und Abtastfehlern. Systematisch ist bei beiden Fehlerarten die lineare Abhängigkeit vom Tangens des projizierenden Winkels, d.h. vom jeweiligen Radialabstand der Objektpunkte (siehe auch die Abschnitte 4.1.2 und 6.1.1.1). Der zufällige Anteil ergibt sich beim Verfahrensfehler durch die Lage der Orthophotopunkte (hier Testfeld-Vergleichspunkte) im einzelnen Profilstreifen, beim Abtastfehler durch die Größe und das Vorzeichen des dynamischen Höhenfehlers. Aus Tab. 9/3 ist zu entnehmen, daß die Restfehler der Modellgruppe M2 um etwa den Faktor 1,5 größer sind als die Restfehler der Gruppe M1. Dieses Ergebnis ist auf die zum Objekt exzentrische Hauptpunktlage der Orthophotos aus Gruppe M2 (Abb. 9/5), d.h. auf den um 2,7 m größeren Radialabstand des äußersten Objektpunktes zurückzuführen.

Verfahrensfehler

Die Verfahrensfehler der in y-Richtung gefahrenen Orthophotos werden bei Verdoppelung der Streifenbreite von $\Delta x = 2$ mm auf $\Delta x = 4$ mm um etwa den Faktor 2 größer (Tab. 9/3, Abbildungen 9/4 und 9/5), was auch zu erwarten war. Die generelle Größenordnung der Verfahrensfehler kann mit Hilfe der in Abschnitt 6.1 angegebenen Formeln bestätigt werden. Mit $r = 3,5$ m, $z_0 = 8,8$ m und $\Delta x = 2$ mm ergibt sich nach Gleichung (6,12) der maximale radiale Verfahrensfehler im Orthophoto zu $e_r(\text{max}) = 0,20$ mm, nach Gleichung (6,8) der Mittelwert im gesamten Orthophoto (1:50) zu $\sigma_r = 70$ μm bzw. am Objekt zu 3,5 mm.

Das in Abb. 9/5 dargestellte Vektorfeld wurde punktweise um die aus der (zufälligen) Lage dx der Rasterpunkte in den einzelnen Streifen berechneten Verfahrensfehler verbessert (siehe Abb. 6/3 in Abschnitt 6.1.1.2). Der quadratische Mittelwert der Restfehler ließ sich dadurch (zumindest theoretisch) von 0,17 mm auf 0,06 mm im Orthophotomaßstab reduzieren.

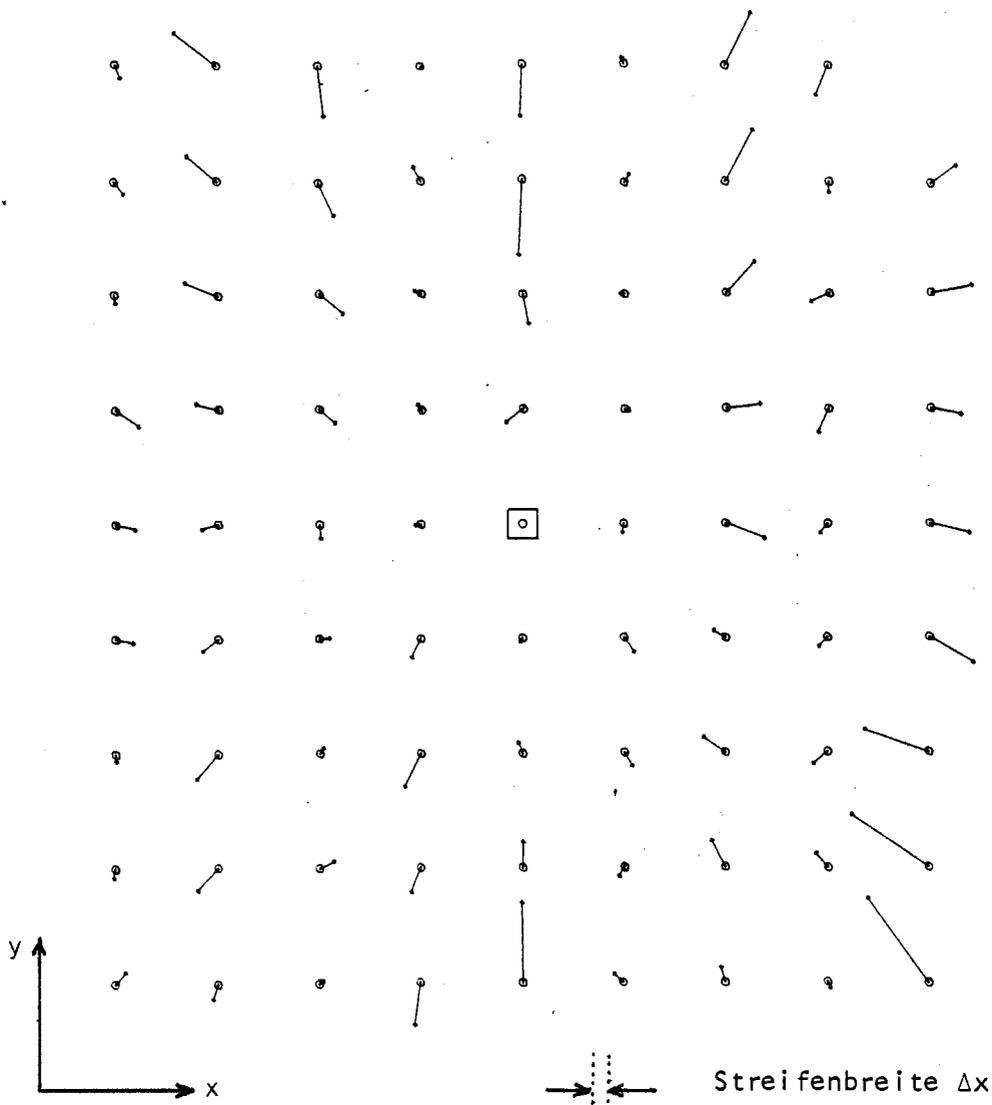


Abb. 9/4 Beispiel für die Auswirkung von Verfahrensfehlern, Vektordiagramm der Differenzen zwischen Orthophoto M1/A (Tab. 9/3, y-Abtastung, $\Delta x = 2 \text{ mm}$, $v = 2,5 \text{ mm/sec}$) und Punktweisem Orthophoto (Modell M1), Objekt Testfeld

Rastermaßstab	┌──────────┐	Vektormaßstab	┌──────────┐
Objekt	1 m	Objekt	10 mm
Orthophoto	2 cm	Orthophoto	0,2 mm

□ Hauptpunkt der Aufnahme

Radialabstand des äußersten Objektpunktes: 3,5 m
 Streifenbreite am Objekt: $\Delta x = 10 \text{ cm}$

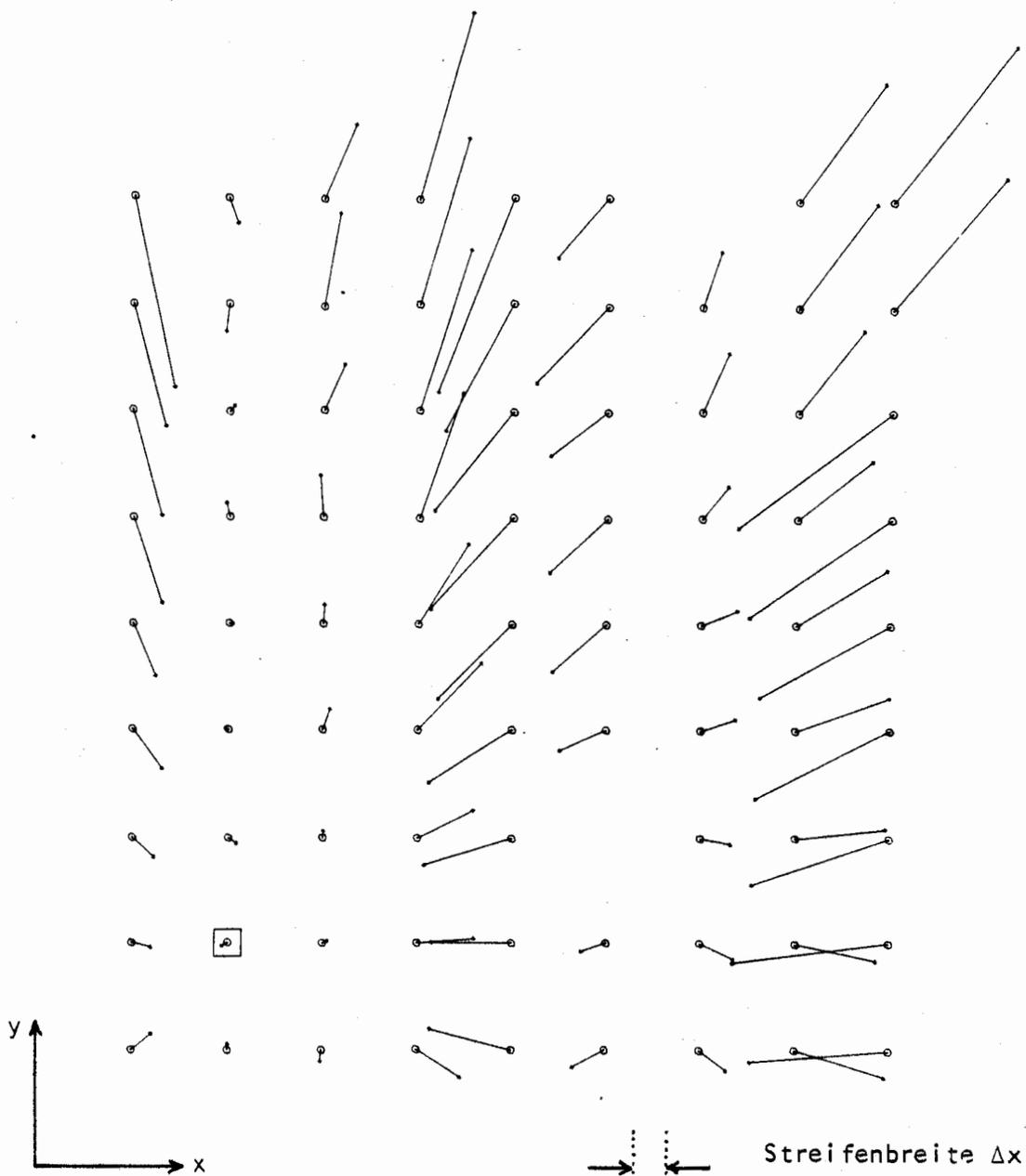


Abb. 9/5 Beispiel für die Auswirkung von Verfahrensfehlern, Vektordiagramm der Differenzen zwischen Orthophoto M2/B (Tab. 9/3, y-Abtastung, $\Delta x = 4 \text{ mm}$, $v = 2,5 \text{ mm/sec}$) und Punktweisem Orthophoto (Modell M2), Objekt Testfeld

Rastermaßstab	┌──────────┐	Vektormaßstab	┌──────────┐
Objekt	1 m	Objekt	10 mm
Orthophoto	2 cm	Orthophoto	0,2 mm
•	Hauptpunkt der Aufnahme		

Radialabstand des äußersten Objektpunktes: 6,2 m
 Streifenbreite am Objekt: $\Delta x = 20 \text{ cm}$

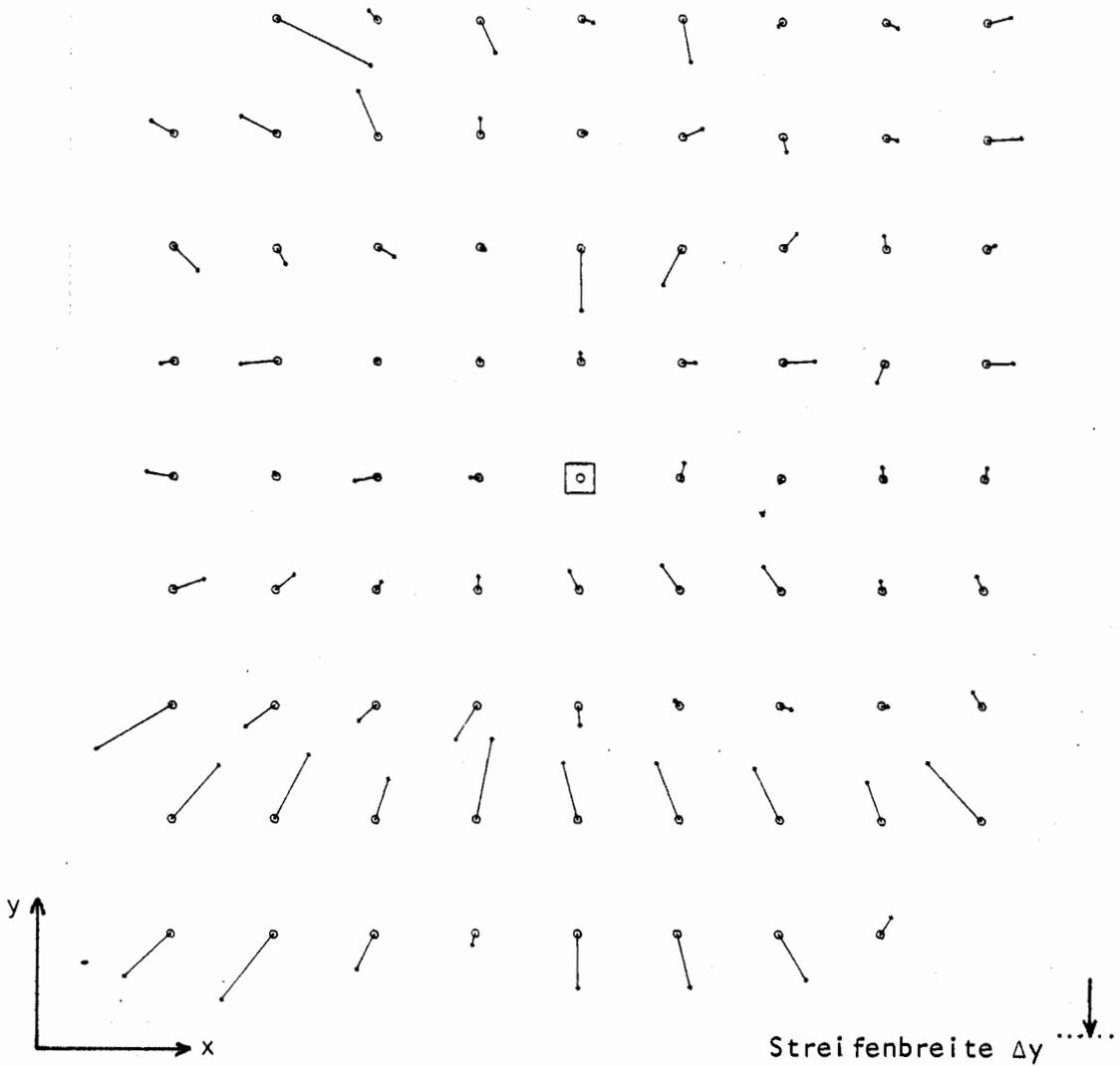


Abb. 9/6 Beispiel für die Auswirkung von Abtastfehlern, Vektordiagramm der Differenzen zwischen Orthophoto M1/D (Tab. 9/3, x-Abtastung, $\Delta y = 4 \text{ mm}$, $v = 5 \text{ mm/sec}$) und Punktweisem Orthophoto (Modell M1), Objekt Testfeld

Rastermaßstab

Objekt 1 m
Orthophoto 2 cm

Vektormaßstab

Objekt 10 mm
Orthophoto 0,2 mm

Hauptpunkt der Aufnahme

Radialabstand des äußersten Objektpunktes: 3,5 m

Streifenbreite am Objekt: $\Delta y = 20 \text{ cm}$

Abtastfehler

Das mit doppelter Abtastgeschwindigkeit (in x-Richtung, konstante Flächenneigung 30°) gefahrene Orthophoto M1/D enthält um etwa 30 % größere Restfehler als das Orthophoto M1/C. Eine entsprechende Tendenz wurde vom Operateur bereits beim Abtasten des Modells erkannt. Der mittlere Höhenabtastfehler am Objekt betrug etwa 10 mm (Tab. 6/50 in Abschnitt 6.3.1). Seine Auswirkung auf die Lagekoordinaten kann bei einem maximalen Projektionswinkel von 20° im Mittel über das gesamte Orthophoto zu etwa 2 - 3 mm am Objekt angegeben werden, was auch ungefähr den Werten aus Tab. 9/3 entspricht.

Wie bereits in Abschnitt 6.3 gezeigt wurde, nimmt der Höhenabtastfehler bei stärker geneigten oder bei gekrümmten Flächen, vor allem aber bei plötzlichen Neigungs- und Krümmungsänderungen bisweilen größere Beträge an. Eine Reduzierung der Fehler (Abschnitt 6.3.6) ist jedoch in der Regel durch die Anpassung der Abtastgeschwindigkeit an die Objektverhältnisse möglich.

9.1.5.4 Überprüfung der Orthophotogenauigkeit an praktischen Beispielen

Die vorigen Abschnitte enthielten Einzelangaben zur Genauigkeit der Orthoprojektor-Ankopplung, zur Abbildegenauigkeit sowie über Verfahrens- und Abtastfehler im orthophotographischen Prozeß. Die Ergebnisse stammten vorwiegend aus Testfelduntersuchungen. Neben diesen einzelnen Genauigkeitswerten ist die Gesamtgenauigkeit der Orthophotoherstellung von Interesse.

Für die empirische Untersuchung der Orthophotogenauigkeit (ohne Paßpunkt-, Aufnahme- und Modellgenauigkeit) wurden fünf der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Architektur-Orthophotos punktweise ausgemessen. Als Beispiel dienten folgende Objekte (Abbildungen im Anhang):

- Eltingen, Fachwerkhaus, Fassade (Abb. B/1)
- Mechelen, Taubenturm, Ansicht (Abb. B/3)
- Schloß Linderhof, Südgiebel (Abb. B/4)
- Amsterdam, Vondelkerke, Kuppel (Abb. B/6)

Das Modell "Mechelen" wurde sowohl in x- als auch in y-Richtung abgetastet. In den mit der Gerätekombination Zeiss Planimat - GZ 1 im on-line-Betrieb erzeugten Orthophotos wurden insgesamt 174 gut sichtbare, eindeutig definierte Objektpunkte ausgewählt. Die Ausmessung erfolgte am Komparator Zeiss PSK 2. Dieselben Punkte waren im Anschluß an die jeweilige Orthophotoherstellung auch im photogrammetrischen Modell im Planimat gemessen worden, so daß die Modellkoordinaten x, y für den Vergleich mit den Orthophotokoordinaten zur Verfügung standen. Da diese Modellkoordinaten um etwa den Faktor 5 genauer waren als die Orthophotokoordinaten, wurden sie als Vergleichswerte verwendet.

Die Transformation der jeweiligen Orthophotopunkte auf die entsprechenden Modellpunkte wurde nach zwei Methoden durchgeführt:

1. Eine ebene 3-Parameter-Transformation (Verschiebungen x, y und Drehung α , Maßstab 1:1) bringt die beiden Vorlagen bestmöglich zur Deckung, ohne jedoch den Maßstab zu verändern. Die durch diese Transformation ermittelte Genauigkeitsangabe ist gültig, wenn das Orthophoto ohne eine reproduktionstechnische Maßstabskorrektur weiterverwendet wird.

2. Die ebene Ähnlichkeitstransformation (Helmerttransformation) mit dem zusätzlichen Zwang der Maßstabsanpassung entspricht einer optischen Abstimmung der Vorlagen an einem Vergrößerungsgerät bzw. an einer Reprojekamera. Die Restfehler aus der Helmerttransformation repräsentieren also die Genauigkeit nach optimaler Einpassung im Reproduktionsprozeß.

Die Ergebnisse aus den Transformationen sind für die vier Objekte bzw. fünf Orthophotos in Tab. 9/7 zusammengestellt.

Objekt	Anzahl der Vergleichspunkte	Orthophotomaßstab 1 :	Restfehler aus 3-Parameter-Transformation				Maßstabsfehler (‰)	Restfehler aus Helmert-Transformation			
			im Orthophoto		am Objekt			im Orthophoto		am Objekt	
			mittel (mm)	maximal (mm)	mittel (mm)	maximal (mm)		mittel (mm)	maximal (mm)	mittel (mm)	maximal (mm)
Fachwerk	56	60	0,10	0,29	6,2	17,3	+0,7	0,10	0,31	5,8	18,8
Turm II x	20	100	0,13	0,31	12,9	31,3	-2,5	0,10	0,30	9,6	29,9
Turm II y	20	100	0,18	0,47	17,7	46,9	-3,5	0,13	0,38	12,9	38,0
Giebel	38	27	0,15	0,49	4,0	13,2	-0,9	0,14	0,42	3,8	11,3
Kuppel	60	62	0,22	0,64	13,4	39,8	-3,5	0,11	0,37	6,6	23,1
Mittel	39	70	0,16	0,44	11,9	29,7	-2,5	0,12	0,36	8,4	24,2

Tab. 9/7 Transformation von Orthophoto auf Stereomodell, quadratische Mittelwerte der Restfehler aus 3-Parameter- und Helmerttransformation

Eine Auswahl der am Plotter der Rechenanlage TR 4 gezeichneten Vektordiagramme ist für die Objekte "Eltingen, Fachwerk" und "Amsterdam, Kuppel" in den Abbildungen 9/8 bis 9/10 wiedergegeben. Zur Veranschaulichung wurde dem zum Objektbeispiel "Eltingen, Fachwerk" (Abb. 9/8) gehörigen Vektordiagramm das entsprechende Orthophotobild (Abb. B/1 im Anhang) in leichtem Grauton unterlegt. In den Vektordiagrammen der Abbildungen 9/9 und 9/10 sind einige Gewölberippen der neugotischen Kuppel (Abb. B/6 im Anhang) durch gestrichelte Linien angedeutet.

Der Vektorverlauf in Abb. 9/8 ist weitgehend unregelmäßig, nur wenige Vektoren zeigen in Richtung auf den gekennzeichneten Bildhauptpunkt. Das heißt, daß der Anteil von Verfahrens- und Abtastfehlern (radiale Fehlerkomponenten) bei dieser Auswertung gering war, was auf Grund der stückweisen Ebenflächigkeit des Objekts auch erwartet werden konnte.



Abb. 9/8 Vektordiagramm der Restfehler nach Helmerttransformation von Orthophoto auf Stereomodell;
Objekt: Eltingen, Fachwerkhaus

Streifenbreite: $\Delta x = 2 \text{ mm}$ im Orthophotomaßstab 1:60

Abbildungsmaßstab \longleftarrow Vektormaßstab \longleftarrow

Objekt 1 m

Objekt 25 mm

Orthophoto 16,7 mm

Orthophoto 0,42 mm



Hauptpunkt der Aufnahme

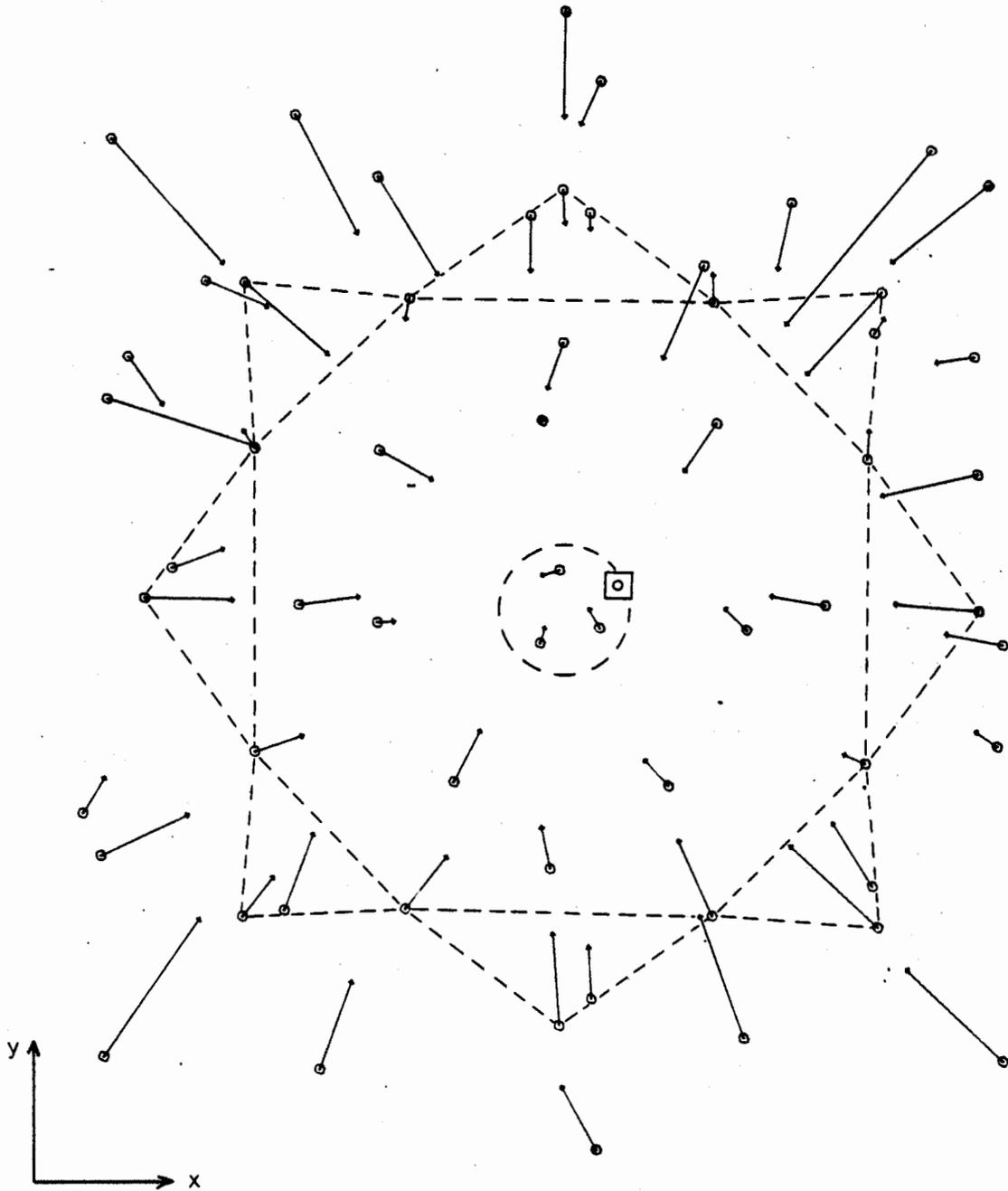


Abb. 9/9 Vektordiagramm der Restfehler nach 3-Parameter-Transformation von Orthophoto auf Stereomodell; Objekt: Amsterdam, Kuppel Vondelkerche

Gestrichelte Linien: Gewölberippen,
 Streifenbreite: $\Delta x = 2 \text{ mm}$ im Orthophotomaßstab 1:62

Abbildungsmaßstab ---|--- Vektormaßstab ---|---

Objekt 1 m
 Orthophoto 16,1 mm

Objekt 25 mm
 Orthophoto 0,40 mm

□ Hauptpunkt der Aufnahme

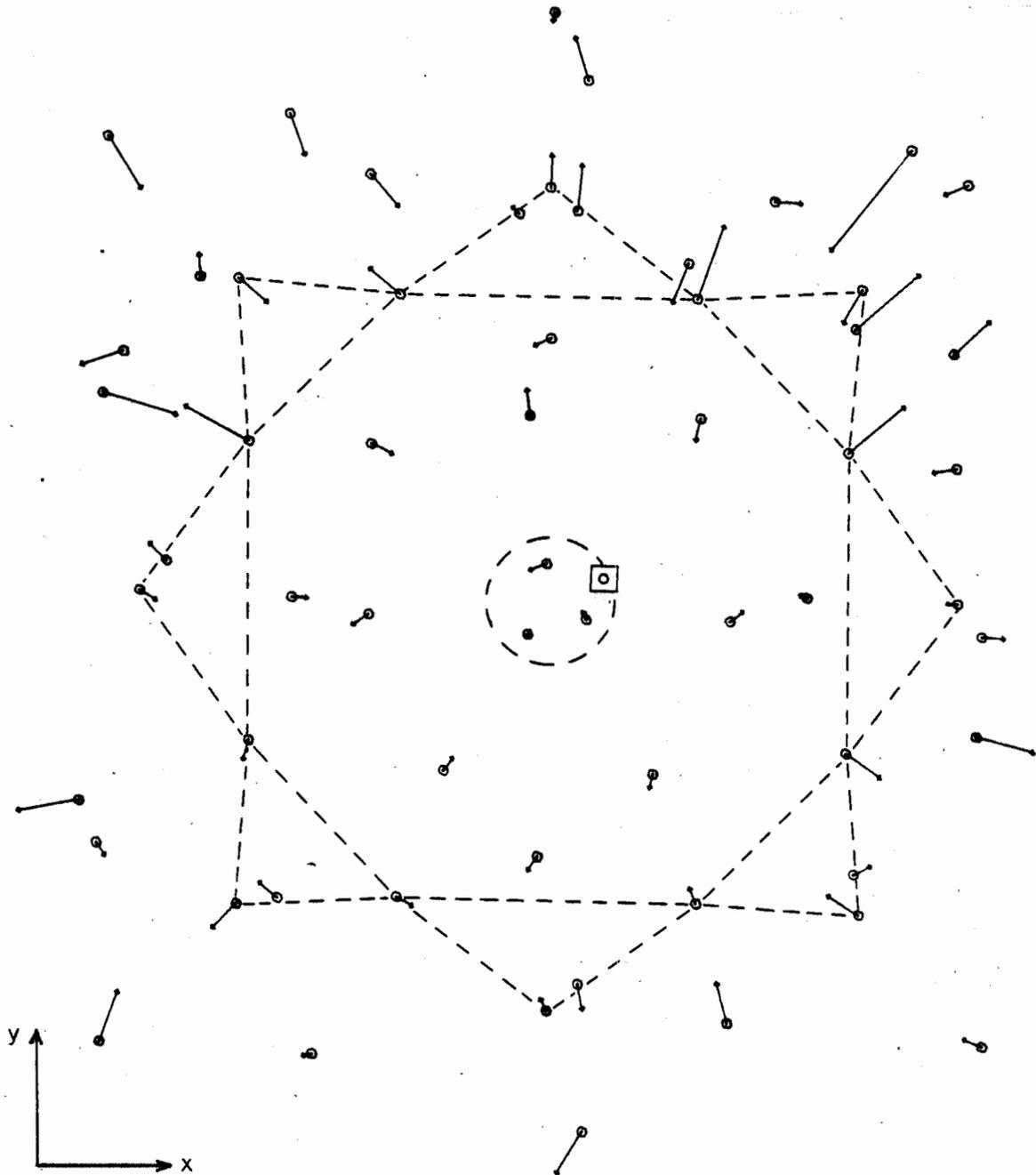
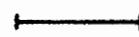


Abb. 9/10 Vektordiagramm der Restfehler nach Helmerttransformation von Orthophoto auf Stereomodell;
Objekt: Amsterdam, Kuppel Vondelkerche

Gestrichelte Linien: Gewölberippen

Streifenbreite: $\Delta x = 2 \text{ mm}$ im Orthophotomaßstab 1:62

Abbildungsmaßstab



Objekt 1 m
Orthophoto 16,1 mm

Vektormaßstab



Objekt 25 mm
Orthophoto 0,40 mm



Hauptpunkt der Aufnahme

Wie aus Tab. 9/7 ersichtlich ist, weist das Orthophoto der Kirchenkuppel (Abb. B/6) einen Maßstabsfehler von $-3,5\text{‰}$ auf, der vermutlich von einer fehlerhaften Z-Ankopplung zwischen Stereoauswertegerät und Orthoprojektor herrührt. Im Vektordiagramm (Abb. 9/9) äußert sich dieser Maßstabsfehler durch eine starke radiale Systematik. Dementsprechend ergab sich aus der 3-Parameter-Transformation eine Einpaßgenauigkeit (quadratischer Mittelwert der Restfehler) von 13,4 mm am Objekt. Der mittlere Restfehler nach der Helmertransformaion beträgt dagegen nur 6,6 mm. Der nach Abzug des Maßstabsfehlers noch verbleibende radiale Vektorverlauf in Abb. 9/10 ist auf Verfahrens- und Abtastfehler zurückzuführen.

Aus den Beispielen (Tab. 9/7) konnte bei einem durchschnittlichen Maßstab von 1:70 ein mittlerer Restfehler (nach 3-Parameter-Transformation) von 0,16 mm im Orthophoto bzw. 11,9 mm am Objekt abgeleitet werden. Durch eine Maßstabskorrektur von $-2,5\text{‰}$ (Helmertransformaion) verbesserte sich die Einpaßgenauigkeit um etwa 30 % auf 0,12 mm im Orthophoto bzw. 8,4 mm am Objekt. In diesen Werten sind die Einstell- und Meßgenauigkeit (für natürliche Objektpunkte) am Komparator PSK 2 mit ca. 10 μm (Orthophoto) und am Planimat mit ca. 25 μm (Modell) enthalten.

9.1.6 Orthophoto-Hochzeichnung, Stereokartierung

Im Anschluß an die Überprüfung der Orthophotogenauigkeit wurde die Genauigkeit der Orthophoto-Hochzeichnung sowie, im Vergleich dazu, die Genauigkeit der Stereokartierung untersucht. Dazu wurden von den in Tab. 9/7 angegebenen Beispielen die Objekte "Eltigen, Fachwerk", "Mechelen, Taubenturm" und "Amsterdam, Kuppel" als Strichbild dargestellt. Die Zeichnung entstand zum einen als Stereokartierung am Internzeichentisch des Planimat, zum anderen als Orthophoto-Hochzeichnung. Der Zeichenmaßstab entsprach jeweils dem Modellmaßstab.

Die auf Pocalon-Folie kartierten Pläne enthielten (als Schnittpunkte von Objektlinien) einen Teil der für die Ermittlung der Orthophotogenauigkeit ausgewählten Vergleichspunkte. Sie wurden am Komparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Die Punkte der Hochzeichnung wurden dann unter Beibehaltung des Maßstabes mit einer 3-Parameter-Transformation auf die entsprechenden Orthophotopunkte eingepaßt. Auf gleiche Weise erfolgte die Transformation der Stereokartierung auf das im Planimat gebildete Modell.

Die quadratischen Mittelwerte der Restfehler aus diesen Transformationen sind für die jeweiligen Kartierungen in den Tabellen 9/11 und 9/12 wiedergegeben.

Den Zahlenwerten aus den Tabellen 9/11 und 9/12 ist zu entnehmen, daß beim Objektbeispiel "Eltigen, Fachwerkhaus" die Hochzeichnung im Vergleich zu den anderen Objekten sowie gegenüber der Stereokartierung die größten Fehler aufweist. Der Grund kann darin gesehen werden, daß die nahezu geraden Trennlinien zwischen Feldern und Balken bei der Hochzeichnung mit dem Lineal gezogen wurden, d.h. daß die Kartierung zu stark generalisiert wurde.

Objekt	Anzahl der Vergleichspunkte	Kartiermaßstab 1 :	Restfehler			
			in der Zeichnung		am Objekt	
			mittel (mm)	maximal (mm)	mittel (mm)	maximal (mm)
Fachwerk	36	60	0,16	0,49	9,4	29,7
Turm	11	100	0,12	0,27	12,5	27,5
Kuppel	25	62	0,13	0,27	7,9	16,9
Mittel	24	74	0,14	0,35	10,1	24,7

Tab. 9/11 Transformation von Hochzeichnung auf Orthophoto, quadratische Mittelwerte der Restfehler aus 3-Parameter-Transformation

Objekt	Anzahl der Vergleichspunkte	Kartiermaßstab 1 :	Restfehler			
			in der Zeichnung		am Objekt	
			mittel (mm)	maximal (mm)	mittel (mm)	maximal (mm)
Fachwerk	38	60	0,13	0,27	7,8	16,1
Turm	13	100	0,12	0,32	12,0	31,8
Kuppel	26	62	0,13	0,34	8,0	21,3
Mittel	26	74	0,13	0,31	9,5	23,1

Tab. 9/12 Transformation von Stereokartierung auf Stereomodell, quadratische Mittelwerte der Restfehler aus 3-Parameter-Transformation

Die Genauigkeit der Orthophoto-Hochzeichnung beträgt nach Tabelle 9/11 etwa 0,14 mm im mittleren Kartiermaßstab 1:74 bzw. 10,1 mm am Objekt. Da die Zeichengenauigkeit als additiver Betrag maßstabsunabhängig ist, kann die Gesamtgenauigkeit (Orthophoto + Hochzeichnung) dadurch gesteigert werden, daß das Orthophoto in einem größeren Maßstab hochgezeichnet wird, denn die Kartierfehler verkleinern sich bei der anschließenden Maßstabsreduktion.

Die Genauigkeit der Stereokartierung beträgt bei den Beispielen im Durchschnitt 0,13 mm im Kartiermaßstab 1:74 bzw. 9,5 mm am Objekt. Der Fehler entsteht vorwiegend durch den Zeichenvorgang selbst, der mit etwa 0,10 mm veranschlagt werden kann. Nach JÄNSCH /62/ ergibt sich beim linienhaften Abtasten in Präzisionsauswertegeräten eine Genauigkeit von ca. 20 µm im Bild bzw. 50 µm im Modell. Die Führung der Meßmarke ist also genauer als die Zeichnung selbst. Das bedeutet, daß durch einen größeren Zeichenmaßstab auch die Genauigkeit der Stereokartierung (zumindest geringfügig) verbessert werden kann.

9.1.7 Photographische Weiterverarbeitung von Orthophotos

Die Herstellung von Photokarten oder kombinierten Strich-Halbtone-Karten beinhaltet nach der Übersicht (Abb. 7/12) in Abschnitt 7.3.4 in der Regel drei Verarbeitungsprozesse, die sich zum Teil auch wiederholen können:

1. Anfertigung von Papierabzügen
2. Bildmontage (Mosaikbildung)
3. Reproduktion.

Die Fehlereigenschaften dieser Verarbeitungsprozesse haben daher einen entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit der endgültigen Photokarte.

Papierabzüge werden entweder an Vergrößerungs- und Entzerrungsgeräten oder im Kontaktverfahren hergestellt. Die Genauigkeit in Papierabzügen hängt somit von der Umbildegenauigkeit sowie von Verzug und Planlage des Photopapiers ab. Die Genauigkeit der Umbildung wurde bereits in Abschnitt 9.1.3 behandelt und soll an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben. Da das Kopieren im Kontaktverfahren bei vollständiger Berührung der photographischen Schichten keine hier zu beachtenden Fehler erzeugt, ist der Papierverzug die eigentliche Fehlerquelle dieses Verarbeitungsprozesses. Die Genauigkeit der Bildmontage (Mosaikbildung) ist zusätzlich von der Einpaßgenauigkeit der Bildteile sowie von einem nachträglichen Papierverzug abhängig, der durch Feuchtigkeits- und Temperaturänderungen entstehen kann. Die Reproduktion wird wie jede photographische Aufnahme von Gerätefehlern (hier der Reprokamera), von der Objektiv-Verzeichnung und vom Schichtverhalten des Reprofilms beeinflusst. Die aufgeführten Fehlerkomponenten wurden hier empirisch untersucht. Der Arbeitsablauf dieser Analysen soll im folgenden beschrieben werden. Zur Veranschaulichung der Verarbeitungsstationen dient Abb. 9/13.

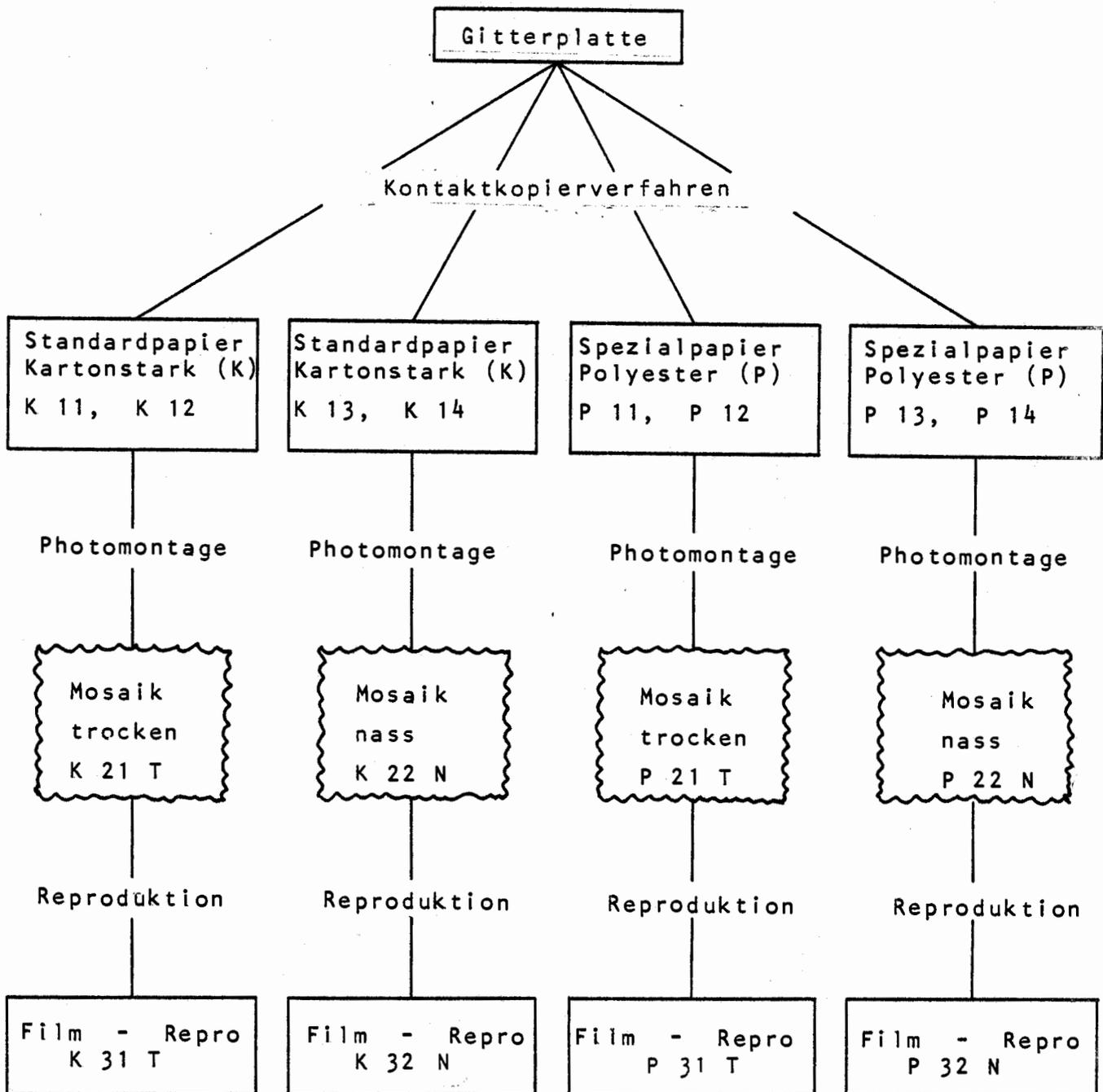


Abb. 9/13 Übersicht über die untersuchten Verarbeitungsprozesse (Erläuterung im Text)

Für die Untersuchung des Papierverzugs wurde eine photogrammetrische Gitterplatte ($25 \times 25 \text{ cm}^2$) im Kontaktverfahren auf unterschiedliches Photomaterial aufbelichtet. Als Photopapiere wurden verwendet:

- Kartonstarkes Standardpapier (K)
Agfa Brovira BN 112
- Polyesterbeschichtetes Spezialpapier (P)
Labaphot Brolaba BN 313

Für jede Papierart wurden 4 Kontaktkopien angefertigt. Sie sollen im weiteren Verlauf mit K 11 - K 14 und P 11 - P 14 bezeichnet werden. Auf den 8 Kopien wurden jeweils 25 Gitterpunkte am Präzisionsstereokomparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Da dieser Komparator nicht für die Betrachtung von Papierbildern im Auflicht eingerichtet ist, mußten einige technische Veränderungen vorgenommen werden. Die Lampe für Durchlicht-Beleuchtung wurde durch eine starke 150 Watt-Halogen-Lampe (Diaprojektor) ersetzt. Entgegen der üblichen Anordnung erfolgte nicht nur die Punkteinstellung, sondern auch die Koinzidenz des Meßrechens im Durchlicht.

Die Einstell- und Meßgenauigkeit für die Gitterpunkte ergab sich aus Mehrfachbeobachtungen zu etwa 2 μm . Für die Ermittlung des jeweiligen Papierverzuges wurden die am Komparator gemessenen Rasterpunkte auf die entsprechenden Punkte der Original-Gitterplatte (Koordinatenwerte aus Kalibrierung) transformiert.

Neben den bereits in Abschnitt 9.1.5 verwendeten Ausgleichungsansätzen "Helmerttransformation" und "3-Parameter-Transformation" erschien hier wegen des meist affinen Schrumpfung-Verhaltens von Photopapier zusätzlich eine 6-parametrische ebene Affintransformation angebracht. Bei diesem Ansatz werden in Längs- und Querrichtung (hier x- und y-Richtung) unterschiedliche Maßstabsfaktoren m_l und m_q zugelassen. Der regelmäßige Verzug in einer Koordinatenrichtung errechnet sich zu $\Delta m_l = 1 - m_l$ bzw. $\Delta m_q = 1 - m_q$.

Die Differenz A der Maßstabsfaktoren m_l und m_q wird als Affinität bezeichnet. Die Affintransformation besitzt nur theoretischen Wert, da sich entsprechende Maßstabskorrekturen an den Bildern nicht ohne weiteres anbringen lassen. Die aus den Transformationen erhaltenen Maßstabsfaktoren und Genauigkeitsangaben zum Papierverzug sind in Tab. 9/14 zusammengestellt.

Für die Untersuchung der Bildmontagegenauigkeit wurden jeweils zwei Gitterbilder gleichen Photomaterials in unregelmäßige Teile zerschnitten und anschließend mosaikartig zusammengesetzt. Da die Schnittkanten meist schräg zu den Gitterlinien verliefen, war eine ordentliche Einpassung möglich. Bei architektonischen Bildmontagen liegen derartige, schräglaufernde Objektlinien in der Regel nicht vor. Hier muß die Einpassung über Kontrollpunkte bzw. Kontrolllinien erfolgen, die sich auf der Einpaßunterlage befinden.

Die einzelnen Bildteile wurden mit Kaschierleim "Planatol" auf eine Aluminiumplatte aufgeklebt. Dabei wurden zwei Bildmontagen mit trockenen Teilstücken (Mosaiken K 21 T, P 21 T, siehe Abb. 9/13), zwei mit vorher gewässerten Teilstücken (Mosaiken K 22 N, P 22 N) durchgeführt. Die nasse Klebweise hat bei gewöhnlichem Photopapier (ohne Polyestereinlage) den Vorteil, daß sich beim Trocknen keine Falten bilden. Außerdem kann der an den Schnittkanten austretende Klebstoff mit Wasser leicht entfernt werden.

Da die auf den Aluminiumplatten aufgebrachten Mosaik-Gitterbilder nicht in den Komparator eingelegt werden konnten, wurden mit Hilfe einer Klimsch Reprokamera photographische Reproduktionen im Maßstab 1:1 angefertigt. Diese Filme (Mosaik-Repros K 31, K 32, P 31, P 32, siehe Abbildung 9/13) wurden anschließend am Präzisions-

Stereokomparator Zeiss PSK 2 ausgemessen und durch Helmert-Transformation, 3-Parameter-Transformation und Affintransformation rechnerisch auf das Sollgitter eingepaßt.

Die Verwendung von reproduzierten Bildern machte eine Überprüfung der Reprokamera notwendig. Dazu wurde von der Original-Gitterplatte ebenfalls eine Reproduktion im Maßstab 1:1 hergestellt. Nach Ausmessung der Rasterpunkte im Film und Transformation auf das Sollgitter ergab sich die für diesen Untersuchungsabschnitt gültige Reproduktionsgenauigkeit. Sie ist zusammen mit den Fehlerangaben zum Papierverzug und zur Bildmontage in Tab. 9/14 aufgeführt. In den anschließenden Diagrammen zur Deformation von Polyesterpapier (Abbildungen 9/15 bis 9/17) und kartonstarkem Standardpapier (Abbildungen 9/18 bis 9/20) sind die Restfehler aus 3-Parameter-, Helmert- und Affintransformation graphisch aufgetragen. Abb. 9/21 enthält einen direkten Vergleich des Dimensionsverhaltens von Polyesterpapier und Standardpapier. Die beiden letzten Vektordiagramme (Abbildungen 9/22 und 9/23) demonstrieren die bei nasser Bildmontage von Polyesterpapier und Standardpapier auftretenden Fehler.

Diskussion der Ergebnisse

a) Verzug von polyesterbeschichtetem Spezial-Photopapier

Aus den für die Bestimmung des Papierverzugs durchgeführten 3-Parameter-Transformationen (ohne Maßstabskorrektur) ergab sich als quadratischer Mittelwert der Restfehler für die vier Beispiele P 11 bis P 14 ein Betrag von $11 \mu\text{m}$ (Tab. 9/14). Nach Abzug eines regelmäßigen Gesamtverzugs von $0,05\text{‰}$ (Helmerttransformation) erhält man einen mittleren Restfehler von $10 \mu\text{m}$, was keine nennenswerte Verbesserung darstellt. Die Genauigkeit erhöht sich jedoch nach Abzug einer Affinität von $0,2\text{‰}$ auf ca. $7 \mu\text{m}$. Die Vektordiagramme (Abbildungen 9/15 und 9/16) zeigen bei starker Überhöhung des Vektormaßstabs ganz deutlich das affine Verhalten des polyesterbeschichteten Photopapiers. Wie bereits erwähnt, ist der Restfehler nach einer Affintransformation eine reine Rechengröße. Für praktische Arbeiten muß bei Verwendung von Polyesterpapier ein mittlerer Koordinatenfehler von etwa $10 \mu\text{m}$ (bezogen auf ein Format von $25 \times 25 \text{ cm}^2$) angesetzt werden.

b) Verzug von kartonstarkem Standard-Photopapier

Im Gegensatz zu der hohen Maßstabskonstanz von Polyesterpapier stehen erhebliche Dimensionsänderungen bei der phototechnischen Verarbeitung von Standardpapier. Der quadratische Mittelwert der Restfehler aus den 3-Parameter-Transformationen erreicht hier Beträge von etwa $0,6 \text{ mm}$ (Tab. 9/14). Der Maximalfehler liegt bei ca. $1,4 \text{ mm}$. Durch eine Maßstabskorrektur von 5‰ (Helmerttransformation) läßt sich der mittlere Restfehler auf nur etwa $0,5 \text{ mm}$ reduzieren. Der Grund für die geringe Verbesserung ist in der starken Affinität von 12‰ zu sehen. Durch eine (theoretische) Affinkorrektur könnten die Restfehler auf etwa $0,1 \text{ mm}$ herabgesetzt werden.

Die Vektordiagramme (Abbildungen 9/18 bis 9/20) verdeutlichen den beschriebenen Sachverhalt. Beim optischen Vergleich der Fehlervektoren ist zu beachten, daß Abb. 9/20 gegenüber den anderen beiden Diagrammen (9/18 und 9/19) eine um den Faktor 4 überhöhte Fehlerdarstellung aufweist. Abb. 9/21 enthält (bei identischem Vektormaßstab) eine direkte Gegenüberstellung des Dimensionsverhaltens von Polyesterpapier und kartonstarkem Standardpapier.

Die gegebenen Beispiele lassen erkennen, daß das Standard-Photopapier bei einer (auf ein Papierformat von 25 x 25 cm² bezogenen) mittleren Genauigkeit von etwa 0,5 mm bzw. bei einer Affinität von über 1 % für photogrammetrische Arbeiten nicht geeignet ist. Das polyesterbeschichtete Photopapier wird heute von mehreren Firmen (z.B. Agfa, Ilford, Labaphot) angeboten und kostet (bei etwa 50-facher Genauigkeit) nur ca. 25 % mehr als herkömmliches Standardpapier.

c) Reproduktionsgenauigkeit

Zur Überprüfung der Reproduktionsgenauigkeit wurde eine photogrammetrische Gitterplatte auf Polyesterfilm Dupont Cronar CCS reproduziert. Die abgebildeten Rasterpunkte wurden anschließend am Komparator Zeiss PSK 2 ausgemessen. Bei der 3-Parameter-Transformation des reproduzierten Gitters auf das Originalgitter ergab sich ein mittlerer Koordinatenrestfehler von 13 µm (Tab. 9/14). In diesem Betrag ist neben Filmverzug und Objektiv-Verzeichnung auch die Genauigkeit der visuellen Maßstabseinstellung an der Reprokamera enthalten. Nach einer rechnerischen Maßstabskorrektur von 0,1 ‰ erhält man eine Restgenauigkeit von etwa 7 µm. Der Abzug einer Affinität von 0,05 ‰ bringt keine Verbesserung des Ergebnisses. Die Fehler der Reproduktion (< 10 µm, bezogen auf ein Filmformat von 25 x 25 cm²) können also für die Untersuchung der Mosaikgenauigkeit unberücksichtigt bleiben.

d) Genauigkeit der Bildmontage

Die bei der Bildmontage auftretenden Fehler setzen sich aus Zuordnungs- bzw. Einpaßfehlern, Papierverzug und Klebefehlern zusammen. Diese Einflüsse sollen hier gemeinsam diskutiert werden.

Aus der 3-Parameter-Transformation der aus Polyesterpapier zusammengesetzten Gitter auf das Sollgitter ergab sich ein mittlerer Restfehler von 0,09 mm. Der mittlere Fehler aus der Helmert-Transformation betrug 0,08 mm. Da bei der Verwendung von Polyesterpapier auch beim nassen Kleben kein Verzug von (im Mittel) > 0,01 mm entstehen kann, müssen die Gitterdeformationen auf die Einpassung und den Klebevorgang selbst zurückgeführt werden. Bei der Affintransformation der Gitterbilder zeigte sich eine Affinität von 1,2 ‰ und (nach deren rechnerischer Eliminierung) eine Verbesserung der Koordinatenfehler auf etwa 0,07 mm. Dieses Ergebnis läßt auf systematische Zuordnungsfehler schließen, zumal alle Teilstücke von der gleichen Richtung her zusammengefügt worden waren. Wie aus dem in Abb. 9/22 dargestellten Vektordiagramm ersichtlich ist, traten beim Kleben auch unregelmäßige Drehungen und Verschiebungen der Teilstücke auf. Dieser Effekt war bei nasser Verarbeitung sogar um etwa 20 % stärker als bei trockenem Kleben.

Wird für die Bildmontage kartonstarkes Standard-Photopapier verwendet, so ergeben sich aus der 3-Parameter-Transformation für trockenes (bzw. bei Kaschierleim nahezu trockenes) Kleben mittlere Restfehler von etwa 1,0 mm, bei nasser Verarbeitung von 1,3 mm, jeweils bezogen auf ein Mosaikformat von 25 x 25 cm². Die bei phototechnischer Behandlung von Standardpapier aufgetretene Affinität von 1,2 % erhöht sich bei trockenem Kleben auf 1,6 %, bei nassem Kleben auf 2,1 %. Aus Abb. 9/23 ist das affine Verhalten von Standardpapier bei nasser Bildmontage ersichtlich. Die Fehlervektoren scheinen in der gleichen Größenordnung zu liegen, wie diejenigen aus Abb. 9/18 für den Verzug von Standardpapier (ohne Klebprozeß), sind aber um den Faktor 2,5 verkürzt dargestellt. Nach Abzug der Affinität von 1,6 % bzw. 2,1 % ergibt sich im Mosaik ein mittlerer Restfehler von ca. 0,1 mm, der in der Größe etwa dem unregelmäßigen Verzug von Standardpapier entspricht (Tab. 9/14). Das heißt, daß die reinen Klebfehler bei Verwendung von Standardpapier kleiner sind. Das beim Polyesterpapier beobachtete "Schwimmen" der Teilstücke auf der Unterlage müßte jedoch durch einen geeigneteren Klebstoff (evtl. Sprühklebstoff, Klebefolie oder Gummilösung) weitgehend vermieden werden können. Die Genauigkeit der Bildmontage ließe sich damit vermutlich auf etwa 0,05 mm anheben.

Fehler- quelle	Material- Bezeich- nung	Restfehler aus 3-Parameter- Transformation (mm)		Regelmäßiger Gesamtverzug $\Delta m = 1 - m$ (°/oo)	Restfehler aus Helmert- Transformation (mm)		Regelmäßiger Verzug quer $m_q = 1 - m_q$ (°/oo)		Affinität $A = m_1^{-m} q$ (°/oo)	Restfehler aus Affin- Transformation (mm)	
		mittel	maximal		mittel	maximal	längs $\Delta m_1 = 1 - m_1$ (°/oo)	mittel		maximal	
Papier- verzug Polyester Papier	P 11	0,012	0,026	0,03	0,011	0,024	0,15	-0,09	0,24	0,007	0,014
	P 12	0,011	0,025	0,09	0,008	0,015	0,16	0,03	0,13	0,007	0,017
	P 13	0,011	0,025	0,001	0,011	0,025	0,12	-0,11	0,23	0,006	0,014
	P 14	0,010	0,027	0,08	0,009	0,019	0,14	0,00	0,14	0,007	0,018
	Mittel	0,011	0,026	0,05	0,010	0,021	0,14	-0,06	0,20	0,007	0,016
Papier- verzug Standard Papier	K 11	0,637	1,470	4,6	0,526	0,977	11,0	-2,0	13,0	0,112	0,242
	K 13	0,567	1,225	4,7	0,431	0,719	10,0	-0,7	10,7	0,102	0,232
	Mittel	0,603	1,347	4,6	0,481	0,848	10,5	-1,4	11,9	0,107	0,237
Repro- duktion auf Film	Cronar CCS	0,013	0,030	0,12	0,007	0,017	0,14	0,09	0,05	0,007	0,017
	Bild- montage + Papier- verzug	0,091	0,189	-0,64	0,076	0,165	-1,2	-0,1	-1,1	0,063	0,171
		0,089	0,189	-0,11	0,088	0,234	-0,6	0,3	-1,3	0,075	0,222
		0,964	1,968	9,5	0,617	0,996	17,1	1,6	15,5	0,100	0,262
		1,287	2,516	12,7	0,817	1,440	22,8	2,1	20,6	0,107	0,328

Tab. 9/14 Empirische Werte für Papierverzugaufbau (Polyesterbeschichtetes Spezialpapier, kartonstarkes Standardpapier) und Verarbeitungsfehler (Reproduktion, Bildmontage); quadratische Mittelwerte der Restfehler aus 3-Parameter-Helmert- und Affintransformation

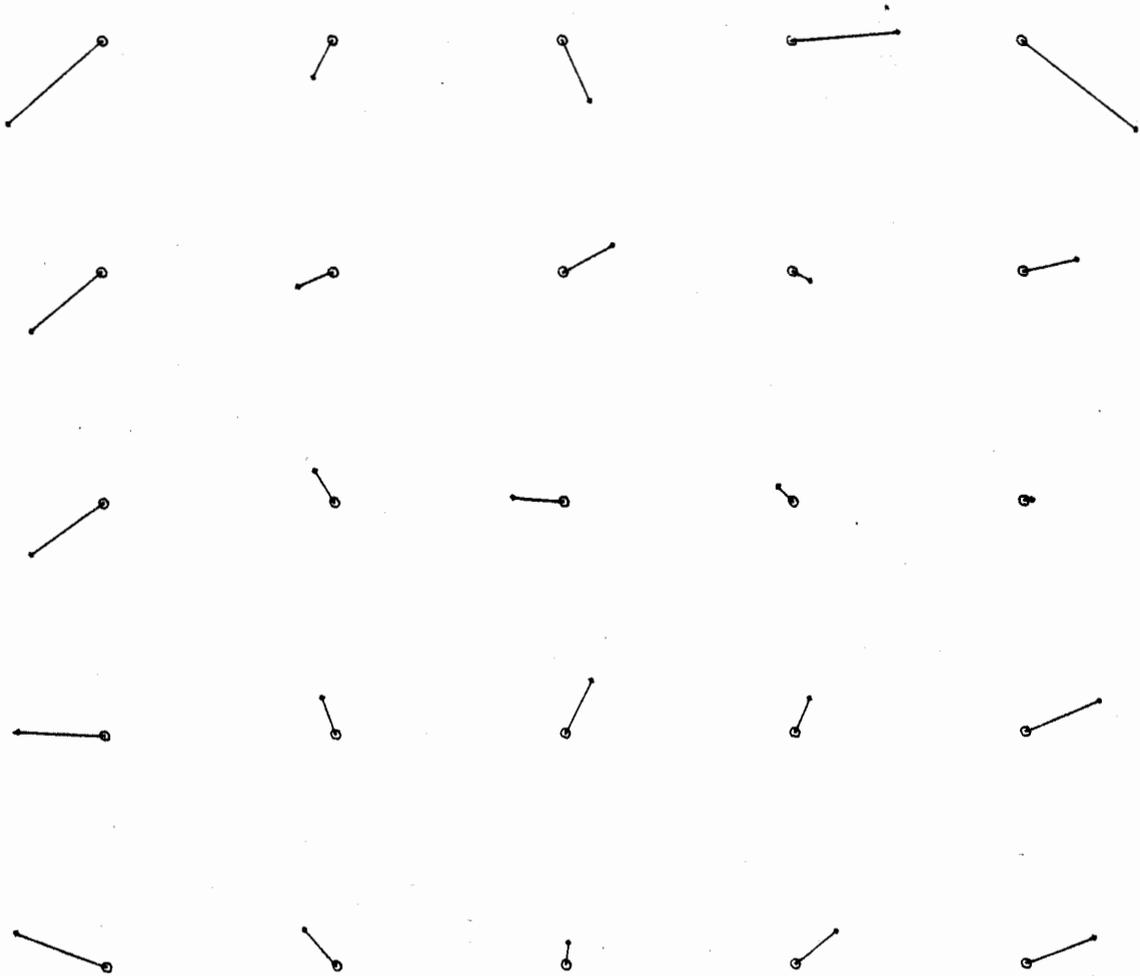
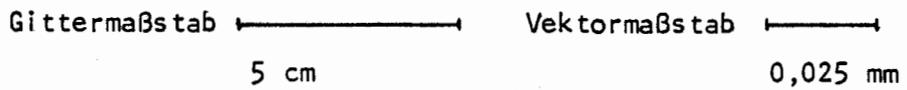


Abb. 9/15 Beispiel (P 11) für den Verzug von polyesterbeschichtetem Spezialpapier, Restfehler aus 3-Parameter-Transformation



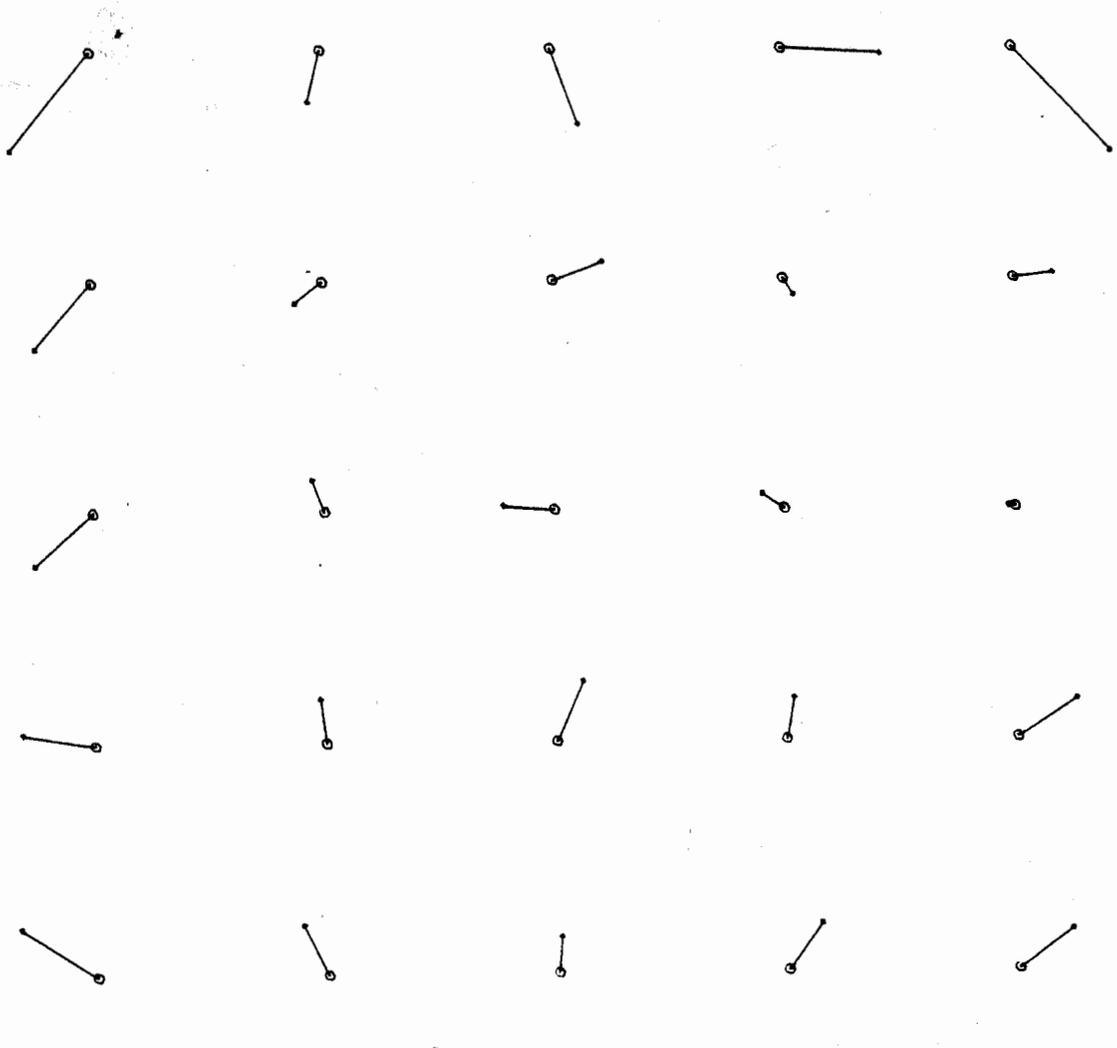
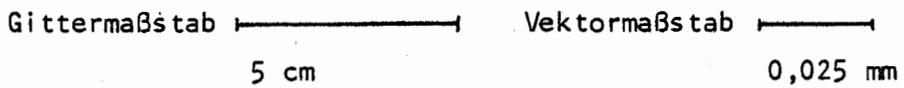


Abb. 9/16 Beispiel (P 11) für den Verzug von polyesterbeschichtetem Spezialpapier, Restfehler aus Helmert-Transformation



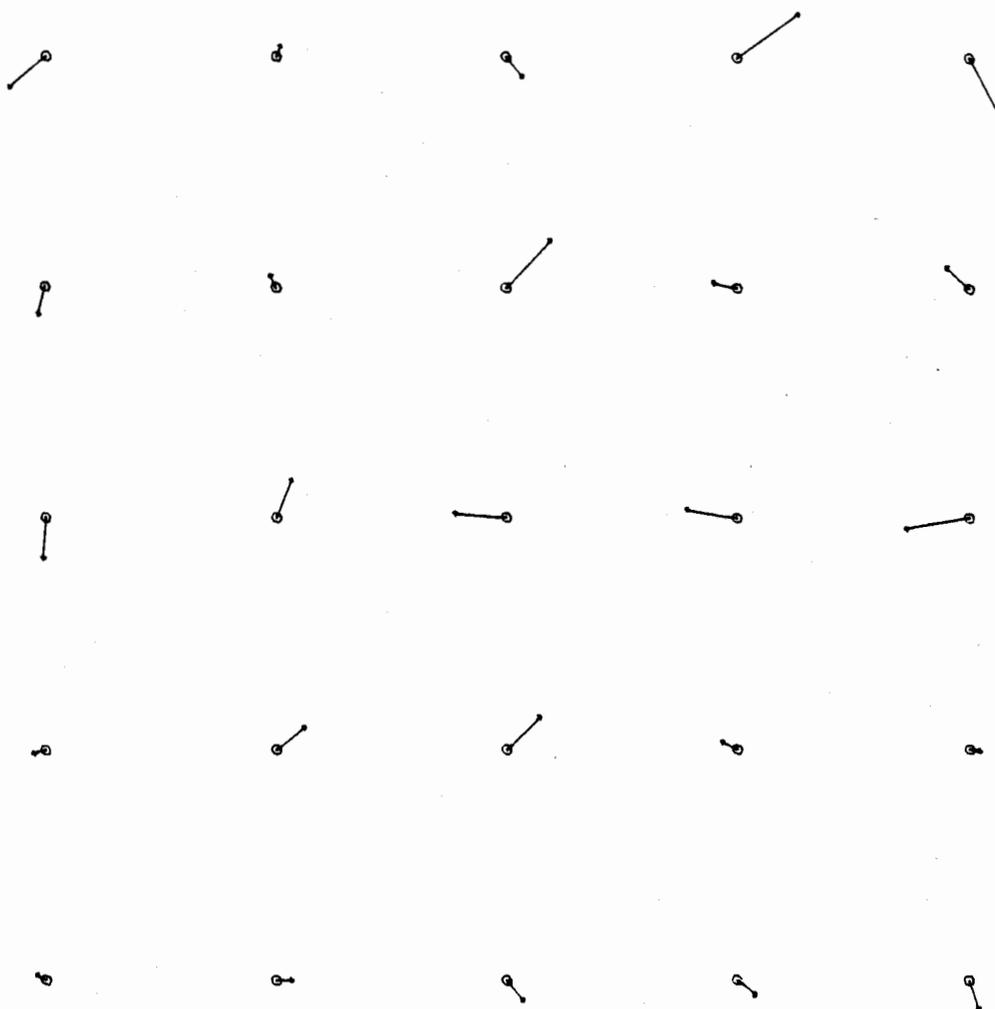


Abb. 9/17 Beispiel (P 11) für den Verzug von polyesterbeschichtetem Spezialpapier, Restfehler aus Affintransformation

Gittermaßstab

5 cm

Vektormaßstab

0,025 mm

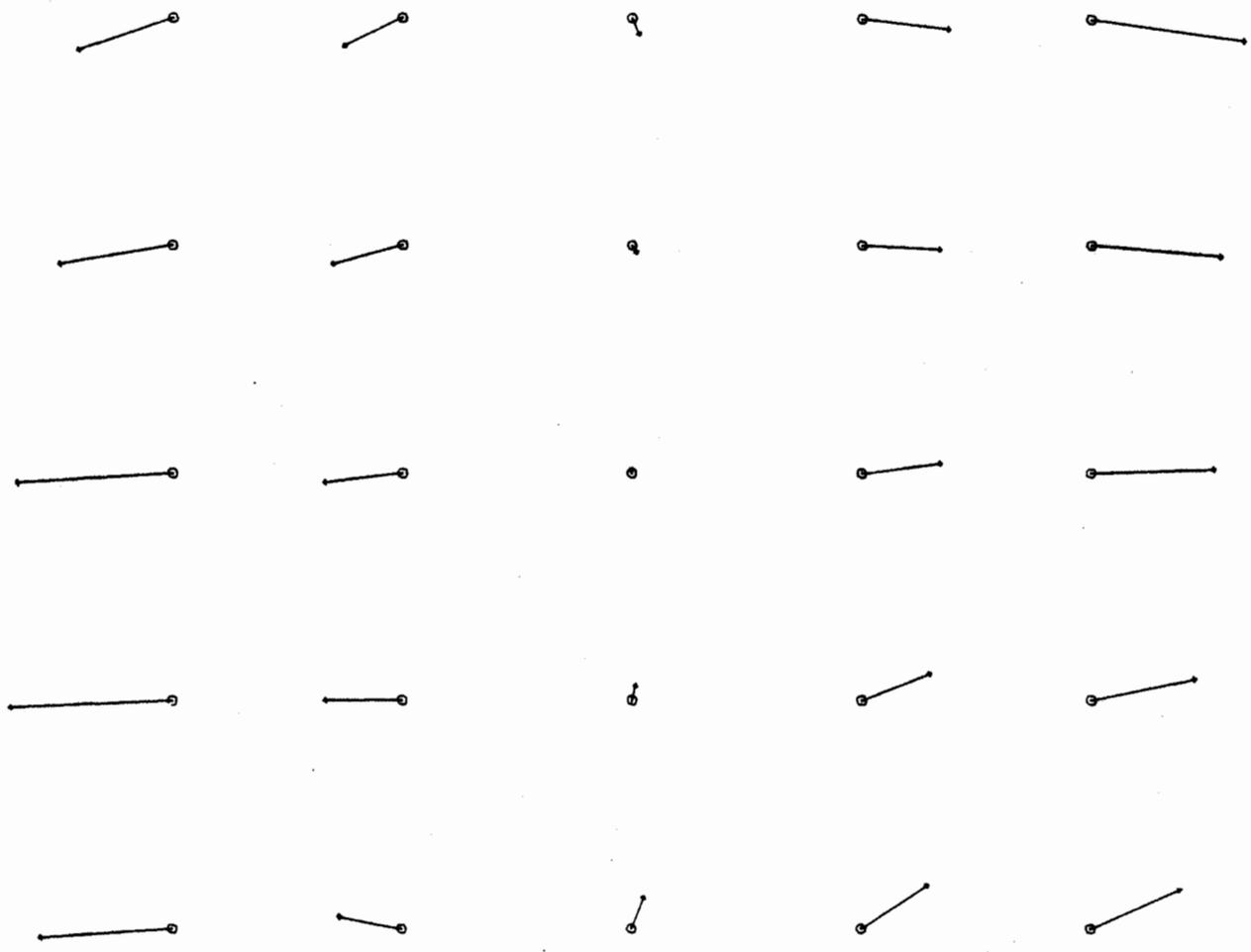
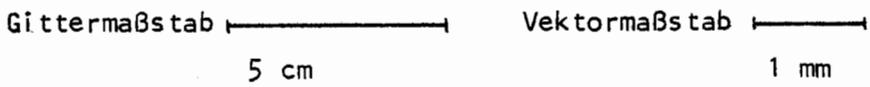


Abb. 9/18 Beispiel (K 11) für den Verzug von kartonstarkem Standardpapier, Restfehler aus 3-Parameter-Transformation



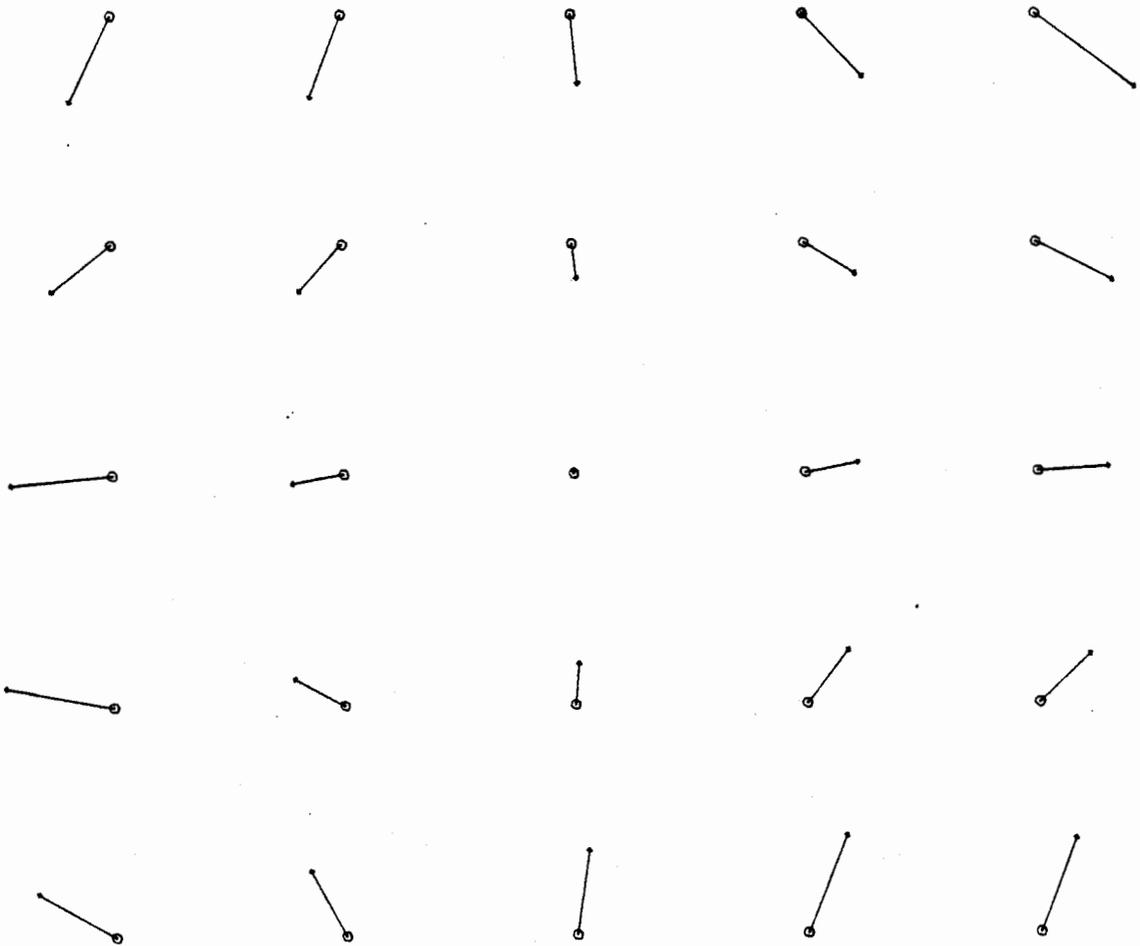
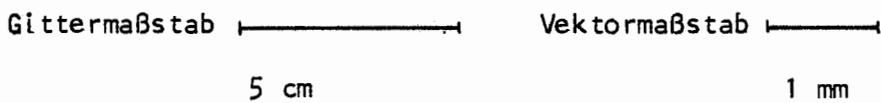


Abb. 9/19 Beispiel (K 11) für den Verzug von kartonstarkem Standardpapier, Restfehler aus Helmert-Transformation



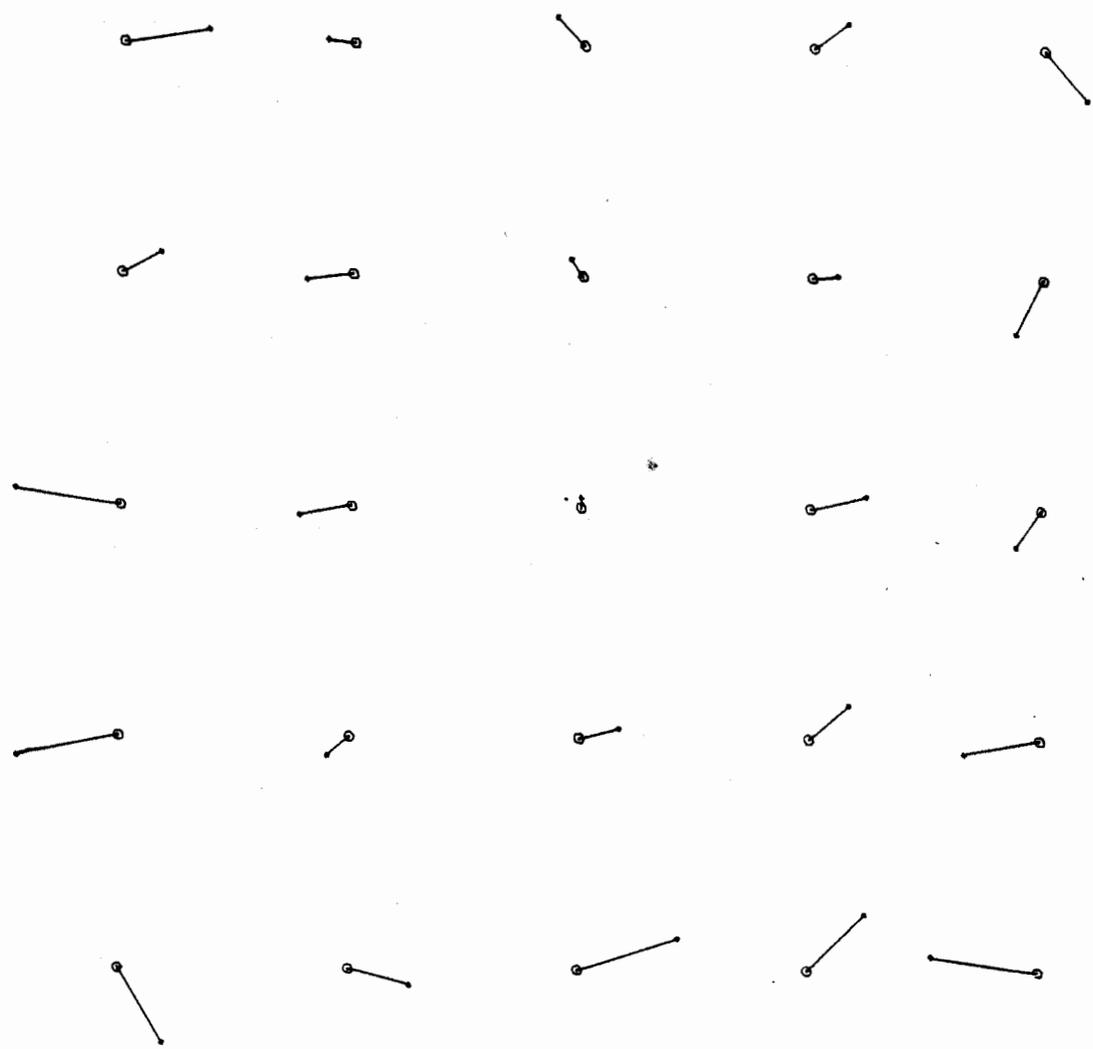
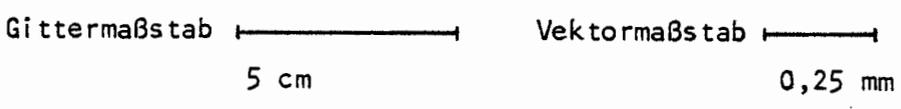


Abb. 9/20 Beispiel (K 11) für den Verzug von kartonstarkem Standardpapier, Restfehler aus Affintransformation



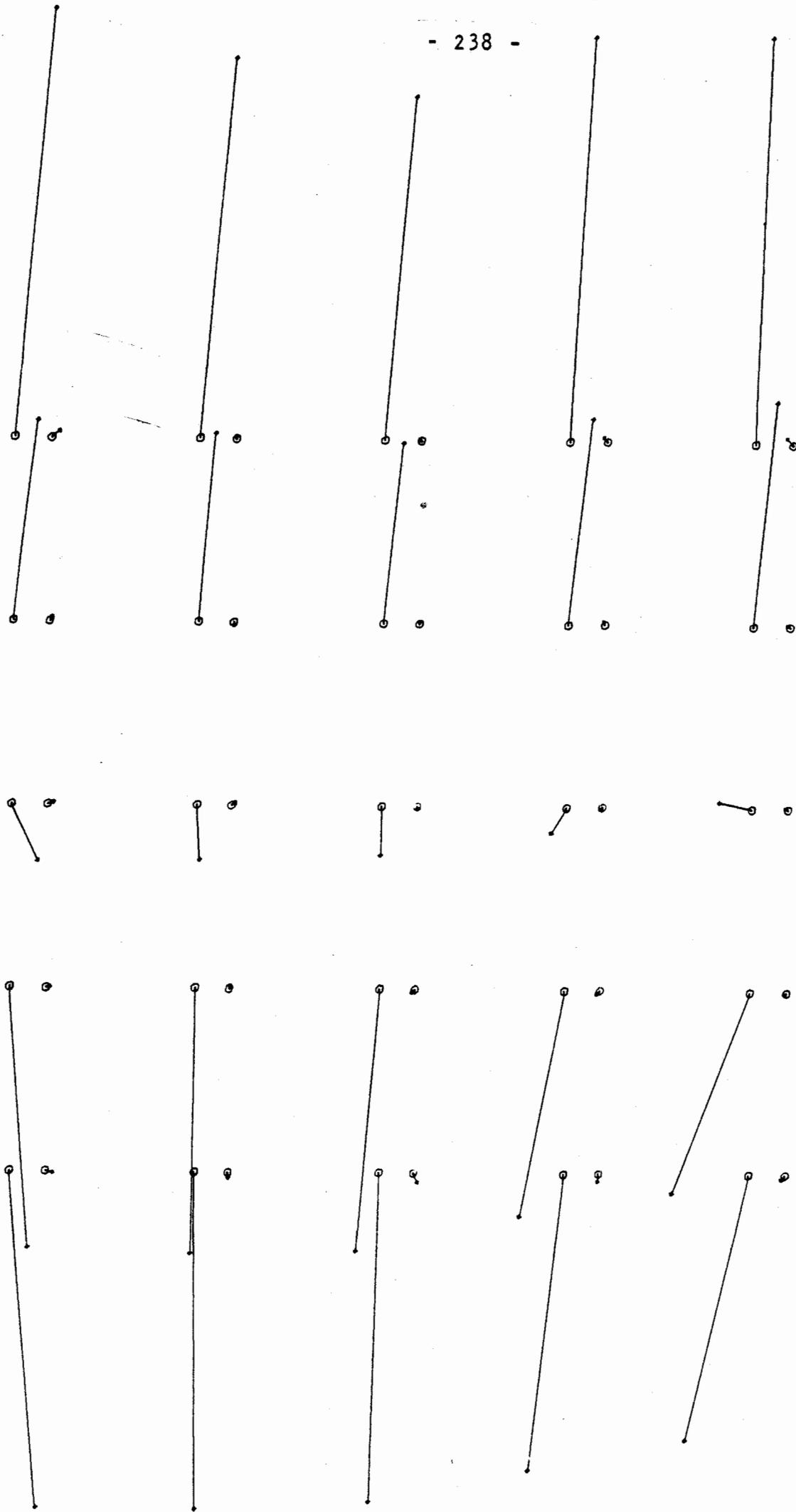


Abb. 9/21 Direkte Gegenüberstellung von Polyesterpapier (untere Vektorenreihen) und Standardpapier (obere Vektorenreihen) Beispiele P 13 und K 13, Restfehler jeweils aus 3-Parameter-Transformation
Gittermaßstab 5 cm
Vektormaßstab 0,5 mm

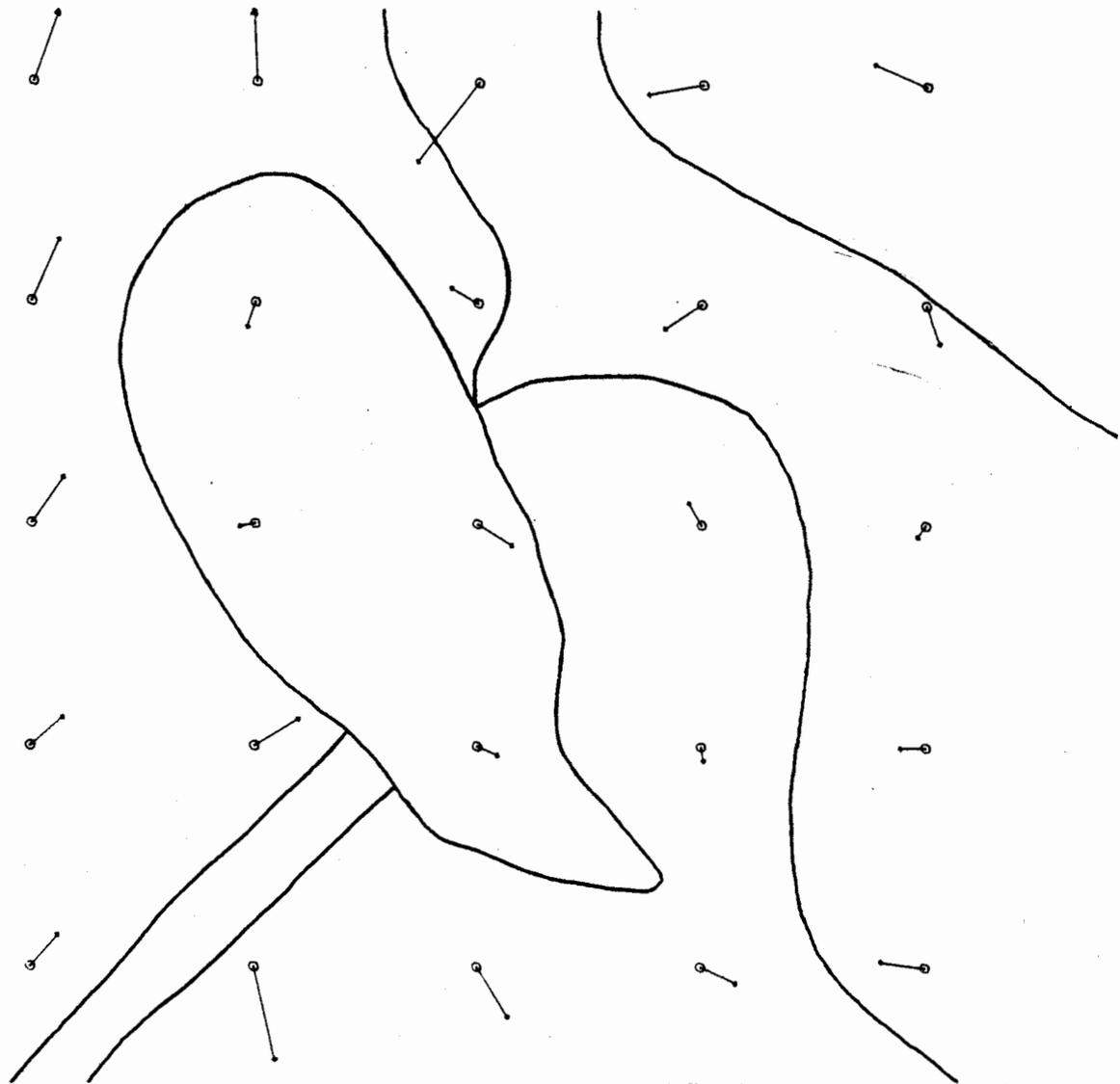
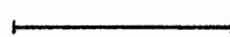


Abb. 9/22 Fehlerbeispiel (P 32 N) für nasse Bildmontage mit Polyesterpapier (einschließlich Reproduktion), Restfehler aus 3-Parameter-Transformation, Eingetragene Randlinien der Mosaikteilstücke

Gittermaßstab 
5 cm

Vektormaßstab 
0,25 mm

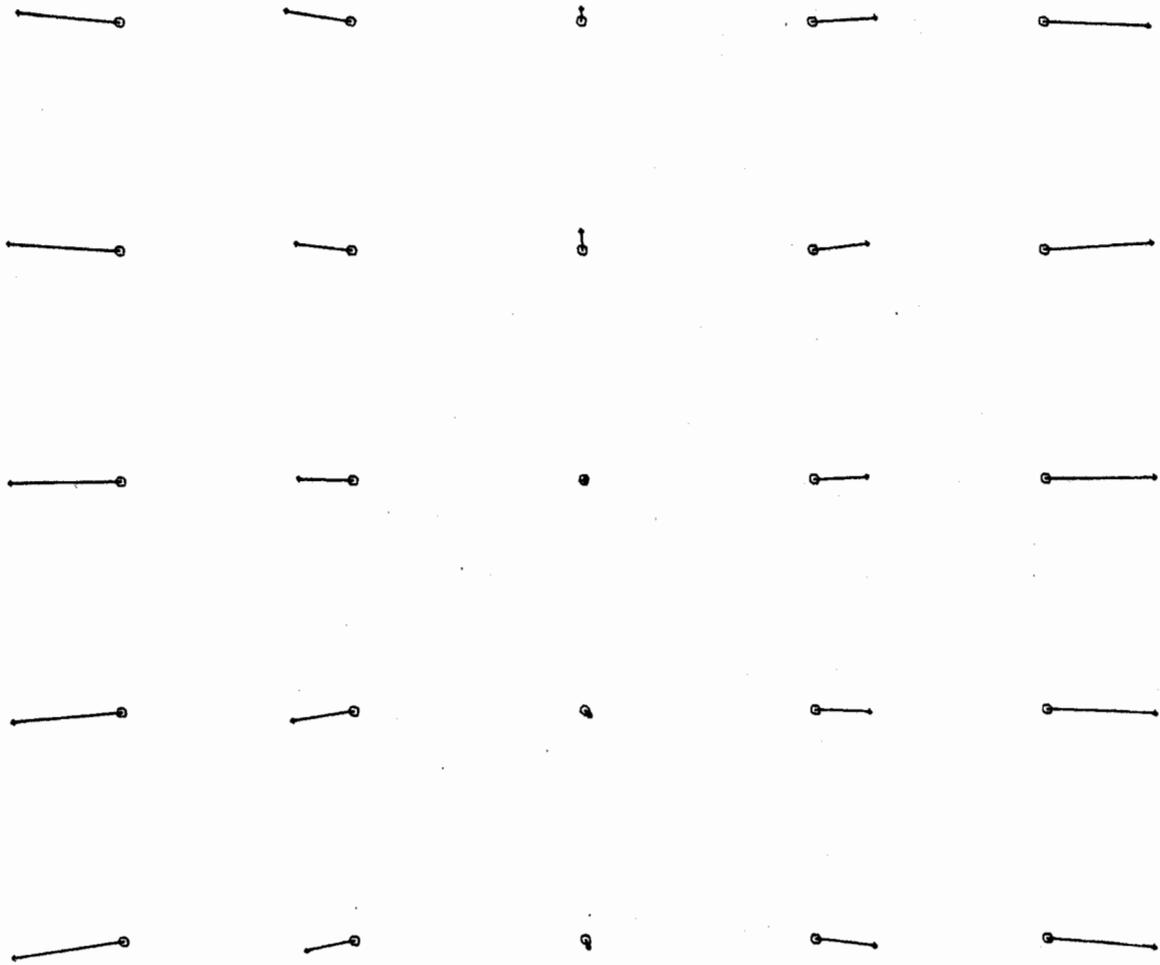


Abb. 9/23 Fehlerbeispiel (K 32 N) für nasse Bildmontage mit Standardpapier (einschließlich Reproduktion), Restfehler aus 3-Parameter-Transformation

Gittermaßstab 
5 cm

Vektormaßstab 
2,5 mm

9.2 Empirische Genauigkeitsuntersuchung an kombinierten Strich-Halbton-Plänen

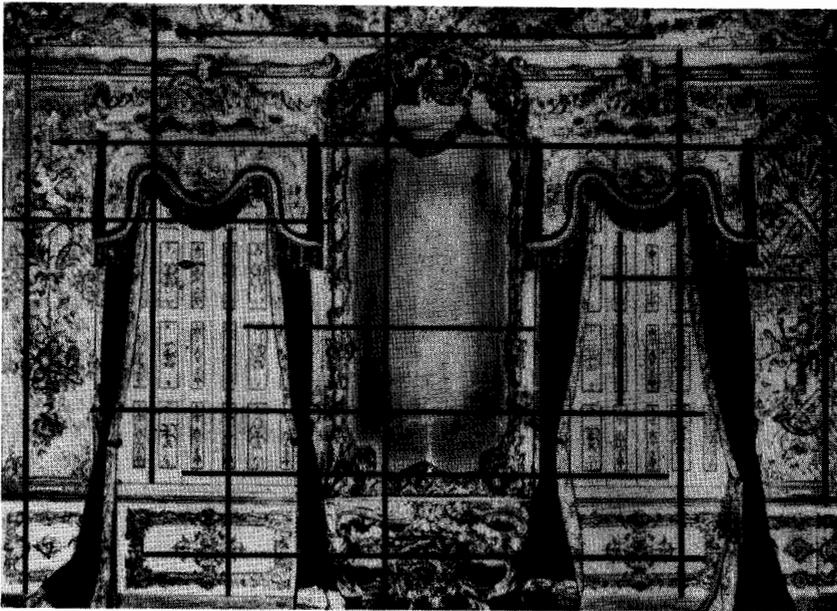
Die in den vorherigen Abschnitten diskutierten Einzelfehler addieren sich bei der Herstellung von kombinierten Strich-Halbton-Plänen auf. An einem praktischen Beispiel wurde hier die Gesamt-Genauigkeit derartiger Darstellungen untersucht. Dafür standen drei Strich-Halbton-Pläne von Schloß Linderhof als Papierabzüge (Spezialpapier Labaphot BN 313, polyesterbeschichtet) im Maßstab 1:50 zur Verfügung. Es handelte sich um die Vertikalschnitte A, B und D (Abb. 7/11) durch das Gebäude (Abbildungen C/6 und C/7 im Anhang). Die Erdgeschoßräume sowie die Dachkonstruktion wurden als Strichzeichnung (Zeiss Terragraph), die Innenraum-Ansichten im Obergeschoß als Photokarten (Zeiss SEG V, Stereoplanigraph C 8 + GZ 1) dargestellt.

Die Bauaufnahme des Schlosses Linderhof in Südbayern wurde 1972 von der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Arbeit galt als Pilotprojekt für den Einsatz des Orthophotoverfahrens in der Architekturphotogrammetrie (HAUG, HUEBER und KNAPPICH /47/, SEEGER /120/). Die orthophotographische Auswertung auf diesem Sektor war damals völliges Neuland. Das bedeutet, daß sich im gesamten Arbeitsprozess Fehler einschleichen konnten, die sich mit der heutigen Erfahrung hätten vermeiden lassen. Dabei sind besonders vier Faktoren zu erwähnen:

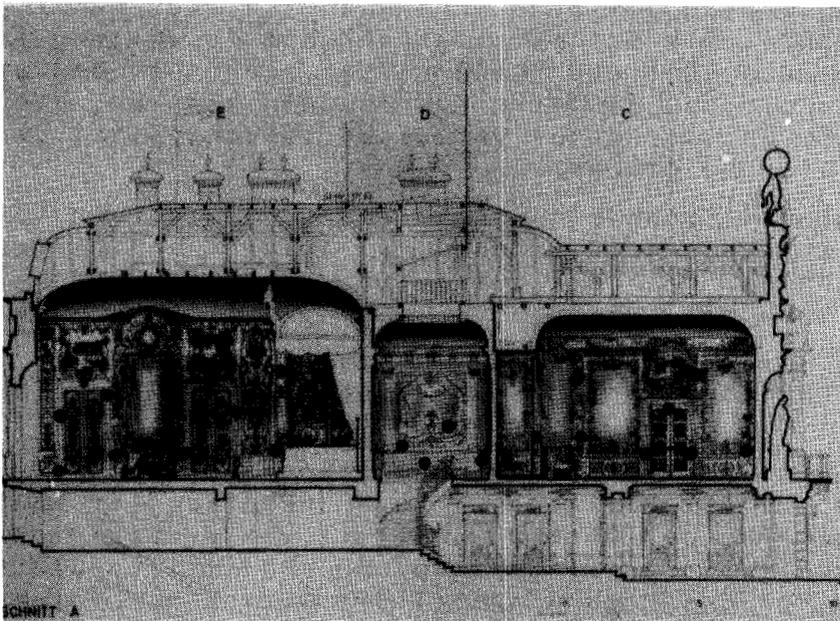
1. Die für die Brennweitenangleichung notwendigen Vergrößerungen am Entzerrungsgerät wurden ohne Ansaugtisch hergestellt. Eine ausreichende Planlage des Films war dadurch sicherlich nicht immer gewährleistet.
2. Als Filmmaterial wurde orthochromatischer Acetatfilm (Agfa 0 23) verwendet, der geringere Maßbeständigkeit aufweist als Polyesterfilm.
3. Sämtliche Vergrößerungen von Orthophotos und Filmmontagen wurden auf herkömmliches Standard-Photopapier (Agfa BN 112, kartonstark) belichtet, wobei die Papier-Laufrichtung jeweils beliebig zu liegen kam. Ausschließlich die Kontaktkopien der Gesamtschnitte (1:50) wurden auf Polyesterpapier hergestellt.
4. Die Bildmontagen wurden auf Objektlinien (Türrahmen, Leisten) eingepaßt, die aus der Stereokartierung stammten und auf Aluminiumplatten aufgezeichnet waren. Die Montage selbst erfolgte im Naßklebprozess.

Die Genauigkeitsuntersuchung an den kombinierten Strich-Halbton-Plänen von Schloß Linderhof gliederte sich in zwei Teile und wurde nach zwei verschiedenen Methoden durchgeführt. Zur Veranschaulichung der Meßgrundlagen dient Abb. 9/24.

Als erstes wurde die Genauigkeit der von den Innenraum-Wandflächen (Abb. 9/24 a) hergestellten Bildmontagen untersucht. Da an den Wandflächen nur wenige diskrete Einzelpunkte vorhanden waren, wurde die Mosaikgenauigkeit durch Streckenvergleich ermittelt (Abschnitt 9.2.1). Dieses Vorgehen schien berechtigt, weil Strecken zwischen



(a)



(b)

Abb. 9/24 Beispiele für die zur Überprüfung der Plangengenauigkeit verwendeten Meßgrundlagen

(a) Wandansicht des östlichen Gobelinzimmers in Schloß Linderhof, Halbtonmosaik (aus Vertikalschnitt B) mit eingetragenen Vergleichsstrecken

(b) Gesamtvertikalschnitt A durch Schloß Linderhof, kombinierter Strich-Halbton-Plan mit eingetragenen Vergleichspunkten

Kanten, Leisten und Rahmen in der architektonischen Praxis von Interesse sind und häufig aus Plänen entnommen werden. Die jeweiligen Strecken wurden mit einem Glasmaßstab in den Bildmosaiken (z.B. Abb. 9/24 a) ausgemessen. Da eine örtliche Bestimmung der Soll-Strecken am Objekt zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war, wurden die Vergleichsstrecken aus photogrammetrischen Modellen am Zeiss Planimat gewonnen bzw. aus Modellkoordinaten abgeleitet.

Im zweiten Untersuchungsteil ging es um die absolute Koordinatengenauigkeit (Abschnitt 9.2.2) von Vergleichspunkten in den kombinierten (d.h. aus Stereokartierung, entzerrten Bildern und Orthophotos zusammengesetzten) Gesamtplänen (Abb. 9/24 b). Als Vergleichspunkte wurden die bei der Bauaufnahme des Schlosses durch geodätische Methoden (HAUG, HUEBER und KNAPPICH /47/) bestimmten Paßpunkte verwendet. Die Paßpunktsignale am Objekt bestanden aus roten Punkten von 8 mm Durchmesser, die sich auf den orthochromatischen Photoplatten als weiße Punkte abbildeten, und die auch in der endgültigen Photokarte noch gut zu identifizieren waren. Die Ausmessung dieser Punkte in den Plänen 1:50 erfolgte am Internzeichentisch des Planimat.

9.2.1 Streckengenauigkeit in den Bildplänen der Innenräume

Für die Bestimmung der Streckengenauigkeit wurden an vier Innenraum-Wandflächen (Beispiel in Abb. 9/24 a) der Vertikalschnitte A, B und D (Bezeichnungen gemäß Abb. 7/11) insgesamt 80 Vergleichsstrecken ausgewählt. Als Strecken-Begrenzungen bewährten sich gewisse Detailstrukturen sowie Leisten und Rahmen am Objekt. Um Affinitäten des photographischen Verarbeitungsprozesses erfassen zu können, wurden alle Strecken parallel zu den Koordinatenachsen der Bildpläne gelegt (Abb. 9/24 a).

Die Ausmessung der Bildplanstrecken erfolgte mit einem Glasmaßstab auf 0,1 mm genau, was am Objekt einem Betrag von 5 mm entspricht. Die Genauigkeit der aus den photogrammetrischen Modellen am Planimat abgeleiteten Strecken betrug 35 µm (im Modellmaßstab 1:50) bzw. 1,8 mm am Objekt. Dem Streckenvergleich lag also eine Erfassungsgenauigkeit von etwa 6 mm am Objekt zu Grunde.

Für die Beurteilung der Verarbeitungsgenauigkeit (Fehler der Entzerrung und Orthoprojektion, Papierverzug, Bildmontagefehler) wurden aus den Differenzen zwischen Bildplanstrecken und Modellstrecken nach der Formel

$$m_S = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{n}} \quad (9,1)$$

mittlere Streckendifferenzen (quadratische Mittelwerte) berechnet. Dabei bedeutet n die Anzahl der gemessenen Strecken, d die Differenz zwischen der jeweiligen Bildplanstrecke S_B und der Modellstrecke S_M , jedoch nach der Formel

$$d = \frac{(S_B - S_M) \cdot S_0}{S_M} \quad (9,2)$$

umgerechnet auf eine mittlere Objektstrecke von $S_0 = 3,5$ m. Die Reduktion diente der Normierung auf eine einheitliche Streckenlänge und ersetzte die Berechnung mit unterschiedlichen Gewichten.

Da die normierten Streckenfehler d eine starke Systematik aufweisen, wurde für jedes Bildmosaik ein systematischer Streckenfehler \bar{d} nach

$$\bar{d} = \frac{[d]}{n} \quad (9,3)$$

sowie ein relativer Streckenfehler \bar{d}_R nach

$$\bar{d}_R = \frac{\bar{d}}{s_0} \quad (9,4)$$

berechnet. Den unregelmäßigen Anteil v des jeweiligen normierten Streckenfehlers d erhält man als Differenz

$$v = \bar{d} - d \quad (9,5)$$

Der mittlere unregelmäßige Streckenfehler m_{us} ergibt sich als quadratischer Mittelwert der unregelmäßigen Anteile v zu

$$m_{us} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}} \quad (9,6)$$

Aus den Streckenfehlern können durch Division mit $\sqrt{2}$ Koordinatenfehler abgeleitet werden, die für natürliche Objektpunkte Gültigkeit haben. Nach Gleichung (9,1) läßt sich der mittlere Koordinatenfehler m_K (einschließlich der Systematik) zu

$$m_K = m_s / \sqrt{2}, \quad (9,7)$$

nach Gleichung (9,6) der mittlere unregelmäßige Koordinatenfehler nach Abzug des systematischen Anteils zu

$$m_{uk} = m_{us} / \sqrt{2} \quad (9,8)$$

berechnen.

Die aus diesen Berechnungen hervorgegangenen Ergebnisse für die Strecken- und Koordinatenfehler sind in den Tabellen 9/25 bis 9/27 raumweise zusammengestellt. Tab. 9/25 enthält die nach den Gleichungen (9,1) und (9,7) berechneten mittleren Strecken- und Koordinatenfehler (einschließlich der systematischen Anteile). Die entsprechenden Fehlerbeträge, jedoch nach Abzug der Systematik, sind in Tab. 9/27 aufgeführt. Tab. 9/26 zeigt die jeweiligen systematischen Fehler als Relativfehler \bar{d}_R in %.

Nach Tabelle 9/25 beträgt der mittlere, aus Streckenvergleichen abgeleitete Koordinatenfehler in den Bildmosaiken der Innenräume von Schloß Linderhof 38 mm am Objekt. Die geringe Genauigkeit ist vorwiegend begründet durch die beim Herstellen der Papierabzüge (herkömmliches Standardpapier) sowie beim Kleben der Bildmontagen entstandenen affinen Papierverzüge von nahezu 2 % (Tab. 9/26), die in der Größenordnung etwa den in Abschnitt 9.1.7 (Tab. 9/14) erhaltenen Werten für nasse Mosaikbildung mit kartonstarkem Standardpapier entsprechen. Das bedeutet, daß (wenn auch nur zufällig) eine bestimmte Papierlaufrichtung in den Verarbeitungsprozessen eingehalten wurde. Grundsätzlich haben sich jedoch bei der Montage der Bildpläne unterschiedliche Affinitäten vermischt.

Raum Vertikal- schnitt	Streckenfehler			Koordinatenfehler		
	m_s (x) (mm)	(y) (mm)	d_{Smax} (x,y) (mm)	m_k (x) (mm)	(y) (mm)	d_{kmax} (x,y) (mm)
5 / D	24	86	110	17	61	80
7 / A	26	59	70	19	42	50
9 / B	29	63	85	20	44	60
12 / A	27	71	110	19	50	80
Mittel	27	70		19	50	
	53 mm			38 mm		

Tab. 9/25 Mittlere und maximale Strecken- und Koordinatenfehler (quadratische Mittelwerte) in (mm) am Objekt, abgeleitet durch Streckenvergleich an Bildmosaiken der Innenraum-Wandflächen, Schloß Linderhof

Raum Vertikal- schnitt	Relative Streckenfehler	
	(x)	(y)
5 / D	0,6	2,4
7 / A	0,7	1,3
9 / B	0,6	1,4
12 / A	0,6	1,8
Mittel	0,6 %	1,7 %

Tab. 9/26 Systematische Streckenfehler als Relativfehler (%), hervorgerufen durch affinen Papierverzug und regelmäßige Klebefehler bei der Bildmontage

Durch die generelle Verwendung von Polyesterpapier sowie durch eine verfeinerte Klebe- und Montagetechnik hätten die aufgetretenen Affinverzüge weitgehend vermieden werden können. Es ist anzunehmen, daß sich damit in den Bildmosaiken eine Genauigkeit eingestellt hätte, die dem mittleren unregelmäßigen Koordinatenfehler von 12 mm aus Tab. 9/27 nahekommt.

Raum/ Vertikal- schnitt	Unregelmäßige Streckenfehler				Unregelmäßige Koordinatenfehler			
	m_{us}		$d_{us \max}$		m_{uk}		$d_{uk \max}$	
	(x) [mm]	(y) [mm]	(x) [mm]	(y) [mm]	(x) [mm]	(y) [mm]	(x) [mm]	(y) [mm]
5 / D	14	22	28	32	10	16	20	23
7 / A	10	22	16	22	7	15	11	16
9 / B	14	19	24	30	10	13	17	21
12 / A	18	18	28	44	13	13	20	31
Mittel	14	20			10	14		
	18 mm				12 mm			

Tab. 9/27 Mittlere und maximale unregelmäßige Strecken- und Koordinatenfehler (quadratische Mittelwerte) in (mm) am Objekt, nach Abzug der systematischen Anteile; Innenraum-Wandflächen, Schloß Linderhof

9.2.2 Absolute Koordinatengenauigkeit in den kombinierten Strich-Halbtton-Plänen

Die Untersuchung der absoluten Koordinatengenauigkeit stützte sich auf insgesamt 37 Vergleichspunkte, die aus der Bauaufnahme des Schlosses koordinatenmäßig (mit einer Genauigkeit von 10 mm am Objekt) bekannt waren. Die in den Gesamtplänen (Beispiel in Abb. 9/24 b) der Vertikalschnitte A, B und D (Bezeichnungen gemäß Abb. 7/11) abgebildeten Vergleichspunkte wurden am Internzeichentisch des Planimat mit einer Genauigkeit von 50 μm (im Maßstab 1:50) bzw. 2,5 mm (am Objekt) ausgemessen und mit Hilfe von 3-Parameter-Transformationen (ohne Maßstabsangleichung) auf die Objektpunkte eingepaßt. Die Ergebnisse dieser Transformationen (quadratische Mittelwerte der Restfehler) sind in Tab. 9/28 zusammengestellt.

In den Fehlerangaben aus Tab. 9/28 sind die Fehler der terrestrischen Paßpunkte und der photogrammetrischen Aufnahme, die Fehler von Entzerrung, Orthoprojektion, Papierverzug und Bildmontage sowie die Fehler der Stereokartierung und der Strich-Halbtton-Montage (Flußdiagramm 7/12) enthalten. Das Ergebnis (mittlere Koordinatenrestfehler $\sigma_k = 34 \text{ mm}$) zeigt trotz des unterschiedlichen Vorgehens bei der Untersuchung eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den Werten der über Streckenvergleich ermittelten Genauigkeiten aus Abschnitt 9.2.1. Die Hauptfehlerquellen dürften in beiden Fällen die affinen Verzüge von kartonstarkem Standard-Photopapier sowie die Bildmontage sein.

Vertikal- schnitt	Mittlere Koordinatenfehler			
	σ_k		$\Delta_k \text{ max}$	
	(x) (mm)	(y) (mm)	(x) (mm)	(y) (mm)
A	25	34	64	76
B	17	38	41	88
D	47	34	78	57
Mittel	32	35		
	34 mm			

Tab. 9/28 Mittlere und maximale Koordinatenrestfehler (quadratische Mittelwerte in (mm) am Objekt) aus 3-Parameter-Transformationen, Vergleich von Planpunkten und Objektpunkten

9.3 Zusammenstellung und Vergleich der Genauigkeiten

9.3.1 Orthophotogenauigkeit

In Abschnitt 9.1.5 wurde die Genauigkeit von Architektur-Orthophotos an Testfeldaufnahmen sowie an einigen praktischen Beispielen untersucht. Diese Angaben (Abschnitt a) sollen nun mit den aus der Luftbildmessung bekannten Werten für die Orthophotogenauigkeit verglichen werden (Abschnitt b). Außerdem existieren seit kurzer Zeit auch von anderen Instituten Aussagen über die Genauigkeit von Orthophotoplänen in der Architektur, die hier ebenfalls angeführt werden sollen (Abschnitt c).

NEUBAUER stellte in einer "Genauigkeitsuntersuchung des Orthoprojektors Gigas-Zeiss" (/104/) die bei der Differentialverzerrung von Luftbildern im einzelnen auftretenden Fehlerkomponenten zusammen. Die jeweiligen Angaben zu den Geräte-, Ankopplungs- und Filmfehlern sowie zu Verfahrens- und Abtastfehlern lassen sich jedoch nicht unmittelbar mit den in den Abschnitten 9.1.5.1 bis 9.1.5.3 dieser Arbeit erhaltenen Werten für die Architektur-Anwendung vergleichen, weil die Objektstruktur und die Parameter von Aufnahme und Auswertung zu unterschiedlich waren. Dagegen ergibt sich beim Vergleich der Orthophoto-Gesamtgenauigkeit eine beachtenswerte Übereinstimmung zwischen den Werten aus beiden Anwendungsbereichen, was im folgenden gezeigt werden soll.

a) Orthophotos aus Architekturaufnahmen

Werden die aus den Testfelduntersuchungen (Abschnitt 9.1.1) abgeleiteten mittleren Beträge für Ankopplungsfehler (0,02 mm, Abschnitt 9.1.5.1, Abbilde- bzw. Gerätefehler des Orthoprojektors (0,06 mm, Abschnitt 9.1.5.2) und Abtast- und Verfahrensfehler (0,13 mm, Abschnitt 9.1.5.3) quadratisch aufaddiert, so ergibt sich ein mittlerer Koordinatenfehler von etwa 0,15 mm im Orthophoto.

Nach Tab. 9/7 in Abschnitt 9.1.5.4 wurde an den Objektbeispielen "Eltingen, Fachwerk", "Mechelen, Turm", "Schloß Linderhof, Südgiebel" und "Amsterdam, Kirchenkuppel" aus 174 Vergleichspunkten eine mittlere Koordinatengenauigkeit von 0,12 mm im Orthophoto erzielt. In diesem Betrag sind Orthoprojektorfehler, Ankopplungs- und Filmfehler sowie Verfahrens- und Abtastfehler enthalten, jedoch nicht die Fehler der terrestrischen Paßpunkte, der Aufnahme und der Modellbildung im Stereoauswertegerät.

b) Orthophotos aus Luftbildern

NEUBAUER /104/, S. 64/ erhielt aus empirischen Genauigkeitsuntersuchungen an 44 Orthophotos des Versuchsfeldes "Reichenbach" der Kommission C der OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales) sowie aus theoretischen Hochrechnungen der Einzelfehlerkomponenten eine mittlere Koordinatengenauigkeit von 0,15 mm im Orthophoto. In diesem Wert sind alle oben aufgeführten Fehlereinflüsse enthalten.

MEIER /89/ führte mit ebenfalls am Orthoprojektor Zeiss GZ 1 gewonnenen Einzelwerten eine Hochrechnung durch und bekam mittlere Koordinatenfehler im Orthophoto von 0,13 mm. Aus empirischen Untersuchungen mit dem digital gesteuerten Orthoprojektor Wild Avioplan OR 1 ergaben sich nach STEWARDSON /130/ mittlere Koordinatenfehler zwischen 0,10 und 0,16 mm in Abhängigkeit von der Reliefstruktur des Geländes. BLACHUT /7/ berichtete über ein in den Jahren 1972 bis 1976 durchgeführtes Internationales Orthophoto-Experiment, an dem 11 verschiedene Orthoprojektionsgeräte beteiligt waren. An ca. 175 Vergleichspunkten wurde in 22 Orthophotos eine mittlere Koordinatengenauigkeit von 0,14 mm beobachtet. Dabei entfallen 0,12 mm auf eine in Beziehung zur Bildmitte radiale, 0,05 mm auf eine tangentiale Fehlerkomponente.

Sowohl die Genauigkeitsergebnisse aus dem Architekturbereich als auch diejenigen aus der Luftphotogrammetrie liegen in der Größenordnung zwischen 0,1 und 0,2 mm im Orthophoto. Durch die bei Architekturauswertungen meist kleineren Bildwinkel und Orthophoto-Formate ergibt sich gegenüber der Luftbildauswertung ein Genauigkeitsvorteil, der jedoch durch die stärkere Reliefstruktur am architektonischen Objekt, d.h. durch größere Abtast- und Verfahrensfehler in der Regel wieder kompensiert wird. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse zeigt, daß sich die Genauigkeitserwartungen der Luftbildorthophotographie weitgehend auf die terrestrische Anwendung übertragen lassen.

c) Architektur-Orthophotos anderer Institute

Wie in Abschnitt 8 berichtet wurde, haben bisher etwa zehn Institutionen versuchsweise Orthophotos architektonischer Objekte hergestellt. Angaben zur Genauigkeit liegen allerdings nur von drei Stellen vor. Die recht fragmentarischen Ergebnisse sollen der Vollständigkeit wegen dennoch hier genannt werden.

VOJNOVIĆ und MARČETA berichteten in /135/ über eine Genauigkeitsüberprüfung des Orthophotos der Festung Kalemegdan in Belgrad (Abb. A/10 im Anhang dieser Arbeit). Sie erhielten aus 20 Längenvergleichen zwischen Objekt und Orthophoto einen mittleren Streckenfehler von 7 mm, was einem mittleren Koordinatenfehler von 5 mm am Objekt bzw. 0,07 mm im Orthophoto 1:75 gleichkommt. Für die Genauigkeit einer entsprechenden Stereokartierung gaben sie einen Koordinatenfehler von 4 mm am Objekt an.

Am Orthophoto der Römischen Mauer in Regensburg (Abb. A/1 im Anhang, HOEHLE /57/) wurden mittlere Koordinaten-Abweichungen von 8 mm zum Objekt festgestellt. Dieser Betrag entspricht einer Genauigkeit von 0,4 mm im Orthophotomaßstab 1:20.

SITEK /125/ führte zwei verschiedene Genauigkeitsuntersuchungen durch. An einem Testfeld erhielt er eine Orthophotogenauigkeit von 0,18 mm im Maßstab 1:40 bzw. 7 mm am Objekt. An natürlichen Punkten eines Mauerwerks ergaben sich aus der Orthoprojektion mittlere Koordinatenfehler von 20 mm, bei signalisierten Punkten konnte eine Genauigkeit von 10 mm erreicht werden. Der zugehörige Orthophotomaßstab ist in der Publikation nicht erwähnt.

Vergleicht man die verschiedenen Ergebnisse (absolute Gesamtgenauigkeit einschließlich der Genauigkeit der Vergleichspunkte, mittlerer Koordinatenfehler etwa 0,25 mm im Orthophoto bzw. 11 mm am Objekt) mit den im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Genauigkeitswerten für Architektur-Orthophotos (reine Orthophotogenauigkeit, mittlerer Koordinatenfehler etwa 0,15 mm im Orthophoto, bzw. 8 mm am Objekt), so ist eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung festzustellen.

9.3.2 Genauigkeit von kombinierten Strich-Halbton-Plänen, Hochrechnung

Neben der eigentlichen Orthophotogenauigkeit, die in den vorigen Abschnitten besprochen wurde, ist vielfach auch die Genauigkeit von kombinierten Strich-Halbton-Plänen, wie sie zum Beispiel im Rahmen der Bauaufnahme "Schloß Linderhof" angefertigt wurden, von Interesse. Mit den in Abschnitt 9.1 angegebenen Einzelgenauigkeiten soll hier eine entsprechende Hochrechnung durchgeführt werden.

Als erstes wird versucht, die in den Schnittplänen von Schloß Linderhof (Abbildungen C/6 und C/7 im Anhang) enthaltenen Fehleranteile abzuschätzen und sie in Verbindung mit den jeweiligen Verarbeitungsmaßstäben zum Gesamtfehler hochzurechnen, wobei bezüglich des Photopapiers zwischen kartonstarkem Standardpapier und polyesterbeschichtetem Spezialpapier unterschieden werden soll (siehe Abschnitt 9.1.7).

Stimmen die aufaddierten Fehlerwerte mit den aus den empirischen Untersuchungen in Abschnitt 9.2 gewonnenen Werten größenordnungsmäßig überein, so dürfte eine Übertragung der Ergebnisse und Methoden auf andere Projekte möglich sein. In einer weiteren Hochrechnung wird daher versucht, die bei den durchschnittlichen Verarbeitungsmaßstäben aus Abschnitt 8 (Tab. 8/1) und unter Verwendung von Polyestermaterial zu erwartende Gesamtgenauigkeit für kombinierte Strich-Halbton-Pläne abzuschätzen. Die Zahlenwerte der einzelnen Hochrechnungen sind in Tab. 9/29 zusammengestellt.

Grundlagen und Verarbeitungsabschnitte	Beispiel Schloß Linderhof			Allgemeines Beispiel	
	Maßstab 1:	Standardpapier σ_k (mm)	Polyesterpapier σ_p (mm)	Maßstab 1:	Polyesterpapier ϵ_p (mm)
Terrestrische Paßpunkte		10	10		5
Aufnahme	100	0,5	0,5	230	1
Vergrößerung auf Film	40	0,5	0,5	90	1
Modellbildung	10	0,5	0,5	70	1
Orthophotoherstellung	10	1,5	1,5	50	10
Umbildung Papierabzug Mosaik	16	20	2	25	2
Reproduktion		0,5	0,5		0,5
Kontaktabzug auf Papier	25	15	0,5	25	0,5
Montage in Stereokartierung	25	10	10	25	10
Reproduktion	50	0,5	0,5	50	0,5
Kontaktkopie (Polyesterpapier)	50	1,0	1,0	50	1,0
Kombinierter Strich-Halbton-Plan	50	29	15	50	15

Tab. 9/29 Hochrechnung von Einzelgenauigkeiten (in mm) am Objekt) zur Gesamtgenauigkeit von kombinierten Strich-Halbton-Plänen im Maßstab 1:50;
Beispiel Schloß Linderhof:

σ_k mittlerer Koordinatenfehler bei Verwendung von kartonstarkem Photopapier

σ_p mittlerer Koordinatenfehler bei Verwendung von polyesterbeschichtetem Photopapier

Verallgemeinertes Objektbeispiel:

ϵ_p mittlerer Koordinatenfehler bei Verwendung von polyesterbeschichtetem Photopapier

Nach der Hochrechnung aus Tab. 9/29 ergibt sich für die Gesamtgenauigkeit eines kombinierten Strich-Halbton-Plans von Schloß Linderhof bei Verwendung von Standard-Photopapier ein Wert von 29 mm am Objekt. Der aus Strecken- und Koordinatenvergleichen in Abschnitt 9.2 erhaltene mittlere Koordinatenfehler beträgt im Verhältnis dazu 36 mm. Wäre dagegen für sämtliche Kopierprozesse Polyesterpapier verwendet worden, so hätte sich nach Tab. 9/29 wahrscheinlich eine Genauigkeit von ca. 15 mm eingestellt. Nach einer theoretischen Affintransformation (Abzug der linearen systematischen Fehler) ergab sich in Abschnitt 9.2.1 tatsächlich ein mittlerer Koordinatenfehler von 12 mm am Objekt.

Die durch Hochrechnung erhaltenen Werte stimmen also gut mit den empirischen Untersuchungsergebnissen überein. Dadurch wird es (wie bereits vermutet) möglich, auch für andere Projekte die zu erwartende Genauigkeit durch Einzelabschätzungen und anschließende Hochrechnung a priori zu ermitteln. Die letzte Spalte von Tab. 9/29 enthält einen derartigen Versuch. Als mittlerer Koordinatenfehler ergibt sich hier für die kombinierte Karte unter den angenommenen Verhältnissen nach Hochrechnung ein Wert von 15 mm am Objekt.

Die in Abschnitt 9 untersuchten und zusammengestellten Genauigkeitswerte für Architektur-Orthophotos und kombinierte Strich-Halbton-Pläne sind von den jeweiligen, objektbezogenen sowie geräte- und verfahrenstechnischen Voraussetzungen abhängig. Die Angaben können daher nicht ohne weiteres verallgemeinert werden. Durch die Vielzahl und Unterschiedlichkeit der Beispiele, durch den Vergleich mit den Ergebnissen aus der Luftbildmessung sowie durch die Beiträge auswärtiger Institute erscheint jedoch zumindest die Größenordnung der erhaltenen Werte als gesichert.

Im allgemeinen kann also nach den bisherigen Erfahrungen sowohl bei der Herstellung von Bildplänen und kombinierten Strich-Halbton-Karten als auch bei der Stereokartierung und der Orthophoto-Hochzeichnung im Architektur-Bereich mit einem mittleren Koordinatenfehler von etwa 10 - 15 mm am Objekt gerechnet werden. Diese Genauigkeit ist für Zwecke der Bauaufnahme in der Regel ausreichend.

10. Zeitaufwand bei verschiedenen Auswerteverfahren

10.1 Orthophoto-Herstellung, Zeitaufwand und Kosten

Die für die Produktion von Orthophotos notwendige Geräte- und Auswertezeit ist in erster Linie abhängig von der Abtastzeit, also vom Orthophoto-Format, von der Streifenbreite und der Profiliergeschwindigkeit. Dazu kommen die Peripheriezeiten für das Einlegen der Bilder und des Films, für Orientierung, Übertragung und Ankopplung sowie für das Entnehmen und Entwickeln des Films.

Peripheriezeit

Die Komponenten der Peripheriezeit bei Architekturauswertungen wurden aus 26 eigenen Versuchen (Beispiele aus den Teilen B und C des Anhangs sowie aus der Bauaufnahme Schloß Linderhof) ermittelt. Im Durchschnitt ergaben sich für die Gerätekombinationen Zeiss Planimat-GZ1 (on-line und off-line) und Stereoplanigraph C 8 - GZ 1 (on-line) folgende Einzelzeiten in Stunden (h):

Zentrieren der Bilder im Stereoauswertegerät, relative und absolute Orientierung (Normalfall und Aufnahmen weitgehend parallel zur Objektbezugsebene)	0,75 h
Einlegen des 3. Bildes im Orthoprojektor GZ 1, Orientierung	0,25 h
Übertragung, Ankopplung, Punktkontrolle	0,5 h
Einlegen des Films, Festlegung der Bereiche	0,25 h
Entnahme und Entwickeln des Films	0,25 h
Summe	2,0 h =====

Für die bei der Orthophotoherstellung aus Luftbildern anfallende Peripheriezeit liegen ebenfalls Erfahrungswerte vor. NEUBAUER /104, S. 62/ benötigte am Gerätesystem Zeiss Stereoplanigraph C 8 - Orthoprojektor GZ 1 durchschnittlich etwa 3 Stunden für die Vorbereitungen und Nebenarbeiten bei der Orthoprojektion. Dieselbe Zeit wird von HOBBIE /55, S. 120/ angegeben. Die Differenz zu dem hier erhaltenen Wert von 2 Stunden ist hauptsächlich auf die (gegenüber dem stereophotogrammetrischen Normalfall) längere Orientierungszeit bei Luftbildern zurückzuführen.

HOEHLE und STEWARDSON nannten in /57a/ für die Gerätekombination Wild A 8 / PPO 8 eine (aus Produktionsresultaten abgeleitete) durchschnittliche Peripheriezeit von 1,5 Stunden. Dieser äußerst niedrige Wert kann durch das Konstruktionsprinzip des PPO 8 (siehe Abb. 8/4) erklärt werden. Im Gegensatz zum GZ 1 - System ist hier kein 3. Projektor vorhanden. Die Bildinformation für das Orthophoto wird direkt dem linken Bild des A 8 entnommen, so daß keine Vorbereitungszeiten für das Einlegen eines zusätzlichen Bildes, für Übertragung und Ankopplung entstehen.

In den folgenden Betrachtungen und Abschätzungen wird von der an den Architekturbeispielen gemessenen Peripheriezeit von 2 Stunden pro Modell bzw. Orthophoto ausgegangen.

Abtastzeit

Die Abtast- bzw. Projektionszeit (T) bei der streifenweisen Differentialentzerrung ist abhängig von der Profiliergeschwindigkeit (v) sowie von der Länge und Anzahl der Profile bzw. vom Orthophotoformat (s_x , s_y) und der Streifenbreite (Δx). Die Laufzeit kann nach ALBERTZ - KREILING /3, S.167/ zu

$$T = \frac{s_x \cdot s_y}{\Delta x \cdot v} \cdot k \quad (10,1)$$

berechnet werden, wobei der zusätzliche Faktor k den durch Umkehrvorgänge beim Mäanderlauf sowie durch das Anhängen von Sicherheitsrandzonen erhöhten Zeitverbrauch berücksichtigen soll. In der Regel wird mit $k = 1,2$, d.h. mit einem Zuschlag von 20 % gearbeitet.

Mit den durchschnittlichen Erfahrungswerten für die Profiliergeschwindigkeit, das mittlere Orthophoto- und Modellformat, den Profilabstand und die Streifenbreite aus den Beispielen in Abschnitt 8 lassen sich (ebenfalls durchschnittliche) Profilierzeiten berechnen. Für die Profilabtastung im Stereoauswertegerät erhält man mit

$$\begin{aligned} s_x = s_y &= 140 \text{ mm} && \text{Modellformat} \\ \Delta x &= 1,6 \text{ mm} && \text{Profilabstand} \\ \text{und } v &= 3 \text{ mm/sec} && \text{Abtastgeschwindigkeit} \end{aligned}$$

nach Gleichung (10,1) eine Zeit von 1,4 Stunden. Entsprechend ergibt sich die Projektionszeit im off-line-Betrieb mit

$$\begin{aligned} s_x = s_y &= 350 \text{ mm} && \text{Orthophotoformat} \\ \Delta x &= 2 \text{ mm} && \text{Streifenbreite} \\ \text{und } v &= 5 \text{ mm/sec} && \text{Blendenlaufgeschwindigkeit} \end{aligned}$$

zu $T = 4,1$ Stunden.

Wie bereits in Abschnitt 8 angegeben wurde, betrug bei den praktischen Beispielen die Zeit für die off-line-Modellabtastung im Stereoauswertegerät im Durchschnitt 1,5 Stunden. Für die Projektion wurden im Mittel etwa 4 Stunden benötigt. Im on-line-Betrieb ergab sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 mm/sec am Zeiss-Planimat eine mittlere Profilierzeit (Abtast- und Projektionszeit) von 1,7 Stunden. Allerdings wurde bei direkter Ankopplung mit Affinprojektion (Abschnitt 5.2.2) gearbeitet, was gegenüber den off-line-Beispielen einen um den Faktor 2,5 kleineren Orthophotomaßstab und damit bei gleicher Streifenbreite eine geringere Orthophotogenauigkeit zur Folge hatte. Die Auswertzeiten von on-line- und off-line-Projektion sind daher nicht ohne weiteres vergleichbar.

Durch den Einsatz digital gesteuerter off-line-Orthoprojektoren lassen sich Projektionszeit und Peripheriezeit (zumindest die Anteile für Ankopplung, Punktkontrolle und Bereichsfestlegung) erheblich reduzieren. Zum Beispiel beträgt beim Orthoprojektor Wild Avioplan OR1 nach STEWARDSON /130/ die Peripheriezeit (einschließlich Entwicklung des Orthophotofilms) etwa 0,5 Stunden. Eine weitere Zeitersparnis ist durch die Ausnutzung der hohen Blendenlaufgeschwindigkeit (maximal 30 mm/sec) möglich.

Kostenaufwand

Im folgenden werden die für die Herstellung eines Architektur-Orthophotos im off-line-Betrieb zu veranschlagenden Geräte- und Personalkosten abgeschätzt. Die Auswertung soll mit den Geräte-Kombinationen

Zeiss Planimat - Speichergerät SG 1 - Lesegerät LG 1 -
Orthoprojektor GZ 1 + Optische Interpolationseinrichtung 0-Int

und

Zeiss Planimat - Magnetbandstation - Wild Avioplan OR 1

durchgeführt werden. Für beide Versionen wurde wegen des terrestrischen Kammerzubehörs als Stereoauswertegerät der Zeiss Planimat gewählt. Die Projektion soll jeweils mit Querneigungskorrektur (Entzerrung 1. Ordnung) erfolgen. Den Beispielen werden (gemäß den Erfahrungswerten aus Abschnitt 8) folgende Annahmen zugrundegelegt:

Modellabtastung (Zeiss Planimat)

Modellformat	140 x 140 mm ²
Profilabstand (Modell)	1,6 mm
Mittlere Abtastgeschwindigkeit	3 mm/sec

Orthoprojektion (Zeiss GZ 1, Wild OR 1)

Orthophotoformat	350 x 350 mm ²
Streifenbreite (Orthophoto)	2,0 mm
Projektionsgeschwindigkeit GZ 1	5 mm/sec
Projektionsgeschwindigkeit OR 1	20 mm/sec

Als Projektionsgeschwindigkeit im GZ 1 war in den praktischen Beispielen (Abschnitt 8) 5 mm/sec gewählt worden, damit die Photozelle im Lesegerät den Profillinien (z.B. Abb. 3/6) auch bei starker Flächenneigung folgen kann. In einigen Fällen wäre auch eine Geschwindigkeit von 10 mm/sec möglich gewesen. Dagegen kann nach STEWARDSON /130/ die Projektionsgeschwindigkeit im Avioplan auch bei besonders schwierigen Objektflächen 20 mm/sec betragen.

Der Kostenaufwand gliedert sich in Personalkosten und Gerätekosten. Die Personalkosten können hier für einen erfahrenen Operateur zu DM 30.- pro Mannstunde angesetzt werden. Als Gerätekosten pro effektiver Arbeitsstunde werden angenommen:

Zeiss Planimat + Speichergerät SG 1 bzw. Magnetbandstation	DM 30.-/h
Zeiss GZ 1 + Lesegerät LG 1	DM 40.-/h
Wild Avioplan OR 1	DM 40.-/h

Die Kosten beziehen sich auf eine jährliche Geräteausnutzung von 3000 Stunden (2 Schichten) und eine Abschreibung nach 5 Jahren (siehe auch HOEHLE und STEWARDSON /57a/). Mit den angenommenen Werten und einem jeweiligen Zuschlag von DM 10.- pro Orthophoto für Filmmaterial und Chemikalien ergeben sich die in den Tabellen 10/1 und 10/2 zusammengestellten Gesamtkosten pro Orthophoto.

PLANIMAT - GZ 1		Zeitaufwand (h)	Gerätekosten (DM)	Personalkosten (DM)
Vorbereitungen	Planimat	1	30.-	30.-
	GZ 1	1	40.-	30.-
Abtastung Projektion	Planimat	1,5	45.-	45.-
	GZ 1	4	160.-	-
Summe		7,5	275.-	105.-
Photomaterial (Film, Chemikalien)			10.-	
Gesamtkosten pro Orthophoto			390.-	

Tab. 10/1 Abschätzung der Herstellungskosten für ein
Architektur-Orthophoto, Zeiss Planimat -
GZ 1, off-line

PLANIMAT - AVIOPLAN		Zeitaufwand (h)	Gerätekosten (DM)	Personalkosten (DM)
Vorbereitungen	Planimat	1	30.-	30.-
	Avioplan	0,5	20.-	15.-
Abtastung Projektion	Planimat	1,5	45.-	45.-
	Avioplan	1	40.-	-
Summe		4	135.-	90.-
Photomaterial (Film, Chemikalien)			10.-	
Rechenkosten für Bildkoordinaten, Programm SORA-OP, nach OTEPKA und LOITSCH /107/			115.-	
Gesamtkosten pro Orthophoto			350.-	

Tab. 10/2 Abschätzung der Herstellungskosten für ein
Architektur-Orthophoto, Zeiss Planimat -
Wild Avioplan, off-line

Falls die Objektstruktur es erlaubt, kann beim Orthoprojektor GZ 1 mit 10 mm/sec, beim Avioplan mit 30 mm/sec gefahren werden. Die angegebenen Gesamtkosten würden sich in diesem Fall beim GZ 1 auf DM 310.-, beim Avioplan auf DM 337.- ermäßigen. Bei geringen Objektflächeneigungen quer zur Streifenrichtung ist bei Entzerrung 1. Ordnung für beide Geräte ohne Genauigkeitseinbuße zusätzlich eine Erhöhung der Streifenbreite möglich. Bei einer Streifenbreite von $\Delta x = 8$ mm ergeben sich Orthophoto-Herstellungskosten von DM 250.- beim GZ 1 und DM 317.- beim Avioplan.

Für ein Architektur-Orthophoto der Größe $35 \times 35 \text{ cm}^2$ muß demnach bei Verwendung der genannten Gerätesysteme im off-line Herstellungsverfahren je nach Objektstruktur bzw. Genauigkeitsansprüchen mit Gesamtkosten zwischen etwa DM 250.- und DM 400.- gerechnet werden.

Neben der Differentialentzerrung besteht bei weitgehend ebenen Objektflächen (eventuell bei Mauern oder Fassaden) gelegentlich die Möglichkeit einer Teilflächenentzerrung (Abschnitt 2.4.4) an einem photogrammetrischen Entzerrungsgerät. Für diesen Fall sind zum Vergleich mit den Orthophotokosten in Tabelle 10/3 die zu erwartenden Geräte- und Personalkosten angegeben. Es wird hierbei davon ausgegangen, daß der gesamte Bildplan (von der Größe der oben zugrundegelegten Orthophotos, $35 \times 35 \text{ cm}^2$) aus drei separat entzerrten Teilbildern zusammengesetzt wird. Als Gerätekosten pro effektiver Arbeitsstunde werden für das Entzerrungsgerät Zeiss SEG V DM 20.- angenommen.

ENTZERRUNGSGERÄT SEG V	Zeitaufwand (h)	Gerätekosten (DM)	Personalkosten (DM)
Vorbereitungen, Paßpunktkartierung	0,5	-	15.-
Entzerrung am SEG V, 3 Bildteile	1	20.-	30.-
Bildmontage, Reproduktion	1	-	30.-
Summe	2,5	20.-	75.-
Material für Montage und Reproduktion		55.-	
Gesamtkosten pro Bildplan		150.-	

Tab. 10/3 Abschätzung der Herstellungskosten für einen Architektur-Bildplan durch Teilflächenentzerrung (3 Bildteile) am Zeiss SEG V

Aus der Kostenzusammenstellung in Tab. 10/3 ergibt sich für die Herstellung eines (3-teiligen) Bildplans ein Betrag von DM 150.-. Dieses Herstellungsverfahren ist also (unter den hier angenommenen Bedingungen) um etwa die Hälfte billiger als die Orthoprojektion.

Allerdings ist die Anwendung der Teilflächenentzerrung bei den für eine Bauaufnahme geltenden Genauigkeitsansprüchen von etwa 1 - 2 cm am Objekt erheblichen Beschränkungen in der Objektgestalt unterworfen. In der Regel werden daher die Mehrkosten für die Orthophoto-Herstellung in Kauf genommen werden müssen.

10.2 Zeitvergleich Hochzeichnung - Stereokartierung

Die Hochzeichnung entzerrter bzw. differentiell entzerrter Halbtonbilder wurde in Abschnitt 7.3.2 als einfache, leicht zu realisierende Methode zur Gewinnung linienhafter Darstellungen bezeichnet. An dieser Stelle ist nun der für die Hochzeichnung erforderliche Zeitaufwand im Vergleich zur konventionellen Stereokartierung von Interesse. Im Rahmen dieser Arbeit wurden an Kartierungen von Architektur-Objekten spezielle Untersuchungen durchgeführt, die im folgenden beschrieben werden sollen.

Für einen signifikanten Zeitvergleich war es notwendig, Objekte unterschiedlichster Form, Struktur und Dekoration als Grundlage für die Kartierungen zu verwenden. Aus den Beispielen in Abschnitt 8 (Abbildungen in den Teilen B und C des Anhangs) wurden die in Tab. 10/4 aufgeführten Objekte ausgewählt.

A	Schloß Linderhof, Speisezimmer	Abb. B/10
B	Ellwangen, Schönenbergkirche, Stuckdecke	Abb. C/1 und 7/4 (a)
C	Mechelen, Taubenturm	Abb. B/3
D	Eltingen, Fachwerkhaus	Abb. B/1
E	Amsterdam, Vondelkirche, Decke	Abb. B/6 und 7/5
F	Neresheim, Klosterkirche, Südkuppel	Abb. C/4
G	Schloß Linderhof, Eingangsgittertor	Abb. 7/4 (b)

Tab. 10/4 Objektbeispiele für die Untersuchung des Zeitaufwandes von Orthophoto-Hochzeichnung und Stereokartierung

Die vorliegenden Orthophotos (Zeiss Planimat - GZ 1, on-line) der Objektbeispiele A - F sowie das ganzflächig entzerrte Bild G wurden jeweils an einem Leuchttisch auf Pocalon-Folie (mit Bleistift) hochgezeichnet (siehe Abbildungen 7/4 und 7/5 in Abschnitt 7.3.2). Von den gleichen Beispielen wurden am Internzeichentisch des Zeiss-Planimat Stereokartierungen (ebenfalls mit Bleistift auf Pocalon-Folie) angefertigt. Der Kartiermaßstab war bei beiden Verfahren jeweils gleich, jedoch von Objekt zu Objekt verschieden. Um die für die Zeichnungen benötigten Zeiten miteinander vergleichen zu können, wurde auf eine genaue Übereinstimmung der dargestellten Detailfülle geachtet.

Die einzelnen Kartierzeiten sowie die jeweiligen Zeitverhältnisse zwischen Stereokartierung und Hochzeichnung sind in Tab. 10/5 zusammengestellt.

Nach Tabelle 10/5 beträgt das aus den Versuchen ermittelte Zeitverhältnis zwischen Stereokartierung und Hochzeichnung im Durchschnitt 2,3 : 1. Auffallend sind besonders die hohen Verhältniswerte für die Objektbeispiele C (Mechelen, Taubenturm) mit 3,2 : 1 und E (Amsterdam, Vondelkirche, Decke) mit 4,1 : 1. Bei beiden Objekten treten vorwiegend Linienstrukturen auf, die in der Tiefe abgestuft sind. Das bedeutet für die Stereokartierung am Auswertegerät, daß zusätzlich zur Handradbewegung auch die Fußscheibe laufend betätigt werden muß. Wie aus Tab. 2/2 in Abschnitt 2.3.2 ersichtlich ist, ergibt sich dadurch eine etwa 3-fache Zeichenzeit gegenüber der Kartierung ausschließlich zweidimensionaler Linienstrukturen. Für die Hochzeichnung (aus bereits zweidimensionalen Halbtonbildern) macht es dagegen keinen Unterschied, ob die Objektlinien eben oder räumlich verlaufen, so daß für die beiden Beispiele kein Mehraufwand an Hochzeichnenzeit entsteht. Insofern sind die höheren Verhältniswerte bei den Objekten C und E erklärbar.

Auf der anderen Seite steht das Beispiel G. Das Eingangsgittertor von Schloß Linderhof ist völlig eben, weswegen für die Stereokartierung nur etwa 30 % mehr an Zeit aufgewendet werden mußten als für die Hochzeichnung.

Objekt- beispiel	Zeichen- maßstab	Zeichenzeit für Stereokartierung STK (h)	Zeichenzeit für Hochzeichnung HZ (h)	Zeitverhältnis STK : HZ
A	1:27	4,3	2,6	1,7
B	1:30	6,8	2,8	2,4
C	1:100	4,0	1,2	3,2
D	1:60	3,2	1,8	1,7
E	1:62	14,0	3,4	4,7
F	1:100	5,3	3,2	1,7
G	1:24	2,3	1,7	1,3
Mittel	1:58	5,7	2,4	2,3

Tab. 10/5 Reine Zeichenzeiten für Stereokartierung und Hochzeichnung sowie Zeitverhältnisse (STK:HZ) zwischen den Verfahren, Objektbeispiele aus Tab. 10/4

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf die reinen Zeichenzeiten bei Stereokartierung und Hochzeichnung. Für die Beurteilung des Gesamtzeitaufwandes beider Verfahren müssen jedoch die Zeiten für das Einlegen der Bilder und für die Orientierung, vor allem aber die Zeiten für die Orthophoto-Herstellung (Abtast- und Peripheriezeit) mit berücksichtigt werden.

Entsprechend den Ergebnissen aus Abschnitt 10.1 werden im folgenden zu den Zeiten für die Stereokartierung (aus Tab. 10/5) jeweils 1 Stunde für Bildorientierung und Bereichsfestlegung am Zeichentisch, zu den Zeiten für die Hochzeichnung (aus Tab. 10/5) jeweils 2 Stunden für die gesamte Peripheriezeit bei der Orthophotoherstellung hinzuaddiert. Dazu kommen noch die Abtastzeiten aus Tab. 8/1. Für das Beispiel G wird eine Herstellungszeit (Entzerrung + Laborarbeiten) von 0,5 Stunden angesetzt. Die um die angegebenen Zuschläge erhöhten Auswertezeiten und ihre Verhältnisse zueinander sind in Tab. 10/6 zusammengestellt.

Durch die Hinzunahme der Orthoprojektions- und Peripheriezeiten reduziert sich das Zeitverhältnis zwischen Stereokartierung und Hochzeichnung von 2,3 : 1 (Tab. 10/5) auf 1,3 : 1.

Die in Tab. 10/5 angegebenen Zeichenzeiten beziehen sich auf die in den einzelnen Plänen wiedergegebene Detailfülle. Die Selektion war jedoch bei allen diesen Beispielen auf Grund des kleinen Kartiermaßstabes (im Durchschnitt 1:58) entsprechend groß und kann für Arbeiten der Denkmalpflege nicht unbedingt als repräsentativ gelten. Für die Praxis wird oft mit einer mindestens 3-fachen Darstellungsdichte gerechnet werden müssen. Damit kämen die additiven Zuschläge für die Orthophoto-Herstellung und die Vorbereitung zur Stereokartierung nur noch mit etwa einem Drittel zur Wirkung, was das Gesamtzeitverhältnis zwischen Stereokartierung und Hochzeichnung auf ca. 2 : 1 brächte.

Objekt- beispiel	Gesamtzeit für Stereokartierung GSTK (h)	Gesamtzeit für Hochzeichnung GHZ (h)	Zeitverhältnis GSTK : GHZ
A	5,3	5,8	0,9
B	7,8	5,8	1,3
C	5,0	4,0	1,3
D	4,2	6,3	0,7
E	15,0	7,2	2,7
F	6,3	6,1	1,0
G	3,3	2,2	1,5
Mittel	6,7	5,3	1,3

Tab. 10/6 Gesamtauswertezeiten für Stereokartierung und Hochzeichnung einschließlich aller Peripheriezeiten und Orthoprojektionszeiten, Zeitverhältnisse (GSTK:GHZ) zwischen den Verfahren, Objektbeispiele aus Tab. 10/4

Werden die Kartierungen als Bleistiftzeichnung ausgeführt, so wird in der Regel eine graphische Überarbeitung in Tusche oder durch Gravur notwendig. Diese Reinzeichnung kann unter Umständen ebensoviel Zeit in Anspruch nehmen wie die Grundkartierung selbst. In diesem Fall würde sich der Zeitvorteil der Hochzeichnungstechnik gegenüber der Stereokartierung in Bezug auf den gesamten Bearbeitungsprozeß beträchtlich reduzieren.

Bei den beschriebenen Versuchen (Tab. 10/4) wurden die Stereokartierungen am Internzeichentisch des Zeiss Planimat (im Modellmaßstab) ausgeführt, während in der Praxis meist an externen Zeichentischen und in einem größeren Maßstab kartiert wird. Um diesen Unterschied bei den Berechnungen berücksichtigen zu können, wurden Vergleichsauswertungen am In- und Externzeichentisch vorgenommen, die im folgenden erläutert werden sollen.

Durch die Drehmelder-Ankopplung zwischen Planimat und Zeichentisch EZ 4 und eine Maßstabsvergrößerung von 2:1 ergab sich durch die erschwerete Handradbewegung ein Zeitverlust von etwa 10 %. Bei Verwendung des digital gesteuerten Zeichentisches Zeiss DZ 5 mußte bei völlig kräftefreier Übertragung ein zusätzlicher Zeitaufwand von ca. 25 % gegenüber der Kartierung auf dem Internzeichentisch festgestellt werden. Der Zeitunterschied ist auf die schwierige Kommunikation zwischen Auswerter und Zeichnung (vor allem bei der Kontrolle der Vollständigkeit in der Kartierung) zurückzuführen. Der Mehraufwand an Zeit ist abhängig von der darzustellenden Detailfülle, von der Anordnung (eventuell Symmetrie) der Objektstrukturen sowie von der Systematik des Vorgehens bei der Auswertung. Er kann daher nur abgeschätzt werden. Für die Auswertungen von Tab. 10/4 sollte (weil in der Praxis vorwiegend mit Externzeichentisch und elektrischer Drehmelder-Ankopplung gearbeitet wird) ein Zuschlag von etwa 30 - 35 % an den Gerätekartierzeiten angebracht werden. Dadurch würde sich das Verhältnis von Stereokartierung zu Hochzeichnung auf etwa 2,5 : 1 erhöhen.

Ähnliche Untersuchungen zum Zeitverhältnis zwischen Stereokartierung und Orthophoto-Hochzeichnung wurden (allerdings in größerem Umfang) im topographischen Anwendungsbereich von der Kommission D der OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales) durchgeführt (BECK /5/). An den Untersuchungen waren mehrere Institute beteiligt. Als Zeitverhältnis zwischen Stereokartierung und Orthophoto-Hochzeichnung (im Maßstab 1:10 000) ergab sich im Durchschnitt etwa 3,5 : 1, wobei die Orthophoto-Herstellungzeit (Abtast- bzw. Projektionszeit, Peripheriezeit) bereits berücksichtigt ist. Dem Zeitvorteil für das Hochzeichnungsverfahren steht allerdings ein Defizit an Vollständigkeit (von 7 % bei Gebäuden) gegenüber. Am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, das sich ebenfalls an der Versuchsreihe beteiligt hatte (SEEGER /119/), wurde dagegen die Orthophoto-Hochzeichnung mit Hilfe eines Stereoskops überprüft, wodurch die gleiche Detailfülle in der Darstellung wie bei der Stereokartierung erlangt werden konnte. Dieser für die Vervollständigung des Kartenbildes notwendige Mehraufwand reduzierte jedoch den Zeitvorteil der Orthophoto-Hochzeichnung gegenüber der Stereokartierung auf etwa 2 : 1.

Insgesamt liegen die Ergebnisse dieser OEEPE-Untersuchung für topographische Auswertungen und die im Rahmen der vorliegenden Arbeit an Architektur-Beispielen gewonnenen Werte in der gleichen Größenordnung. Je nach darzustellender Detailfülle ist das Verfahren der Orthophoto-Hochzeichnung bis etwa um den Faktor 3 schneller als eine entsprechende Stereokartierung gleicher Vollständigkeit.

Die bisherigen Untersuchungen dieses Abschnitts bezogen sich auf die Herstellung von Strichkarten. In vielen Fällen ist jedoch eine Halbtondarstellung bzw. die Produktion von Bildplänen vom Auftraggeber erwünscht. Im Halbtonverarbeitungsprozeß kommen zur eigentlichen Entzerrung oder Orthoprojektion noch (wie in Abschnitt 7.3.1 dargelegt) eine Retusche sowie Mosaik- und Reproduktionsarbeiten hinzu. Der Zeitaufwand für diese Tätigkeiten läßt sich nur sehr ungenau abschätzen (insgesamt etwa 1 - 3 Stunden), weshalb für die Herstellung von Architektur-Bildplänen keine zuverlässigen Zeitangaben möglich sind.

Vor allem kann wegen der nicht definierbaren Detailfülle kein Vergleich zu Strichdarstellungen gezogen werden. In der topographischen Praxis dagegen, wo die Darstellungsdichte durch Vorschriften weitgehend festgelegt ist, beträgt die Herstellungszeit einer Photokarte im Maßstab 1:10 000 nur etwa 5 - 10 % von der für eine entsprechende Stereokartierung aufzubringenden Arbeitszeit (BECK /5, S. 63/). Ähnliche Verhältnisse dürften nach den bisherigen Erfahrungen im Durchschnitt auch in der Architekturphotogrammetrie gültig sein. Zum Beispiel wurden für die Orthophotoherstellung des Straßburger Portals nur 2,5 % der Zeit benötigt, die für die entsprechende Stereokartierung aufgewendet worden war (siehe Abb. 12/1).

11. Anwendungsbereiche und Grenzen von Differential- entzerrung und Halbtondarstellung

Bei der Bearbeitung der in Abschnitt 8 (Tab. 8/1) aufgeführten Beispiele zeigte sich eine unterschiedliche Eignung der einzelnen Objekte für den Prozeß der orthophotographischen Umbildung. Die Grenzen des Verfahrens liegen zum einen bei der Differentialentzerrung selbst, wenn die Objektgestalt durch Vorsprünge und Unstetigkeiten eine kontinuierliche Umbildung unmöglich macht bzw. Lagefehler und Konturensprünge im Orthophoto verursacht. Zum anderen ist die photographische Darstellung räumlich abgestufter Objektteile (z.B. an der Fassade einer gotischen Kathedrale) im Halbtonplan bei gleichförmiger Wiedergabe der einzelnen Details, d.h. ohne Betonung und Hervorhebung besonders unvorteilhaft. In solchen Fällen ist die Strichkartierung der Halbtondarstellung vorzuziehen.

Es stellt sich also bei einer bevorstehenden Bauaufnahme die Frage, welche Art der Darstellung und, damit verbunden, welche Verarbeitungstechnik gewählt werden soll. Der Entscheidungsprozeß darüber wird von zwei Faktoren beeinflusst. Das erste Kriterium ist die gewünschte, eventuell bereits geplante oder sogar vorgeschriebene Darstellungsform. In Betracht kommen hierbei eine reine Halbtondarstellung (Bildplan), eine reine Strichkarte oder eine kombinierte Strich-Halbton-Karte.

Der zweite Faktor bei der Entscheidung ist die Möglichkeit der geräte- und verfahrenstechnischen Realisierung des jeweils geplanten Vorhabens (Personal, Kosten, Geräteeinsatz, Gerätebereiche). Eine wesentliche Rolle spielt dabei die aus dem Verarbeitungsprozeß zu erwartende geometrische und optische Qualität bzw. Genauigkeit des Ergebnisses. Das bedeutet konkret, daß eine geplante Halbtondarstellung unter Umständen nicht in zufriedenstellender Weise verwirklicht werden kann, wenn auf Grund der Objektstruktur (z.B. durch Diskontinuitäten wie Vorsprünge, Verdeckungen usw.) die Auswirkungen von Abtast- und Verfahrensfehlern sowie von Bewegungsunschärfen (Abschnitt 6.1 bis 6.3) bei der Differentialentzerrung die Homogenität der Bildaussage im Orthophoto störend beeinträchtigen.

Zur Verdeutlichung der Entscheidungsphasen im Verarbeitungsprozeß sind in Abb. 11/1 in einem Flußdiagramm einige mögliche Wege zur Herstellung von Bildplänen und Strichkarten angegeben, die in den folgenden Abschnitten (11.1 bis 11.3) erläutert werden sollen (vgl. auch die Abbildungen 2/1 und 7/12).

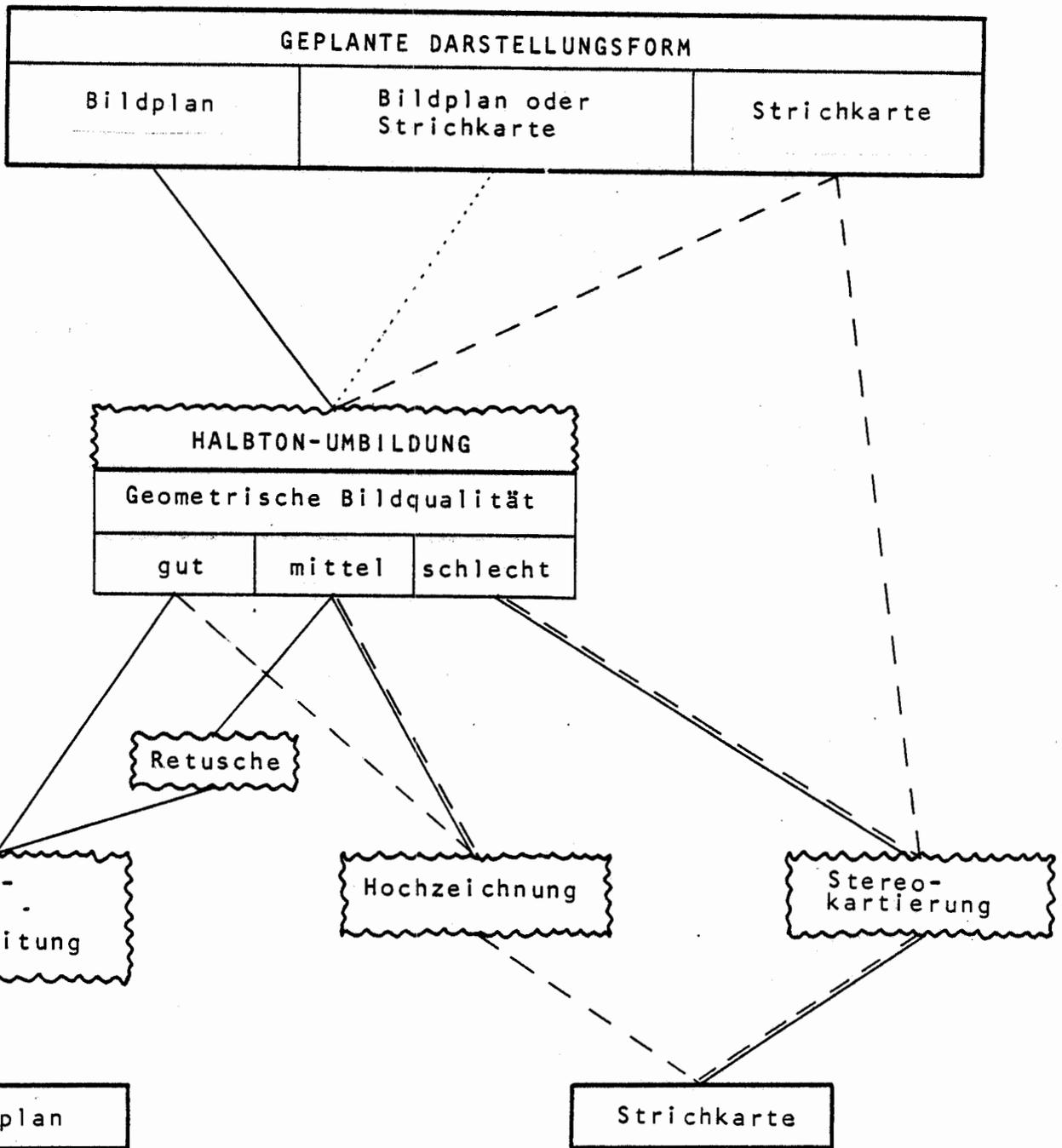


Abb. 11/1 Möglichkeiten der Darstellung und Verarbeitung von Architekturaufnahmen in Abhängigkeit von der geplanten Darstellungsform sowie vom (zu erwartenden oder bereits vorliegenden) qualitativen Ergebnis einer Halbtonumbildung (Entzerrung, Differentialentzerrung, allgemeine Umbildung)

11.1 Die Herstellung und Verwendung von Architektur-Bildplänen

In Abschnitt 2.4.1 wurde auf die zunehmende Tendenz zur Verwendung von Halbtonbildern im topographisch-kartographischen Bereich sowie in der Architekturvermessung hingewiesen. Als Gründe wurden vor allem

- die vollständige Wiedergabe des gesamten Detailreichtums ohne Vorweginterpretation, Selektion oder Generalisierung,
- die Darstellung des Objektzustandes und
- die Möglichkeit zur Farbwiedergabe bei photographischer Verarbeitung

genannt. Als Vorteil gegenüber einer entsprechenden Stereokartierung kommt die kurze Herstellungszeit von Bildplänen (Abschnitt 10) hinzu. Außerdem konnte in Abschnitt 9 an Beispielen gezeigt werden, daß die Genauigkeit von Bildplänen bei geeigneter Bearbeitungsweise der Genauigkeit von Strichkartierungen gleichkommt.

Ist auf Grund der angesprochenen Vorteile eine Halbtondarstellung des architektonischen Objekts geplant, so kann die Umbildung nach den in Abschnitt 2.4.3 angegebenen Kriterien (in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen am Objekt und bei der Aufnahme) als einfache Bildvergrößerung, als Entzerrung, Differentialentzerrung oder als allgemeine Projektion (Abschnitt 7.1) erfolgen. Für die Anwendung der Orthoprojektion wird bei den hier folgenden Betrachtungen davon ausgegangen, daß (nach den Abschnitten 6 und 8) geeignete Gerätesysteme zur Verfügung stehen, und daß die in Abschnitt 6 erarbeiteten Vorschläge zum Ablauf der Differentialentzerrung berücksichtigt werden.

Nach Abb. 11/1 entscheidet sich die Art der Weiterverarbeitung nach dem Ergebnis der Halbtonumbildung, wobei die geometrische und optische Bildqualität im Vordergrund stehen. Bei der Beurteilung des Halbtonbildes geht es vor allem um das Vorhandensein von

- radialen Reliefversetzungen als Restfehler von Entzerrung oder Differentialentzerrung
- Diskontinuitäten wie Doppelabbildungen und Abbildungsverlust sowie Konturensprünge als Folge des Verfahrensfehlers
- Lageversetzungen durch Höhenabtaffehler
- Bewegungsunschärfen wegen Bildwanderung bei der Orthoprojektion.

Da in dieser sehr allgemeinen Betrachtung keine quantitativen Angaben (z.B. Fehlergrenzen) angebracht sind, soll die "Qualität" des Halbtonbildes lediglich nach den Kriterien "gut, mittel oder schlecht" beurteilt werden.

Bei guter und mittlerer Bildqualität kann nach der optischen Umbildung die photographische Weiterverarbeitung zum Bildplan bzw. zur Photokarte erfolgen (Abb. 11/1). Kleine Unregelmäßigkeiten im Bildinhalt werden dabei in der Regel durch Retusche korrigiert. Treten dagegen nach der Umbildung größere Versetzungen bzw. Unschärfen im Halbtonbild auf, die weder retuschierbar sind noch vom Benutzer toleriert werden können, so muß generell zur Stereo-

kartierung, d.h. zur Strichdarstellung übergegangen werden. Mit einiger Erfahrung läßt sich diese Entscheidung jedoch mit Sicherheit bereits zu Beginn des Auswerteprozesses treffen, so daß der Versuch einer Halbtonumbildung von vornherein unterbleiben kann.

Im folgenden soll versucht werden, diejenigen architektonischen Objekte und Objektteile aufzuzählen, bei denen eine Halbtondarstellung sinnvoll bzw. die differentielle Umbildung voraussichtlich auch zufriedenstellend ist. Dabei gestatten die im Rahmen dieser Arbeit an den unterschiedlichsten Objekten durchgeführten Versuche zur Orthoprojektion sowie die dabei gesammelten Erfahrungen eine Extrapolation auf weitere Anwendungsfälle im Bereich der Architektur. Die Diskussion der Objektgruppen erfolgt getrennt für kleinmaßstäbige und großmaßstäbige Architektur-Bildpläne.

Kleinmaßstäbige Architektur-Bildpläne

Entzerrte, differentiell entzerrte oder allgemein umprojizierte Halbtonbilder bzw. daraus zusammengesetzte Bildmontagen in den Maßstäben zwischen etwa 1:25 und 1:250 (evtl. auch kleiner) werden hier als kleinmaßstäbige Architektur-Bildpläne bezeichnet. Für diesen Maßstabsbereich, der sich meist auf ganze Bauwerke oder große Teilflächen bezieht, sind in Tab. 11/2 einige mögliche Anwendungsobjekte zusammengestellt.

Wie in Tabelle 11/2 aufgeführt ist, dienen kleinmaßstäbige Architektur-Bildpläne zur Darstellung von Fassaden und Gebäude-Ansichtsflächen sowie zur Wiedergabe von Kuppeln und Gewölben. Je gleichmäßiger der jeweilige Flächenverlauf ist, desto günstiger sind die Voraussetzungen für eine klaffenfreie Differentialentzerrung und damit für eine befriedigende Halbtondarstellung. Starke Reliefsprünge am Objekt können, wenn sie großflächig auftreten, aus dem Umbildungsprozeß herausgelassen werden. Die (differentielle) Entzerrung erfolgt in diesem Fall in Teilflächen. Die einzelnen Halbtonbilder werden anschließend zum Bildplan montiert. Unterschiedlich und unregelmäßig gegliederte Objektzonen (z.B. Figuren und Strebebögen an den Außenfronten gotischer Kathedralen) sollten dagegen nicht photographisch umgebildet werden, weil sie weder ein ausreichendes Differentialentzerrungsergebnis noch (wegen Verwitterung und Verrußung) eine markante Halbtondarstellung ergeben (Abschnitt 11.3, Abb. 11/10).

Demgegenüber ist die in Abb. 11/3 gezeigte Hauptkuppel der Schah-Moschee in Isfahan/Persien ein treffendes Beispiel für eine wegen des größtenteils stetigen Verlaufs vorteilhaft (d.h. ohne größere Einflüsse von Abtast- und Verfahrensfehlern) umzubildende Objekt-oberfläche. Die Kuppel hat die Form einer "Hufeisenzwiebel" mit kegelförmiger Spitze und ruht auf einem Kreiszyylinder ("Trommel, Tambour"). Als Umbilverfahren könnte für die Trommel eine photographische Abwicklung (Abschnitt 7.1), für die Zwiebel eine Kegelprojektion vorgeschlagen werden. Die Umbildung müßte in beiden Fällen an einem digital steuerbaren Differentialentzerrungsgerät (z.B. Wild Avioptan OR 1, Abb. 8/6) vorgenommen werden. Natürlich ist auch mit jedem anderen Gerät eine gewöhnliche Orthogonalprojektion der Kuppelflächen möglich. Gerade das mit Ranken und Arabesken reichlich ausgestattete Mosaikdekor ist für Halbtondarstellungen (evtl. auch für Farbdarstellungen) in besonderer Weise geeignet. Eine entsprechende Stereokartierung käme wegen des hohen Detailreichtums aus Gründen des Zeitaufwandes wohl kaum in Frage.

Objektgruppen	Bauwerke	Bauwerkselemente	Beispiele, Abbildungen
Kirchen, Moscheen	Romanische Basiliken, Byzantinische Kirchen, Islamische Moscheen, Renaissance-Kirchen, Barock-Kirchen	Apsiden, Mauerwerk, Steinmuster, Gewölbe Kuppeln (außen), Decken Kuppeln, Gewölbe, Stuckdecken, evtl. Fassaden	C/2 11/3 B/9, C/5 A/5, C/1
Repräsentationsgebäude, Schlösser, Paläste	Römische und Klassizistische Triumphbögen, Monumente Renaissance-Paläste, Barock-Schlösser, Rokoko-Schlösser	Ansichtsflächen Ansichtsflächen Wandornamentik in Vertikalschnitten, Decken, Gewölbe, evtl. Fassaden	 A/4 B/10 C/6, C/7
Amtsgebäude, Bürgerhäuser	Rathäuser, Bemalte Gebäude (18. Jh.), Fachwerkhäuser	Fassaden Fassaden	B/2 B/1
Sonstige Objekte	Befestigungsanlagen, Alte Ortskerne	Wälle, Mauern, Türme Dachlandschaften	A/1, B/3 B/12

Tab. 11/2 Objektbeispiele für die Halbtondarstellung in kleinmaßstäbigen Architektur-Bildplänen

(Maßstab $\leq 1:25$), Abbildungen A bis C im Anhang (Tab. 8/1)

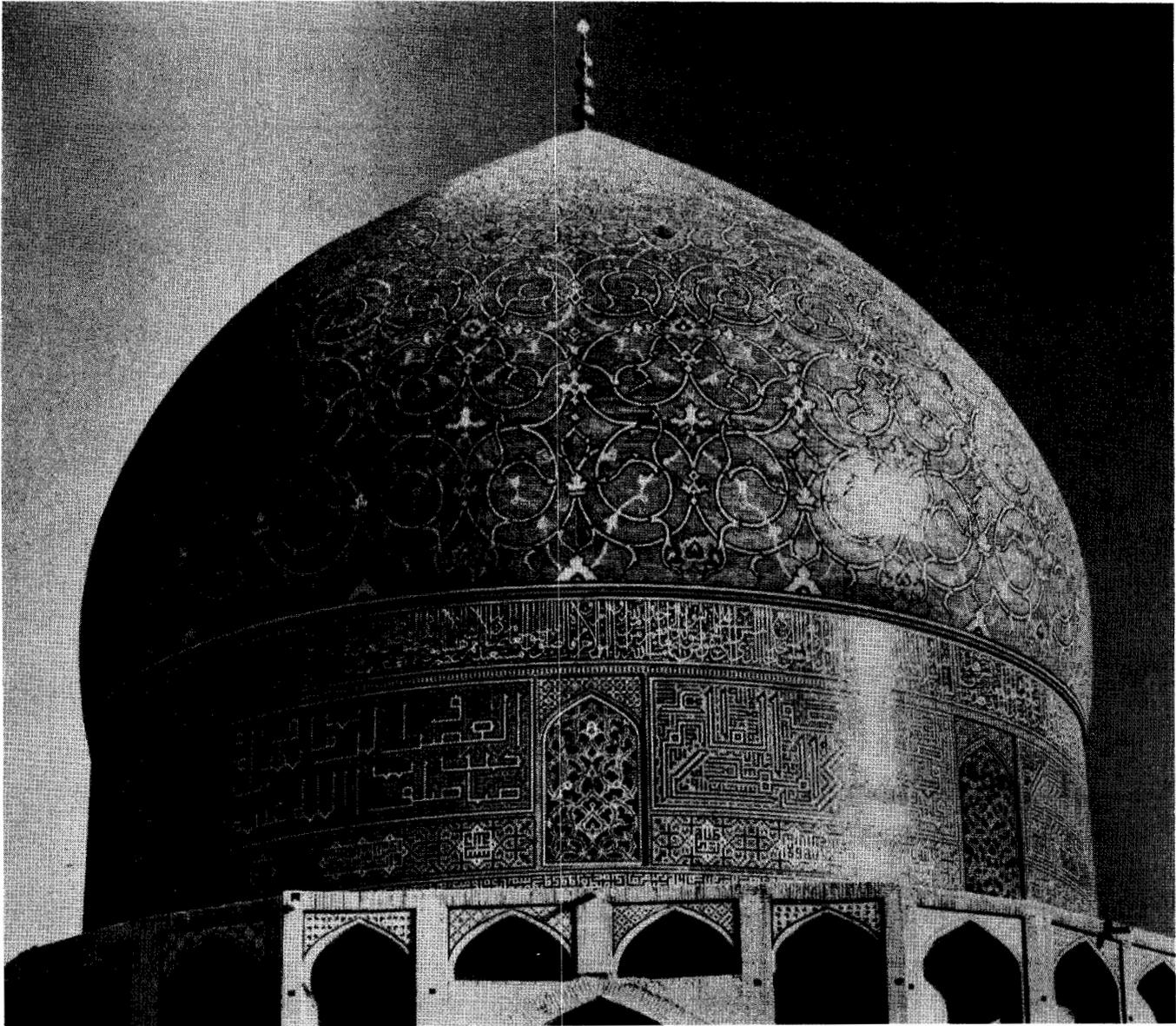


Abb. 11/3 Beispiel einer für Differentialentzerrung und kleinmaßstäbige Halbtondarstellung besonders geeigneten Objektoberfläche;
Objekt: Isfahan/Persien, Schah-Moschee, Hauptkuppel (Durchmesser 27 m) mit farbigem Mosaikdekor (1630 n. Chr); Zentralperspektive Wiedergabe (Original-Aufnahme)

Ein weiteres Anwendungsfeld für kleinmaßstäbige Bildpläne in der Architektur eröffnet sich durch die Orthogonalprojektion und Halbtondarstellung von Dachzonen (Abb. B/12 im Anhang, Orthophotomaßstab 1:1000). Die photographische Umbildung der "Dachlandschaft" erfolgt durch differentielle Entzerrung großmaßstäbiger Luftbilder (Maßstab etwa 1:1000 bis 1:5000). Bei der Profilabtastung im Stereoauswertegerät wird die Meßmarke ausschließlich auf den Dachflächen der einzelnen Gebäude entlanggeführt. Ein Stop-Mechanismus zum Überwinden von senkrechten Sprüngen und Absätzen ist hierbei unerlässlich. Der Halbttonplan von Dachzonen ist ein wertvolles Hilfsmittel für Strukturanalysen, bei Sanierungen und bei der Inventarisierung alter Ortskerne.

Großmaßstäbige Architektur-Bildpläne

Unter großmaßstäbigen Architektur-Bildplänen werden hier (differentiell) entzerrte oder allgemein umprojizierte Halbtonbilder bzw. Bildmontagen in den Maßstäben zwischen etwa 1:5 und 1:25 (evtl. auch größer) verstanden. Sie beziehen sich in der Regel auf Gebäudeteile oder kleinere Einzelobjekte. Eine Zusammenstellung möglicher Anwendungsfälle befindet sich in Tab. 11/4.

Objektgruppen	Objekte	Beispiele Abbildungen
Bauwerks- teile	Giebel, Friese, Reliefs	B/4
	Portale (Gewände, Archivolten, Tympana)	B/5
	Rosetten, Fenster, Gitter	7/4 (b)
	Säulen, Emporen, Balkone	C/3
	Chorgestühle, Orgelprospekte	A/6, C/3
	Kasettendecken, Fußböden	A/11
Einzel- Objekte	Reliefs, Grabstelen, Sarkophage verzierte Säulen (Banddekor), Statuen, Figuren	11/5
	<u>Archäologie</u> : Vasen, Figuren, Schiffsrümpfe	B/11
Dekor und Ornamentik an Oberflächen	Fresken	A/8, B/7, B/8
	Mosaiken	11/6
	Stuckierungen	A/5, C/1
	Schnitzereien	B/10

Tab. 11/4 Objektbeispiele für die Halbtondarstellung in großmaßstäbigen Architektur-Bildplänen (Maßstab $\geq 1:25$), Abbildungen A bis C im Anhang (Tab. 8/1)

Die differentielle Entzerrung ist im großmaßstäbigen Bereich den gleichen geometrischen Beschränkungen unterworfen wie bei kleinmaßstäbigen Darstellungen. So hängen auch hier die bildhafte Homogenität und die Genauigkeit im Orthophoto von der Gleichmäßigkeit des Oberflächenverlaufs ab.

Ist die Objektbezugsfläche weitgehend eben, dann kann bei Verwendung einer langbrennweitigen Aufnahmekammer unter Umständen eine ganzflächige Entzerrung ausreichend sein. Als Beispiel für ein Einzelobjekt dieser Art ist in Abb. 11/5 eine ionische Grabstele wiedergegeben. Der gezeigte Ausschnitt des Marmorreliefs hat eine Größe von $0,9 \times 1,6 \text{ m}^2$. Der maximale Vorsprung von der Bezugsfläche beträgt etwa 10 cm. Bei der Aufnahme mit einer schmalwinkligen Kammer (z.B. Wild P 31/200, $f = 20 \text{ cm}$, nutzbares Bildformat $8,3 \times 11,6 \text{ cm}^2$) ergeben sich mit einem Radialabstand von 0,8 m und einer Aufnahmeentfernung von 4,0 m Reliefversetzungen



Abb. 11/5 Objektbeispiel für ganzflächige Entzerrung,
Objekt: Rhodos/Griechenland, Grabstele der Krito
und Timariste, Marmorrelief (400 v. Chr.),
Zentralperspektive Wiedergabe (Original-Aufnahme)

von maximal 2 cm am Objekt, die bei der ganzflächigen Entzerrung erhalten bleiben. Ob diese Lagefehler in der Praxis toleriert werden können, hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung bzw. von der Verwendung des Bildplans ab.

In Abb. 11/6 wird ein Beispiel für eine Objektoberfläche gegeben, die für Differentialentzerrung und großmaßstäbige Halbton-Darstellung geradezu prädestiniert ist. Die Abbildung zeigt ein Deckenmosaik der Sultan Hussein-Medresse in Isfahan. Gerade bei derartig hohem Detailreichtum im Mosaikdekor können Halbtonverfahren sinnvoll eingesetzt werden. Ebenso wie im Beispiel der Abb. 11/3 stünde hier eine Stereokartierung für die detaillierte Mosaikwiedergabe wegen des hohen Zeitaufwandes nicht zur Diskussion.

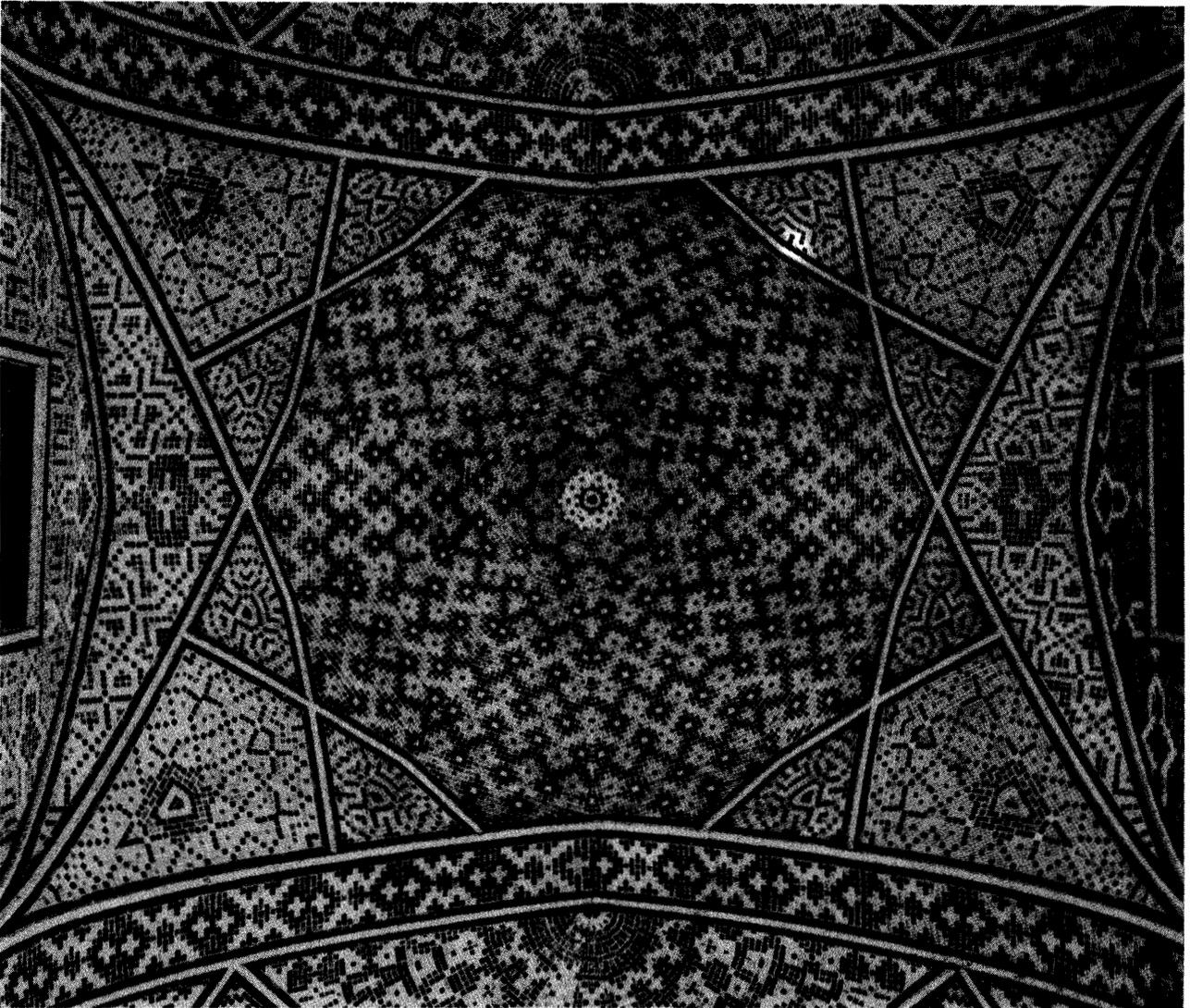


Abb. 11/6 Beispiel einer für Differentialentzerrung und großmaßstäbige Halbtondarstellung besonders geeigneten Objekt-oberfläche;
Objekt: Isfahan/Persien, Medresse des Sultan Hussein, Flachbogige Kuppel (ca. 5 x 5 m²) mit geometrischem Mosaikdekor (1720 n. Chr.);
Zentralperspektive Wiedergabe (Original-Aufnahme)

Durch die schwache Krümmung der flachbogigen Kuppel ist eine weitgehend homogene Bildwiedergabe bei der Orthoprojektion möglich. Die Anwendung der differentiellen Entzerrung zur Herstellung von Architektur-Bildplänen wäre also bei diesem Objekt, das lediglich als Beispiel dienen soll, in idealer Weise gegeben.

11.2 Der Einsatz von Hochzeichnungstechniken

Für die Hochzeichnung entzerrter bzw. differentiell entzerrter Halbtonbilder gibt es nach dem in Abb. 11/1 aufgezeichneten Flußdiagramm zwei Motivationen. Die eine geht von der geplanten Darstellungsform "Strichkarte", die andere von der vorgesehenen Bildplanherstellung aus.

Wie in den Abschnitten 2.4.2, 7.3.2 und 10.2 gezeigt wurde, ist die Hochzeichnungstechnik ein gegenüber der konventionellen Stereokartierung in den meisten Fällen praktikables und zeitsparendes Arbeitsverfahren zur Herstellung von Strichkarten. Der in Abb. 11/1 demonstrierte Umweg über die Halbton-Umbildung zahlt sich dann aus, wenn das Ergebnis (d.h. die optische und geometrische Bildqualität) nach der Umbildung zufriedenstellend ist. Bei größeren Unregelmäßigkeiten im Bildinhalt (bei ganzflächiger Entzerrung durch Reliefversetzung, bei Differentialentzerrung durch Abtast- und Verfahrensfehler sowie Bildwanderung verursacht), die auch beim Hochzeichnen nicht ausgeglichen bzw. verbessert werden können, muß (eventuell auch nur partiell) zum Verfahren der Stereokartierung übergegangen werden.

Die zweite Motivation für eine Hochzeichnung ist gegeben, wenn - obwohl eine Halbtondarstellung in Form eines Bildplans vorgesehen ist - das Ergebnis der Umbildung aus den oben genannten Gründen trotz umfangreicher Retuschierarbeiten eine Weiterverarbeitung zum Bildplan nicht gestattet. Hier kann die Hochzeichnung und damit die Strichdarstellung als Ausweg betrachtet werden, falls nicht gleich zur Stereokartierung übergegangen wird.

Das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten für die Hochzeichnung beinhaltet alle Objektgruppen, bei denen eine qualitativ zufriedenstellende Halbtonumbildung möglich ist (Tabellen 11/2 und 11/4, Abbildungen 7/4 und 7/5). Diese Reihe wird erweitert, wenn die graphische Ausgleichung von Diskontinuitäten im Umbildungsergebnis durch Hochzeichnung in Betracht gezogen wird. Zum Beispiel sind differentiell entzerrte Aufnahmen von Kapitellen, plastischen Figuren (Putten) oder geschwungenen Eisengittern (Geländer, Balkongitter) trotz einiger Konturversetzungen zum Hochzeichnen geeignet, was an Hand von Abb. 11/7 erläutert werden soll.

Die Abbildung zeigt ein korinthisches Kapitell der Thymele von Epidauros/Griechenland in Originalaufnahme. Nach den bisherigen Erfahrungen mit der Differentialentzerrung architektonischer Objekte würde ein Orthophoto dieses Kapitells auf Grund der Reliefsprünge und Überhänge im Bereich der Akanthus-Blätter und Voluten als Folge von Abtast- und Verfahrensfehlern erhebliche Diskontinuitäten aufweisen. Diese bildhaften Fehler (vor allem Konturensprünge an den Streifenrändern) könnten jedoch bei der Hochzeichnung ausgeglichen bzw. eliminiert werden.



Abb. 11/7 Objektbeispiel für Differentialentzerrung und anschließende Hochzeichnung;
Objekt: Epidauros/Griechenland, korinthisches Kapitell der Thymele (Rundtempel) im Heiligtum des Asklepios (ca. 320 v. Chr.);
Zentralperspektive Wiedergabe (Originalaufnahme)

11.3 Die Stereokartierung

Für den Einsatz des Stereokartierverfahrens in der Architekturphotogrammetrie gibt es nach den Erfahrungen dieser Arbeit drei Motive (siehe auch Abb. 11/1):

1. Die darzustellende Objektfläche weist nur eine geringe Detailfülle auf (z.B. Mauern aus regelmäßigen Steinquadern, dorische Kapitelle usw.). In diesen Fällen ist die Stereokartierung (evtl. neben der Handvermessung) das einfachste und schnellste Verfahren.
2. Für die Objektwiedergabe ist bisweilen eine Strichdarstellung vorgesehen bzw. sogar vorgeschrieben. Bei großer Detailfülle am Objekt (z.B. barocke Deckenfresken, Abb. B/9 im Anhang, Steinfiguren an einem gotischen Gewändeportal, Abb. 2/7) würde sich eine Halbtonumbildung mit anschließender Detailhochzeichnung besonders für diese Aufgabe eignen. Falls jedoch aus organisatorischen Gründen keine Möglichkeit zur Halbtonumbildung (Entzerrung, Differentialentzerrung oder allgemeine Projektion) gegeben ist, so muß auf die Stereokartierung zurückgegriffen werden.

3. Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, erweist sich die konventionelle Stereokartierung in vielen Fällen auch als der letzte Ausweg nach gescheiterten Versuchen der Bildplan-Herstellung oder Halbton-Umbildung mit anschließender Hochzeichnung. Es muß jedoch hier noch einmal betont werden, daß diese Entscheidung bei entsprechender Erfahrung mit der Differentialentzerrung von Architekturaufnahmen in der Regel bereits zu Beginn des Auswerteverfahrens oder sogar noch vor der photogrammetrischen Aufnahme getroffen werden kann.

In Anlehnung an die Punkte 1. und 3. dieser Argumentation lassen sich eine Reihe von Bauwerken und Bauwerksteilen angeben, für deren Darstellung in Plänen praktisch nur die Stereokartierung in Frage kommt. Einige dieser Objekte sind in Tab. 11/8 aufgeführt.

Bauwerke	Bauwerkselemente	Beispiele, Abb.
Tempel, Säulenhallen (griechisch, römisch, klassi- zistisch)	Ansichtsflächen	11/9
Gotische Kathedralen	Außenfassaden als Ganzes Innenräume als Ganzes, Kreuzgewölbe, Fächergewölbe, Strebpfeiler, Strebebögen, Fialen, Altäre, Kanzeln	11/10
Barock- kirchen	Innenräume als Ganzes Altäre, Kanzeln	11/11

Tab. 11/8 Objektbeispiele für die vorzugsweise Anwendung des Stereokartierverfahrens

Nach Tabelle 11/8 sind Innen- und Außen-Gesamtansichten von gotischen Kathedralen, Innenräume barocker Kirchen sowie tempelartige Bauwerke und Säulenpartien auf Grund der räumlichen Objektanordnung (Überlagerung, Verschneidung, Verdeckung) nicht für eine Differentialentzerrung geeignet. Während gerade für die Darstellung der reichhaltig verzierten Wandflächen in Barockkirchen ein derartiges Verfahren von großem Nutzen wäre, kann zum Beispiel bei der Bauaufnahme antiker Tempel auf eine Halbtonumbildung ohne weiteres verzichtet werden. Diese Objekte weisen meist geradlinige, in vielen Fällen sogar streng vertikal oder horizontal verlaufende (also bei entsprechender Aufnahme auch zum Koordinatensystem des Auswertegerätes parallele) Kanten und Strukturen auf, so daß (nach Tab. 2/2 und Abschnitt 10.2) eine Stereokartierung in kurzer Zeit angefertigt werden kann.

Am Beispiel des Schiefen Turmes von Pisa/Italien (Abb. 11/9) sollen die bei der differentiellen Entzerrung von räumlich versetzten und stark gegliederten Objekten auftretenden Diskontinuitäten wie Konturensprünge, Mehrfachabbildungen und Bewegungsunschärfen demonstriert werden. Die Orthoprojektion erfolgte bei diesem Beispiel in Ermangelung anderer Geräte allerdings unter besonders ungünstigen Voraussetzungen:

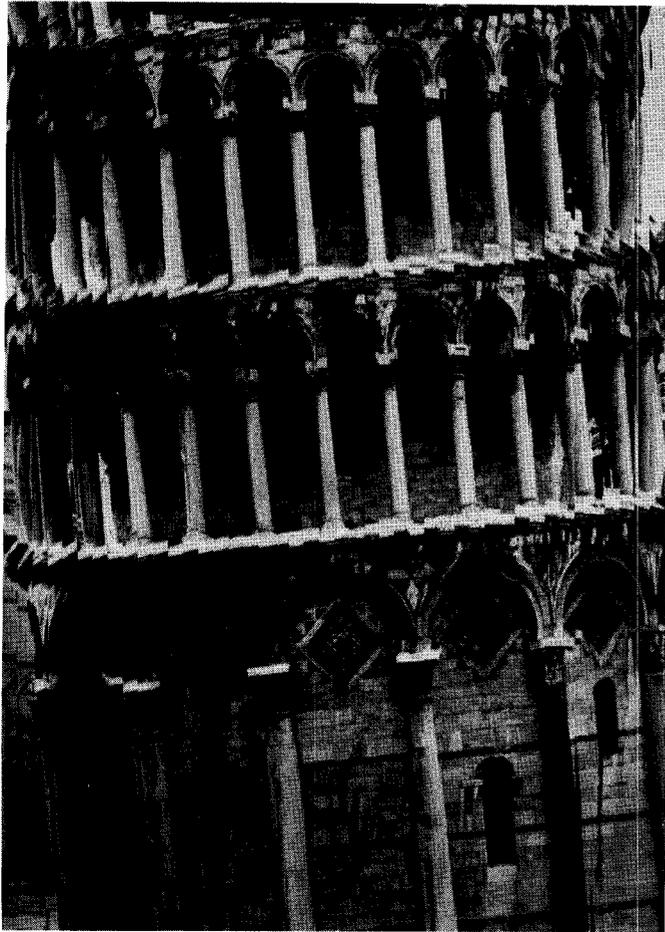
1. Der Orthophotomaßstab betrug wegen der großen Aufnahmeentfernung (etwa 35 m) nur 1:175, was bei vorgegebener Streifenbreite und Blendenbreite eine starke Auswirkung von Verfahrensfehlern (Abb. 11/9a) und Bewegungsunschärfen (Abb. 11/9b) zur Folge hatte.
2. Die kleinste verfügbare Spaltblende (=Streifenbreite) war 2 mm bei differentieller Entzerrung 0. Ordnung (horizontale Projektionsfläche).
3. Die Blendenbreite in Profilrichtung betrug $t = 1$ mm.
4. Die Modellabtastung im Stereoauswertegerät erfolgte bei einer festen Geschwindigkeit von 2,5 mm/sec.
5. Eine "Aufrichtung" des Turmes im Auswertegerät zur Parallelstellung von Objektstruktur (Säulen) und Streifenverlauf war nicht möglich, weil der für eine κ -Korrektur von etwa 60° notwendige β "-Bereich am Zeiss Planimat nicht ausreichte.

In Abb. 11/9a ist ein Orthophoto dargestellt, das senkrecht zur Aufnahmebasis (parallel y) abgetastet wurde. Da die Nachführung der Meßmarke auf einem gedachten Säulenmantel erfolgte, sind die Säulen weitgehend lagerichtig, die dahinter liegenden Mauerbereiche aber versetzt wiedergegeben. An den Rändern des Turmes werden starke Konturensprünge und Doppelabbildungen sichtbar, die auf Verfahrensfehler zurückzuführen sind.

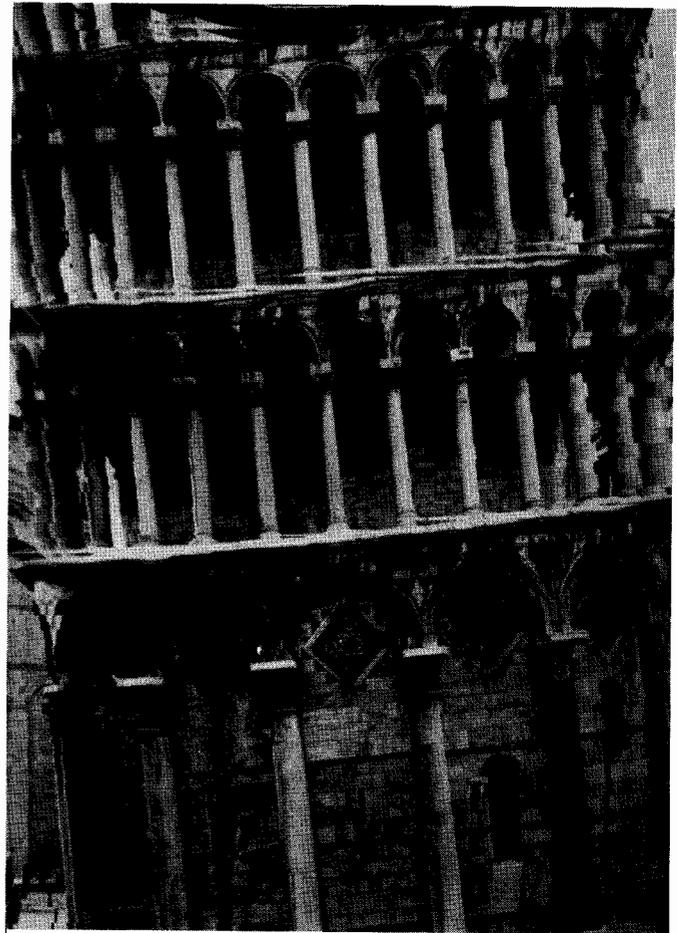
Bei dem in x -Richtung abgetasteten Orthophoto (Abb. 11/9b) ist die Mauerzone ebenfalls fehlerhaft abgebildet. An den Seiten des Bauwerks treten störende Bewegungsunschärfen sowie Einflüsse von Abtastfehlern auf.

Durch Vorvergrößerung der Aufnahmen hätte ein entsprechend größerer Orthophotomaßstab (etwa 1/70) erhalten werden können, was in Verbindung mit einer zusätzlichen Verfeinerung des Entzerrungsprozesses (Δx bzw. $\Delta y < 2$ mm, $t < 1$ mm, differentielle Entzerrung 1. Ordnung) ein besseres Ergebnis gebracht hätte. In keinem Fall aber wäre eine gleichzeitige Umbildung von Mauerwerk und Säulengürtel möglich gewesen.

Wie bereits in Tab. 11/8 angegeben wurde, sind Gesamt-Innenansichten und -Außenfassaden gotischer Kathedralen auf Grund der räumlichen Anordnung von Rund- und Bündelpfeilern, Gewölben, Emporen und Maßwerk sowie von Strebepfeilern, Strebebögen, Galerien, Gesimsen, Figuren und Fialen nicht für eine differentielle Entzerrung geeignet. Diese Aussage kann an Hand von Abb. 11/10 verdeutlicht werden. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der Südfassade der gotischen Kathedrale von Chartres/Frankreich. Durch die versetzte Anordnung und körperliche Hinterschneidung von Strebepfeilern, Strebebögen, Galerien und Dachpartien ist eine geschlossene Halbtonumbildung unmöglich. Außerdem erscheint eine Halbton-Darstellung bei völlig gleichmäßiger Wiedergabe der größtenteils verwitterten und verrußten Steinflächen an den Außenfassaden nicht sonderlich zweckmäßig.



(a)



(b)

Abb. 11/9 Beispiel für Lageversetzungen und Bewegungsunschärfen bei der Differentialentzerrung von stark gegliederten Oberflächen;
Objekt: Pisa/Italien, Schiefer Turm

(a) Orthophoto bei y - Abtastrichtung,
Streifenbreite $\Delta x = 2$ mm im Maßstab 1:175

(b) Orthophoto bei x - Abtastrichtung,
Streifenbreite $\Delta y = 2$ mm im Maßstab 1:175

In Abb. 11/11 ist in einer zentralperspektiven Aufnahme das Langhaus der spätbarocken Klosterkirche Ottobeuren dargestellt. Durch die Überlagerung von Säulen, Kapitellen und Gesimsen sowie durch die dekorative Ausstattung in mehreren Tiefenzonen kann auch hier kein befriedigendes Orthoprojektionsergebnis erwartet werden. Aber gerade bei derartig stark verzierten Objekten wäre eine photographische Verarbeitung von besonderem Nutzen.

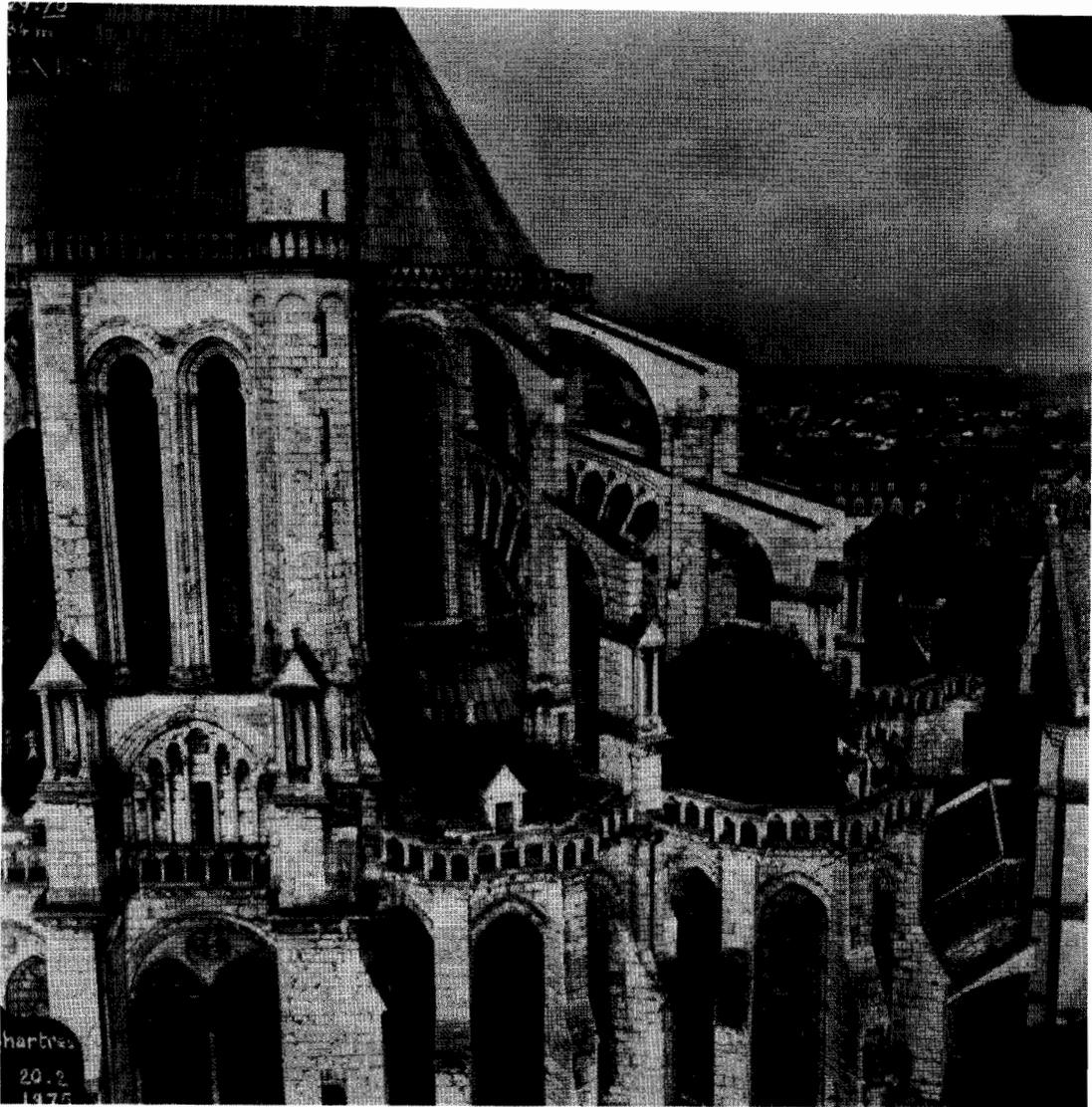


Abb. 11/10 Objektbeispiel für die ausschließliche Anwendung des Stereokartierverfahrens;
Objekt: Chartres/Frankreich, Kathedrale (ca. 1220 n. Chr.);
östlicher Teil der Südfassade in Höhe der Strebebögen;
Zentralperspektive Wiedergabe (Aufnahme mit einer Luftbildkammer Wild RC 8 aus Hubschrauber)

Aus den Abbildungen und Beispielen wird deutlich, daß sich gewisse Bauwerke als Gesamtobjekt nicht für eine differentielle Umbildung oder eine Halbtondarstellung eignen. Hier sollte von vornherein die Stereokartierung in Betracht gezogen werden. Wie die Tabellen 11/2 und 11/4 veranschaulichen, ist dagegen bei einzelnen Objektteilen oder Elementen dieser Bauwerke (Portale, Friese, Kuppeln) eine orthophotographische Verarbeitung möglich und aus Gründen der vollständigen Objektwiedergabe oder wegen der kurzen Bearbeitungszeit in vielen Fällen auch zweckmäßig. Gegebenenfalls erscheint eine Kombination von Strich- und Halbttonverfahren angebracht, die nicht nur als Kompromißlösung dient, sondern die auch, wie in Abschnitt 8 (Abbildungen C/3 bis C/7 im Anhang) gezeigt wurde, die Plastizität der graphischen Objektwiedergabe verstärkt.



Abb. 11/11 Objektbeispiel für die ausschließliche Anwendung des Stereokartierverfahrens;

Objekt: Ottobeuren, Klosterkirche
(ca. 1750 n. Chr.), Langhaus;
Zentralperspektive Wiedergabe
(Original-Aufnahme)

12. Zusammenfassung und abschließende Beurteilung

Die Bestandsaufnahme und graphische Dokumentation bauhistorisch wertvoller architektonischer Objekte ist eine wichtige kulturelle Aufgabe eines jeden Landes. Dazu kommt für Planungs- und Restaurierungsarbeiten die Notwendigkeit der Erstellung maßstäblicher Pläne und Unterlagen. Von Seiten der Architekten und Kunsthistoriker wird hierbei eine "sinnvoll ausführliche" Objektwiedergabe gefordert. Das bedeutet eine hohe Darstellungsdichte bei wirtschaftlicher Produktion.

DARSTELLUNGSFORM

Architektonische Objekte können in Strich- oder Halbtonplänen dargestellt werden. Die Entscheidung über die Verarbeitungstechnik hängt primär von den Wünschen des Auftraggebers, aber auch von Kriterien der Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Methoden ab. Für die Produktion von Bildplänen sprechen vor allem die vollständige Detailwiedergabe und die schnelle Herstellung. Weitere Vorteile der Halbtontechnik sind in den Abschnitten 2.4.1 und 11.1 aufgeführt.

Es gibt auf der anderen Seite auch Gründe für eine Strichdarstellung. Diese Form wird gewählt, wenn zum Beispiel weniger der Zustand eines Objekts als vielmehr seine bau- und entstehungsgeschichtliche Struktur betont werden soll. Das gilt besonders für Pläne von historisch wertvollen Gebäuden, deren äußerer Erhaltungszustand (zerstörte Fensterscheiben, verwitterte oder verrußte Fassaden, beschriftete Wände) eine photographische Wiedergabe nicht begünstigt. Für die Erlangung von Sanierungsgenehmigungen erscheinen daher in solchen Fällen (bereits interpretierte und selektierte) Strichzeichnungen geeigneter.

UMBILDEVERFAHREN

Der Erstellung von Bildplänen müssen entsprechend wirksame und der Objektgestalt und den Aufnahmeverhältnissen angepaßte Umbilverfahren vorausgehen. Für weitgehend ebene Objekte (z.B. Gebäudefassaden, antike Grabreliefs) ist unter Umständen eine ganzflächige oder teilflächige Entzerrung ausreichend. Bei gekrümmten und räumlich abgestuften Oberflächen muß dagegen das Verfahren der Differentialentzerrung eingesetzt werden. Abwicklungen und allgemeine photographische Umbildungen werden neuerdings durch die Verwendung digital gesteuerter Orthoprojektoren möglich. Die Halbtontechnik hat durch diese Verallgemeinerung der Wahl der Bezugsfläche eine entscheidende Erweiterung erfahren.

UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen dieser Arbeit wurde vornehmlich die differentielle Entzerrung in ihrer Anwendung auf Architekturaufnahmen untersucht. An Hand von zahlreichen praktischen Beispielen und Testobjekten konnte dabei eine weitgehende Optimierung des Verfahrens erreicht werden. Obwohl die eigenen Versuche ausschließlich mit den Gerätekombinationen Zeiss Planimat - GZ 1 und Stereoplanigraph - GZ 1 im on- und off-line Betrieb durchgeführt wurden, ist eine Extrapolation der Aussagen auf andere Systeme möglich. Die Ergebnisse

aus den Experimenten auswärtiger Institutionen bestätigen die jeweiligen Befunde. Es hat sich außerdem in allen Bereichen eine Übereinstimmung mit den aus der Luftbilddauswertung geläufigen Zahlenwerten ergeben. Das bedeutet, daß Abschätzungen, Richtwerte und Fehlerformeln von der Aerophotogrammetrie auf den terrestrischen bzw. architektur-photogrammetrischen Bereich übertragen werden können.

VERFAHRENSABLAUF

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen können für die Anwendung des Orthophotoverfahrens in der Architekturphotogrammetrie in Bezug auf den Verfahrensablauf folgende Empfehlungen gegeben werden:

A Aufnahme

1. Im Hinblick auf eine Reduzierung von Verfahrens- und Abtastfehlern sowie von Bewegungsunschärfen bei der späteren Orthoprojektion sollten Aufnahmekammern mit langen Brennweiten bzw. schmalen Bildwinkeln verwendet werden (Abschnitt 4.1.2). Der gleiche geometrische Effekt wird erzielt, wenn aus Weitwinkelaufnahmen kleinere Bildausschnitte zur Differentialentzerrung kommen. Jedoch muß in diesem Fall durch den kleineren Bildmaßstab mit einer geringen Einbuße an Bildqualität und Genauigkeit gerechnet werden.
2. Das Basisverhältnis ist so zu wählen, daß eine Auswertung an dem zur Verfügung stehenden Orthoprojektionssystem möglich ist, das im übrigen aber den jeweiligen Genauigkeitsanforderungen genügt (Abschnitt 4.2.2).
3. Bereits bei der Aufnahme sollte festgelegt werden, welches Teilbild des Modells zur späteren Differentialentzerrung herangezogen wird. Um bei der Orthoprojektion Lageversetzungen und tote Räume zu vermeiden, sollte die Aufnahmeachse dieses Bildes nach Objektvorsprüngen oder anderen Unregelmäßigkeiten der Objektfläche ausgerichtet werden, d.h. Vorsprünge sollten in die Bildmitte zu liegen kommen (Abschnitt 4.2.4).
4. Für die Herstellung von Bildplänen ist eine gleichmäßige Beleuchtung des Objekts von entscheidender Bedeutung. Spiegelungen und Schlagschatten lassen sich durch gezielte Ausleuchtung (möglichst mit Scheinwerfern) weitgehend ausschalten (Abschnitt 4.4).
5. Bei der Aufbereitung des Bildmaterials für die Orthoprojektion (Kontakkopien, Vergrößerungen) kann der Kontrastumfang durch optische oder elektronische Verfahren erhöht oder vermindert werden (Abschnitt 5.1).

B Orthoprojektion

1. Der Orthophotomaßstab (und damit in gewisser Relation auch der Modellmaßstab) sollte möglichst groß gewählt werden, um den Einfluß von Streifenbreite und Blendenbreite auf die geometrische Qualität des Orthophotos klein zu halten (Abschnitte 5.2.5, 6.1.4.1 und 6.2.3).
2. Für die differentielle Entzerrung architektonischer Aufnahmen werden bisweilen Streifenbreiten von $\Delta x \leq 2$ mm notwendig. Damit sich die Auswertzeit dennoch in sinnvollen Grenzen bewegt, sollten die Möglichkeiten der optischen und elektrischen Interpolation (beim Orthoprojektor Zeiss GZ 1, off-line) oder generell der Entzerrung 1. Ordnung wahrgenommen werden (Abschnitt 6.1.4).
3. Bewegungsunschärfen durch Bildwanderung können bei Verwendung von Blendenbreiten in der Größenordnung von $t \leq 0,2$ mm in der Regel vermieden werden (Abschnitt 6.2.4).
4. Die Meßmarkenbewegung beim Profilieren im Stereoauswertegerät muß zur Reduzierung von Höhenabastfehlern an stark geneigten bzw. gekrümmten Objektteilen verlangsamt werden können. Eine variable Abtastgeschwindigkeit ist also für die Profildatengewinnung aus Architekturaufnahmen unerläßlich (Abschnitt 6.3.6).
5. Darüber hinaus sollte der Profillauf an vorstehenden Objektteilen für die Nachführung der Reliefsprünge unterbrochen werden können (Abschnitt 6.5).

C Geräte zur Orthoprojektion

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit sowie den daraus abgeleiteten Empfehlungen zum Verfahrensablauf ergeben sich für die architektonische Anwendung folgende Anforderungen an ein Orthoprojektionssystem:

- Brennweitenbereich: $f = 50$ mm bis $f = 200$ mm
- Basisbereich: $b_x = 0$ mm bis $b_x = 300$ mm
- großer z-Bereich
- Berücksichtigung der Objektquerneigung, Entzerrung 1. Ordnung (beim Zeiss GZ 1: Optische Interpolation)
- Einschalten von Zwischenprofilen (beim Zeiss GZ 1: Elektrische Interpolation)
- Variable Abtastgeschwindigkeit beim Profilieren
- STOP-Mechanismus zur Unterbrechung des Profillaufs

Es gibt zur Zeit nur wenige Differentialentzerrungsgeräte, die diese Forderungen verwirklichen können. Eine Modifizierung der Geräte für Zwecke der Architekturphotogrammetrie kann von Seiten der Hersteller aus finanziellen Gründen nicht erwartet werden. Man wird sich bis auf weiteres mit den für die Luftbilddauswertung konzipierten Systemen behelfen müssen.

Besonders geeignet für die Differentialentzerrung architektonischer Objekte erscheinen die off-line Orthoprojektoren Wild Avioplan OR 1 und Zeiss GZ 1. Der digital gesteuerte Avioplan bietet neben der extrem kurzen Projektionszeit von etwa einer halben Stunde noch zusätzlich die Möglichkeit zu photographischen Abwicklungen und allgemeineren Projektionen.

GENAUIGKEIT

Die geometrische Genauigkeit von Architektur-Orthophotos liegt nach den Untersuchungen aus Abschnitt 9.3.1 zwischen etwa 0,1 und 0,2 mm im Orthophotomaßstab. Für die Genauigkeit von Bildplänen (aus entzerrten oder differentiell entzerrten Halbtonbildern) ergaben sich Werte um 0,2 - 0,3 mm im Plan bzw. (bei einem angenommenen Maßstab von 1:50) um etwa 10 - 15 mm am Objekt (Abschnitt 9.3.2). In diesem Betrag sind die Fehler der weiterverarbeitenden Prozesse (Bildmontage, Reproduktion, Papierverzug) bereits enthalten. Der Wert von 15 mm am Objekt entspricht ungefähr der Genauigkeit einer Stereokartierung (Abschnitt 9.1.6) und kann für architektonische Zwecke der Bauaufnahme und Dokumentation vom Objekt her in der Regel als ausreichend angesehen werden.

ZEITAUFWAND

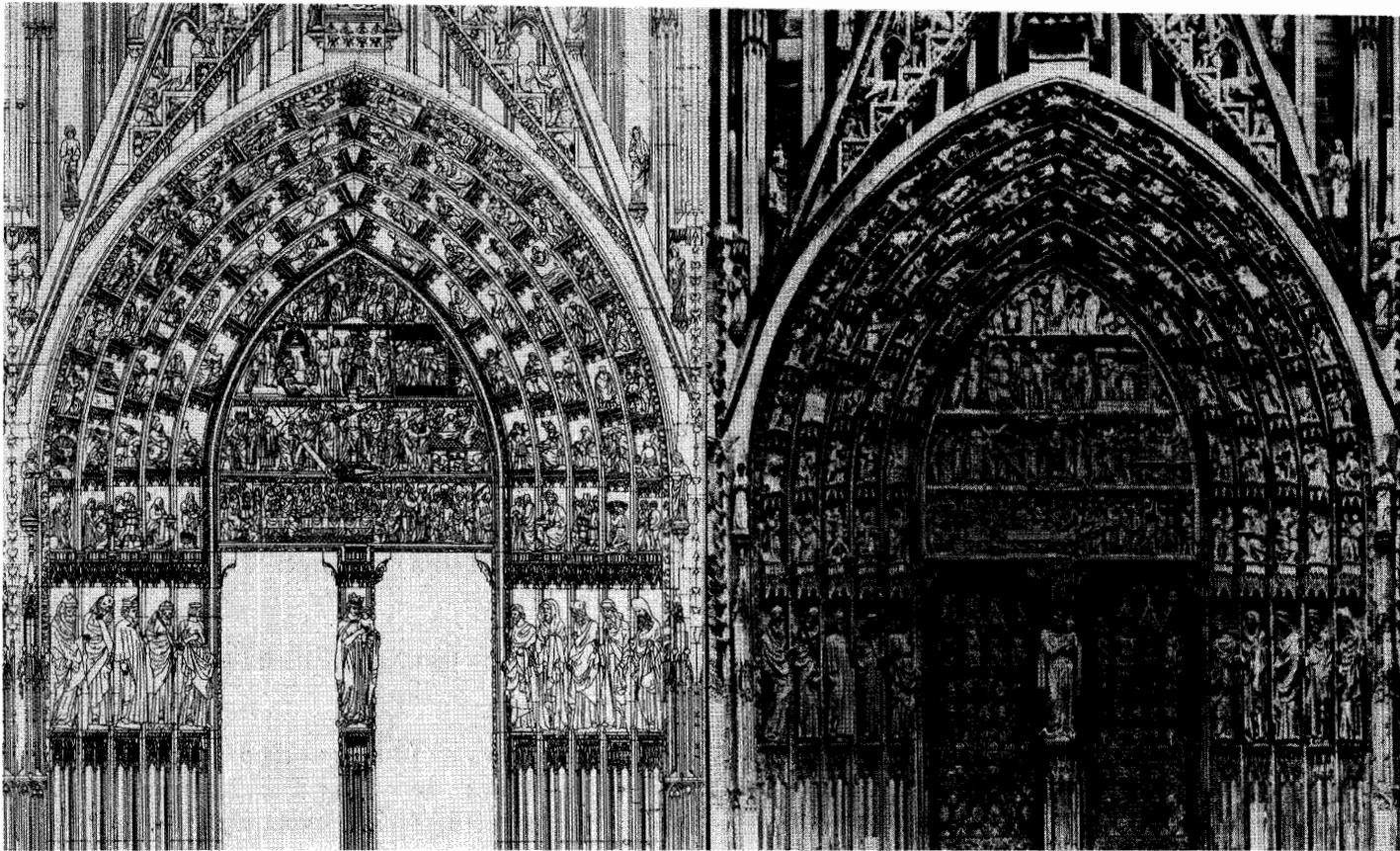
Die Herstellungszeit (Peripheriezeit, Abtastzeit, Projektionszeit) eines Architektur-Orthophotos beträgt nach Abschnitt 10.1 im Durchschnitt 4 - 5 Stunden. Die dabei entstehenden Gesamtkosten belaufen sich auf etwa 250.- bis 400.- DM pro Blatt. Ist auf Grund der geometrischen Objektverhältnisse eine einfache Bildentzerrung möglich, so reduziert sich dieser Betrag auf ca. 150.- DM.

Beim Zeitvergleich zwischen Bildplan-Herstellung, Orthophoto-Hochzeichnung und Stereokartierung ergab sich ein Verhältnis von etwa 1 : 5 : 15 (Abschnitt 10.2). Während dabei das Zeitverhältnis zwischen Hochzeichnung und Stereokartierung als 5 : 15 = 1 : 3 experimentell signifikant bestimmt wurde, hängt das Verhältnis 1 : 5 bzw. 1 : 15 zum Bildplan von der bei der jeweiligen Strichdarstellung wiedergegebenen Detailfülle ab und ist daher in größerem Bereich variabel. Jedenfalls erweist sich die Halbtonverarbeitung, wo sie anwendbar ist, gegenüber der Stereokartierung als ein rationelles Verfahren.

ABSCHLIESSENDES BEISPIEL

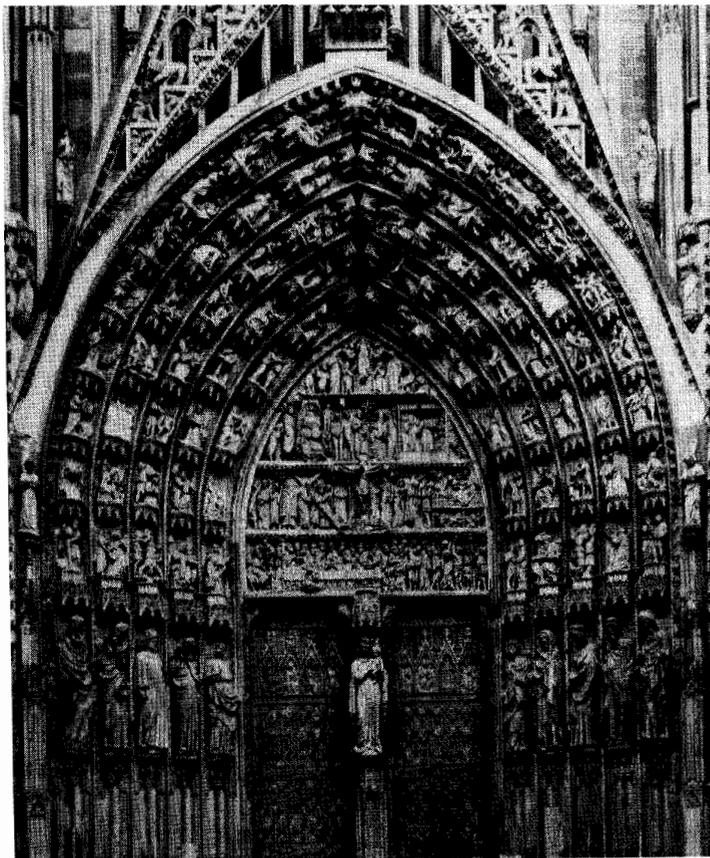
Am praktischen Beispiel des gotischen Gewändeportals (Westfassade, Hauptportal) des Straßburger Münsters sollen hier die Vorteile der Halbtontechnik zusammengefaßt werden. Zur graphischen Demonstration sind in Abb. 12/1 die Original-Meßaufnahme, eine Stereokartierung (siehe Abb. 2/7) und ein Orthophoto (siehe Abb. B/5 im Anhang) einander gegenübergestellt.

Der optische Vergleich der in Abb. 12/1 (c) wiedergegebenen zentralperspektiven Originalaufnahme mit dem dazugehörigen Orthophoto zeigt sehr deutlich die Unterschiede in der Projektionsart. Zum Beispiel verläuft im Originalbild die Reihe der Baldachinkonsolen über den Gewändefiguren auf Grund der Reliefversetzung jeweils schräg nach oben, während dieselbe Reihe im Orthophoto (und auch in der Stereokartierung) horizontal dargestellt ist. Als weiteres Merkmal fallen die Maßstabsunterschiede zwischen den Bereichen der Gewände (und Archivolten) und den Tür- bzw. Tympanonflächen auf.



(a)

(b)



(c)

Abb. 12/1

Gegenüberstellung von zentralperspektiver Aufnahme, Orthophoto und Stereokartierung;

Objekt: Straßburg/Frankreich, Hauptportal an der Westfassade des Münsters

(a) Stereokartierung

Bearbeitung: IGN, Paris
Zeitaufwand: ca. 200 Std.

(b) Orthophoto

Zeiss-Planimat - GZ1, off-line
Zeitaufwand: ca. 5 Std.

(c) Originalaufnahme

Zeiss SMK 120
Zentralperspektive Wiedergabe

Die weiter von der Aufnahmekammer entfernten Objektzonen (Tür, Tympanon) sind in der zentralperspektiven Aufnahme in einem kleineren Maßstab abgebildet als die vorderen Objektpartien. Die Baldachinkonsolen erscheinen im Orthophoto (wie in der Zentralprojektion) gekrümmt, was auf die (beim Profilieren im Stereoauswertegerät) fälschliche Meßmarkennachführung in der Tiefe der Zwischendienste zurückzuführen ist (siehe Abschnitt 6.3.4). Die Abtastfläche hätte ausgleichend über die Figuren der Gewände und Archivolten gelegt werden müssen, um eine (auch in diesen Bereichen) orthogonale Darstellung zu erhalten (siehe die Stereokartierung in Abb. 12/1a).

Beim Vergleich zwischen Orthophoto und Stereokartierung ergeben sich folgende Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten:

1. Das Orthophoto des gotischen Gewändeportals enthält die gesamte Detailfülle des Objekts. Die Auswahl und Interpretation der Formen und Strukturen bleibt dem Benutzer des Planes überlassen. In der Stereokartierung ist nahezu die gleiche Detailfülle wiedergegeben (abgesehen von den Türflächen). Die Linien der Baldachinkonsolen und Tympanonfiguren sind allerdings schwer zu trennen und zu interpretieren (auch in größerem Maßstab nicht).
2. Das Halbtonbild weist die gleiche geometrische Genauigkeit auf wie die linienhafte Darstellung.
3. Das Orthophoto konnte in 5 Stunden hergestellt werden, während für die Stereokartierung ohne Darstellung der Türflächen ca. 200 Stunden benötigt wurden. Das Zeitverhältnis beträgt in diesem Fall etwa 1 : 40.

Das Orthophotoverfahren in der Architekturvermessung kann also, wie das Beispiel aus Abb. 12/1 und auch die in Tabelle 8/1 aufgeführten Objektbeispiele zeigen, bei richtiger Wahl der Projektparameter und der Orthoprojektionsgeräte bei geringem Zeitaufwand sowohl in photographischer als auch in geometrischer Hinsicht zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Voraussetzung dafür ist allerdings eine gezielte Anwendung auf geeignete Objekte (Abschnitt 11). Die Untersuchungen und Beispiele demonstrieren, daß die Methode prinzipiell funktionsfähig sowie praxisreif einsetzbar ist.

ANWENDUNGEN DER DIFFERENTIALENTZERRUNG

Die Differentialentzerrung ist auf alle Objekte anwendbar, deren Oberfläche weitgehend stetig verläuft. In Frage kommen vor allem Gebäudefassaden, Kuppeln und Gewölbe, aber auch Bauwerkselemente wie Reliefs, Mosaiken, Stuckierungen und Schnitzwerk aller Art. Der (zeitliche) Vorteil der Methode wächst mit dem Grad der Dekoration und der Feingliedrigkeit der Objektstrukturen. Im Prinzip kann die Anwendung auch auf andere terrestrische Bereiche (Ingenieurbau, Biophotogrammetrie, Geologie) ausgedehnt werden. Versuche dieser Art sind allerdings bisher nicht bekannt.

PRAKTISCHER EINSATZ IN DER ARCHITEKTURPHOTOGRAMMETRIE

Die Reaktion der Architekten, Bauhistoriker und Denkmalpfleger auf diese neue Darstellungsform und Verarbeitungstechnik wurde auf einigen Symposien der Architekturphotogrammetrie und Denkmalpflege (Gummersbach 1973, Athen 1974, Heerbrugg 1975, Karlsruhe 1975, Bonn 1976, Helsinki 1976) beobachtet und registriert. Sie kann generell als sehr positiv bezeichnet werden. Bedenken wurden allerdings wegen der hohen Anschaffungskosten für ein Differentialentzerrungsgerät geäußert. Diese Ausgaben stehen aber in keinem Verhältnis zu den bei umfangreichen Stereokartierungen notwendigen Geräte- und Auswertekosten, wenn eine entsprechende Ausnutzung des Orthoprojektors gewährleistet ist.

Für den praktischen Einsatz des Verfahrens im Bereich der Denkmalpflege erscheint deshalb die Einrichtung von gegebenenfalls überregionalen Zentralstellen für Halbtonauswertungen angebracht. Mit der Verwendung eines (eventuell digital gesteuerten) off-line-Orthoprojektionssystems wäre damit die Möglichkeit gegeben, die Profilabtastung der photogrammetrischen Modelle in den Landesdenkmalämtern selbst oder bei privaten Unternehmungen durchzuführen, während die differentielle Entzerrung in der Zentralstelle erfolgt. Die Orthoprojektion könnte auch (im Wechsel mit topographischen Umbildungen) am off-line-Gerät einer Vermessungsverwaltung im Service-Betrieb vorgenommen werden.

Bei dem dringenden Bedarf an maßstäblichen Plänen baugeschichtlich wertvoller Objekte müssen der Denkmalpflege wirksame Methoden zur schnellen und wirtschaftlichen Verarbeitung der aufgenommenen Information angeboten werden. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wurde, ist die Halbtontechnik für diese Aufgabe im besonderen geeignet. Das Verfahren der differentiellen Entzerrung ermöglicht dabei eine genaue, vollständige und vor allem wirtschaftlich zu erstellende Plangrundlage zur Dokumentation und Erhaltung von Bau- und Kulturdenkmälern. Es wird daher empfohlen, diese Methode regelmäßig anzuwenden und an den entsprechenden Stellen die Voraussetzungen dafür zu schaffen.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

Abkürzungen:

BuL	Bildmessung und Luftbildwesen
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
ASP	American Society of Photogrammetry
CIPA	Comité International de Photogrammètrie Architectural
IGN	Institut Géographique National
SFP	Société Française de Photogrammètrie

- /1/ Ahrend, M. Zur Wahl des Schichtträgers bei Luftbildaufnahmen, Dissertation, DGK C/23, München 1957, 94 S.
- /2/ Ahrend, M.
Brucklacher, W.
Meier, H.-K.
Utz, W. Der Orthoprojektor Gigas-Zeiss, BuL 3/1964, S. 153-160
- /3/ Albertz, J./
Kreiling, W. Photogrammetrisches Taschenbuch, Verlag H. Wichmann, Karlsruhe 1975, 284 S.
- /4/ Beck, W. Zur Synthese von topographischer Karte, Orthophoto und Orthophotokarte, BuL 3/1966, S. 91-98
- /5/ Beck, W. Herstellung topographischer Karten 1:10 000 auf photogrammetrischem Weg, Sonderveröffentlichung D-9 der OEEPE (Organisation Européenne d' Etudes Photogrammétriques Expérimentales), Frankfurt 1976, 65 S.
- /6/ Berling, D. Zur Technik der photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung in der Denkmalpflege, Veröffentlichung Nr. 22 des Geod. Inst. der RWTH Aachen, 1972, S. 59-83
- /7/ Blachut, T. J. Results of the International Orthophoto Experiment 1972-76, Working Group Report, XIII. ISP-Kongress, Komm. II, Helsinki 1976, 32 S.
- /8/ Borchers, P. E. Stereophotogrammetric recording and interpretation of works of art and architecture, XI. ISP-Kongress, Komm. V, Lausanne 1968, 9 S.
- /9/ Braum, F. The relative orientation of convergent oblique photographs in architectural survey, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Lucca 1973, in: Fotogrammetria dei monumenti, Libreria Editrice Fiorentina, Florenz 1975, S. 171-181
- /10/ Brucklacher, W.
Lüder, W. Untersuchungen über die Schrumpfung von Meßfilmen und photographischem Plattenmaterial, DGK B/31, München 1956, 39 S.

- /11/ Brucklacher, W. Zur Frage des optimalen Bildmaßstabes bei der Herstellung von Orthophotokarten, BuL 3/1970, S. 188-193
- /12/ Brucklacher, W. An equipment system for architectural photogrammetry, XII. ISP-Kongress, Komm. V, Ottawa 1972, 16 S.
- /13/ Buchholtz, A./
Rüger, W. Photogrammetrie, Verfahren und Geräte, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1973, 416 S.
- /14/ Burkhardt, R. Architektur-Photogrammetrie, aus: Handbuch der Vermessungskunde, Band III a/2, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1972, S. 1415-1428
- /15/ Carbonnell, M. L'histoire et la situation présente des applications de la photogrammétrie à l'architecture, Colloque de l'ICOMOS, Paris 1968, 42 S.
- /16/ Carbonnell, M. Introduction à l'application de la photogrammétrie aux édifices et aux ensembles monumentaux anciens, Monumentum IV / 1969 (ICOMOS), S. 3-35
- /17/ Carbonnell, M. Contribution de la photogrammétrie à l'étude et à la conservation des centres historiques, Bulletin de l'IGN, Paris 1973, S. 18-35
- /18/ Carbonnell, M. Evolution des applications de la photogrammétrie à la conservation des monuments et des sites, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 19-32
- /19/ Carbonnell, M. Technical progress in architectural photogrammetry, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 12/1975, S. 1513-1517
- /20/ CIPA La photogrammétrie architecturale de 1968 à 1971, Bulletin 45, 1/1972, SFP, 40 S.
- /21/ CIPA La photogrammétrie architecturale en 1972, Bulletin 51, 7/1973, SFP, 30 S.
- /22/ CIPA La photogrammétrie architecturale en 1973 et 1974, Bulletin 56, 10/1974, SFP, 28 S.
- /23/ Clasen, C.W. Die Abteilung Photogrammetrie beim Landeskonservator Rheinland und die zukünftigen Aufgaben im Rahmen der Haager Konvention für den Kulturgüterschutz, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 33-44
- /24/ Döhler, M. Erfahrungen mit der Photogrammetrie bei archäologischen und baugeschichtlichen Objekten, BuL 5/1974, S. 138-148
- /25/ Döhler, M. Verwendung von Paßlinien anstelle von Paßpunkten in der Nahbildmessung, Festschrift Prof. Schwidofsky, Karlsruhe 1975, S. 39-45
- /26/ Döhler, M. Photogrammetrische Bestandsaufnahme kulturhistorischer Objekte, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 18
- /27/ Ferri, W.S. First performance tests with the Orthophoto-Simplex, Veröffentlichung Officine Galileo, Florenz 1971, 13 S.

- /28/ Ferri, W.S.
Fondelli, M. Problems in photogrammetric surveying of domes, XII. ISP-Kongress, Komm. V, Ottawa 1972, 16 S.
- /29/ Fietz, W. Die Wünsche des Denkmalpflegers an die Architekturphotogrammetrie, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Zürich 1972, 6 S.
- /30/ Fietz, W. Dokumentation oder Manipulation - Probleme der Auswertung aus der Sicht des Denkmalpflegers, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Heerbrugg 1975, 7 S.
- /31/ Finsterwalder, R. Auswertung von Luftaufnahmen mit geänderter Bildweite, Dissertation, DGK C/45, München 1961, 56 S.
- /32/ Finsterwalder, R./
Hofmann, W. Photogrammetrie, Verlag W. de Gruyter, Berlin 1968, 455 S.
- /33/ Förstner, R. Das Orthophoto, seine Herstellung, Genauigkeit und weitere Verwendung, BuL 2/1967, S 53-60
- /34/ Foramitti, H. Die Bildmessung in der Hand des Baufachmannes, Deutsche Bauzeitung, Hefte 9 und 10, 1966, 8 S.
- /35/ Foramitti, H. Kulturgüterschutz, Empfehlungen zur praktischen Durchführung, Teil 1, Verlag Böhlau, Wien 1970, 330 S.
- /36/ Foramitti, H. Anwendung der Photogrammetrie im Kulturgüterschutz, Veröffentlichung Nr. 22 des Geod. Inst. der RWTH Aachen, 1972, S. 109-140
- /37/ Foramitti, H. Der Wert moderner photogrammetrischer Kulturgüterarchive, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 16, 70 S.
- /38/ Geiselhart, R. Graphische Darstellungsformen in der Architekturphotogrammetrie, Selbständige Arbeit am Institut für Photogrammetrie, Stuttgart 1975, unveröffentlicht, 30 S.
- /39/ Gomoliszewski, J. Die Kirche Santa Anna in Krakau, Dokumentation, Warschau 1957, 364 S.
- /40/ Gosdschan, P. Der Fassadenbildplan, ein weiteres Hilfsmittel der Architekturmessung, Vermessungstechnik 3/1961, S. 45-47
- /41/ Grimm, A. Architektur-Photogrammetrie an der Gesamthochschule Siegen, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 73-84
- /42/ v. Gruber, O. Ferienkurs in Photogrammetrie, Verlag K. Wittwer, Stuttgart 1930, 510 S.
- /43/ Grün, A. Ausstellungsbeitrag zum Internationalen Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976
- /44/ Hampel, G. Orthoprojektion und Grundkartenwerk 1:2 500 unter besonderer Berücksichtigung der Höhendarstellung, BuL 2/1967, S. 61-69
- /45/ Hanke, P. Die Anwendung von Entzerrungsverfahren bei der Herstellung von Fassadenplänen, Kompendium Photogrammetrie, Band VII, Jena 1963, S. 184-203

- /46/ Hardegen, W. Die Auswertegeräte für Architekturaufnahmen, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Zürich 1972 und Heerbrugg 1975, 10 S.
- /47/ Haug, G.
Hueber, H.
Knappich, W. Kombinierte terrestrisch-photogrammetrische Bauaufnahme Schloß Linderhof, Selbständige Arbeit und Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, Stuttgart 1974, unveröffentlicht, 162 S.
- /48/ Helava, U.V. On different methods of orthophotography, The Canadian Surveyor, 1/1968, S. 5-20
- /49/ Hell, G. Ein Beitrag zur terrestrischen Bildtriangulation, Festschrift Prof. Schwidersky, Karlsruhe 1975, S. 47-57
- /50/ Helmle, H.P. Empirische Genauigkeitsuntersuchung an terrestrischen Orthophotos, Selbständige Arbeit am Institut für Photogrammetrie, Stuttgart 1975, unveröffentlicht, 53 S.
- /51/ Hobbie, D. Affinverfahren in der Orthoprojektion, Zeiss-Mitteilungen 1969, Band 5, Heft 3, S. 146-155
- /52/ Hobbie, D. Instrumentelle Neuerungen am Orthoprojektor Gigas-Zeiss, BuL 5/1969, S. 219-226
- /53/ Hobbie, D. Höhenauswertung in Orthoprojektoren, BuL 1/1971, S. 29-36
- /54/ Hobbie, D. Einige Messungen zum Einfluß des "Fertsch-Effektes" auf den stereoskopischen Höhen-Einstellfehler, Festschrift Prof. Lehmann, Hannover 1972, S. 91-110
- /55/ Hobbie, D. Zur Verfahrensdisposition bei differentieller Entzerrung von photogrammetrischen Luftbildern, Dissertation, DGK C/197, München 1974, 187 S.
- /56/ Hobrough, G.L.
Hobrough, T.B. Image correlator speed limits, BuL 1/1971, S. 20-24
- /57/ Höhle, J. On some innovations in close-range photogrammetry, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, 19 S.
- /57a/ Höhle, J.
Stewardson, P.B. Orthophotogeräte und ihre Wirtschaftlichkeit, BuL 1/1977, S. 7-14
- /58/ Hofmann, W. Das Problem der "Gefährlichen Flächen" in Theorie und Praxis, Dissertation, DGK C/3, München 1953, 46 S.
- /59/ Jachimski, J. Problems and scope of photogrammetric applications to architectural and urbanistic projects, ASP meeting, St. Louis 1974, 14 S.
- /60/ Jachimski, J.
Letellier, R.
Weaver, M.E. The recording of Canadian historic monuments, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Athen 1974, in: Photogrammetric surveys of monuments and sites, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1975, S. 55-69
- /61/ Jachimski, J. Nonconventional application of differential rectifier and analytical plotter in the recording of historic monuments, XIII. ISP-Kongress, Komm. V. Helsinki 1976, 16 S.

- /62/ Jänsch, R.D. Genauigkeitsansprüche bei der photogrammetrischen Bauaufnahme, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 103-108
- /63/ Jochmann, H. Abbildungsfehler der Differentialentzerrung, BuL 4/1965, S. 167-172
- /64/ Jordan / Eggert / Kneißl Handbuch der Vermessungskunde, Band III a / 1-3, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1972, 923 S.
- /65/ Karara, H.M. Non-Topographic Photogrammetry 1972 - 1976, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1/1976, S. 37-45
- /66/ Kasper, H. Die Überkorrektur bei der gegenseitigen Orientierung von Senkrechtaufnahmen eines beliebigen Geländes, Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen 5/1949, S. 116-123
- /67/ Kasper, H. Der Auftrag des Denkmalpflegers aus der Sicht des Photogrammeters, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Heerbrugg 1975, 12 S.
- /68/ Kern, Aarau Orthoprojektor OP 2, Firmendruckschrift Nr. 227, Kern, Aarau 1976, 4 S.
- /69/ Knecht, W. Erfahrungen beim Aufbau einer Sicherstellungsdokumentation, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Heerbrugg 1975, 14 S.
- /70/ Knöpfli, A. Der Auftrag des Denkmalpflegers an den Photogrammeter, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Heerbrugg 1975, 8 S.
- /71/ Knöpfli, A. Photographie und Photogrammetrie in Inventarisierung und Denkmalpflege, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 18
- /72/ Kölbl, O. Ein Orthophotosystem für Nahbereichsaufnahmen, Festschrift Prof. Schwidofsky, Karlsruhe 1975, S. 95-110
- /73/ König, K. Wahl des Bildmaßstabes bei der Verwendung von Orthophotos zur Kartenfortführung, BuL 2/1972, S. 88-94
- /74/ Konecny, G. Zukunftsaufgaben der Photogrammetrie, Zeitschrift für Vermessungswesen 12/1974, S. 527-535
- /75/ Kraus, K. Ein allgemeines digitales Geländemodell, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S. 225-253
- /76/ Kraus, K. / Tschannerl, J. Die photographische Entzerrung abwickelbarer Regelflächen, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, BuL 4/76, S. 168-170
- /77/ Kraus, K. Applications of a digitally-controlled orthophoto instrument, XIII. ISP-Kongress, Komm. IV, Helsinki 1976, 17 S.

- /78/ Krauss, G. The production of photomaps at the scale of 1:5 000 in Nordrhein-Westfalen, Internationales Kolloquium über Orthophototechnik, Paris 1971, 6 S.
- /79/ Kuhn, E. Empirische Genauigkeitsuntersuchung an terrestrischen Orthophotokarten, Selbständige Arbeit am Institut für Photogrammetrie, Stuttgart 1976, unveröffentlicht, 67 S.
- /80/ Kupfer, G.
Mauelshagen, L.
Wester-Ebbinghaus, W. Verfahren zur photogrammetrischen Bestandsaufnahme, dargestellt an ausgewählten Beispielen, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 109-116
- /81/ Lacmann, O. Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischen Gebieten, Verlag Hirzel, Leipzig 1950, 220 S.
- /82/ Lehmann, G. Photogrammetrie, Sammlung Göschen, Band 1188, Berlin 1969, 220 S.
- /83/ Löschner, F. Photogrammetrie und Kulturgüterschutz, BuL 5/1970, S. 302
- /84/ Löschner, F. Architekturvermessung im Aachener Dom-Rathaus-Bereich, Veröffentlichung Nr. 22 des Geod. Inst. der RWTH Aachen 1972, S. 1-57
- /85/ Löschner, F. Architekturphotogrammetrie, Jahrestagung der Denkmalpfleger, Gummersbach 1973, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 7, S. 67-78
- /86/ Löschner, F. Der Beitrag der Photogrammetrie zur Denkmalpflege, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 18
- /87/ Makarovic, B. Das Facettenverfahren - ein Sondergebiet der Affin-Entzerrung, BuL 2/1957, S. 49-59
- /88/ Mauelshagen, L. Einsatz der terrestrischen Photogrammetrie im Architektur - und Bauplanungswesen, Vermessungswesen und Raumordnung 11/1974, S. 405-420
- /89/ Meier, H.-K. Theorie und Praxis des Orthoprojektors Gigas-Zeiss, Zeiss Mitteilungen, Band 4, Heft 2, 4/1966, S. 79-98
- /90/ Meier, H.-K. Modellvorstellungen zur Luftbild-Aufnahmedisposition und ihr Vergleich mit praktischen Testergebnissen, BuL 1/1970, S. 50-62
- /91/ Meier, H.-K. Orthoprojection systems and their practical potential, 4th National Survey Conference, Durban 1970, 12 S.
- /92/ Meydenbauer, A. Über die Anwendung der Photogrammetrie zur Architektur- und Terrain-Aufnahme, Zeitschrift für Bauwesen 1867, S. 61-70
- /93/ Meyer, R. Das Basisverhältnis in der terrestrischen Photogrammetrie, Vermessungstechnik 6/1967, S. 214-217
- /94/ Meyer, R. Aufnahmedispositionen zur stereophotogrammetrischen Herstellung von Aufrissen, Vermessungstechnik 6/1970 S. 219-223

- /95/ Meyer, R. Orientierungsprobleme bei der stereophotogrammetrischen Auswertung von Aufrissen, Vermessungstechnik 8/1970, S. 290-293
- /96/ Meyer, R. Eine Überweitwinkel-Meßkammer für die Architektur-Photogrammetrie, Vermessungstechnik 2/1976, S. 62-64
- /97/ Mohl, H.
Mohr, E. Photogrammetrische Raumnetze in der Architekturphotogrammetrie, BuL 5/1974, S. 155-159
- /98/ Morgenstern, D. Versuche und Erfahrungen zur Gewinnung von Strichzeichnungen mit photographischen Bildern, Arbeitskreis "Ingenieuranwendungen der Photogrammetrie", Karlsruhe 1975
- /99/ Nagel, G. Photogrammetrie an historischen Bauwerken, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie. Brno 1971, 8 S.
- /100/ Nagel, G. Aufgabenstellung und technischer Aufwand bei photogrammetrischen Vermessungen für Denkmalpflege und Baugeschichte, Jahrestagung der Denkmalpfleger, Gummersbach 1973, und Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Athen 1974, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 7, S. 87-104
- /101/ Nagel, G. Die meßtechnische Erfassung der Abteikirche Neresheim, Katalog zur Ausstellung "Balthasar Neumann in Baden-Württemberg", Staatsgalerie Stuttgart 1975, S. 135-141
- /102/ Nagel, G. Die Verantwortung des Photogrammeters bei der Erfassung wertvoller Architekturdetails, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 18
- /103/ Netter, E. Zeichnung oder Photo, International Phototechnik 4/1974, München, S. 48-49
- /104/ Neubauer, H.G. Eine Genauigkeitsuntersuchung des Orthoprojektors Gigas-Zeiss, Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft 42, Frankfurt 1969, 76 S.
- /105/ Neubauer, H.G. Die Geländeneigungen und ihr Einfluß auf die Lagefehler der differentiellen Entzerrung, BuL 5/1969, S. 179-182
- /106/ O.M.I., Rom Orthoprinter OP/C-2, Firmendruckschrift, Ottico Meccanica Italiana, Rom 1976, 4 S.
- /107/ Otepka, G.
Loitsch, J. A computer program for digitally-controlled production of orthophotos, XIII. ISP-Kongress, Komm. IV, Helsinki 1976, 19 S.
- /108/ Pölzleitner, F. The Wild PPO-8 orthophoto equipment, XII. ISP-Kongress, Komm. II, Ottawa 1972, 19 S.
- /109/ Raab, K.O. Architekturbildmessung, Selbstverlag, Karlsruhe 1960, 60 S.

- /110/ Raslan, M. Inwieweit erfüllt die Architekturphotogrammetrie die Forderungen der Bauforschung, und wie ist sie vom Architekten anzuwenden?, Dissertation, DGK C/80, München 1965, 100 S.
- /111/ Rinner, K. Photogrammetrische Auswertung mit Hilfe affiner Modelle, Photogrammetria 1951/52, S. 224-231
- /112/ Schmidt-Falkenberg, H. Höhenlinien aus photogrammetrisch gemessenen Geländeprofilen und ihre Brauchbarkeit für den Kartenmaßstab 1:5 000, Dissertation, DGK C/151, Frankfurt 1970, 96 S.
- /113/ Schneider, H. Untersuchungen am Orthoprojektor GZ 1 über die Höhengenaugigkeit der Profilschraffenmethode, Dissertation, DGK C/162, München 1971, 115 S.
- /114/ Scholl, R. Die geometrischen Grundlagen der Ausmessung von Architekturaufnahmen, Internationaler Kurs für Architekturphotogrammetrie, Zürich 1972 und Heerbrugg 1975, 43 S.
- /115/ Schweißthal, R. Grundlagen, Bearbeitung und Herstellung großmaßstäbiger Luftbildkarten, Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie der TH Hannover, 1967, Heft 34, 88 S.
- /116/ Schwidofsky, K. Über die Anwendung der Stereophotogrammetrie auf Architekturvermessungen, Dissertation, Braunschweig 1931, 52 S.
- /117/ Schwidofsky, K. Die Orthophotokarte und die Entzerrungsverfahren für unebenes Gelände, BuL 4/1965, S. 143-156
- /118/ Schwidofsky, K. / Ackermann, F. Photogrammetrie, Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart 1976, 384 S.
- /119/ Seeger, E. Direct tracing of topographical details from large-scale orthophotos, Internationales Kolloquium über Orthophototechnik, Paris 1971, 3 S.
- /120/ Seeger, E. Das Orthophotoverfahren bei der Bauaufnahme am Beispiel Schloß Linderhof, BuL 5/1974, S. 148-154
- /121/ Seeger, E. Die differentielle Entzerrung zur Herstellung maßstäblicher Photopläne in der Architektur, Arbeitskreis "Ingenieurwendungen der Photogrammetrie", Karlsruhe 1975
- /122/ Seeger, E. Erfahrungen mit der Orthophototechnik in der Architekturphotogrammetrie, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 149-156
- /123/ Seeger, E. Orthophotography in architectural photogrammetry, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 5/1976, S. 625-635
- /124/ Sena, C. Practical problems in the photogrammetry of monuments, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Athen 1974, in: Photogrammetric surveys of monuments and sites, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1975, S. 113-119

- /125/ Sitek, Z. Orthophoto technique in architecture, Internationales Symposium für Orthophototechnik, Krakau 1974, Proceedings S. 142-159
- /126/ Sitek, Z. Experiences with the application of orthophotos in architecture, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, 16 S.
- /127/ Stanger, W. Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S. 255-284
- /128/ Stark, E. Der Einfluß des Bildwinkels auf die Lage- und Höhengenaugigkeit photogrammetrischer Auswertungen, BuL 1/1976, S. 5-14
- /129/ Stephani, M. Zur Rolle der Photogrammetrie in der Archäometrie, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 157-158
- /130/ Stewardson, P.B. The Wild Avioplan OR 1 Orthophoto System, XIII. ISP-Kongress, Komm. II, Helsinki 1976, 33 S.
- /131/ Strobel, E. Erfahrungen mit dem Orthophoto bei der Fortführung der Topographischen Karte 1:25 000, BuL 5/1969, S. 197-202
- /132/ Szangolies, K. Orthophot B, ein neues universelles Differential-entzerrungsgerät mit Profilschraffenzeichner Orograph, XI. ISP-Kongress, Komm. II, Lausanne 1968, 20 S.
- /133/ Torlegård, K. State-of-the-Art of Close-Range Photogrammetry, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, S. 71-79
- /134/ Visser, J. The use of, and the experience with, the Zeiss orthoprojector GZ 1 at the ITC, The Canadian Surveyor 1/1968, S. 177-193
- /135/ Vojnović, G.
Marcěta, M. Die Anwendung des Orthophotoverfahrens im Denkmalschutz, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, 3 S.
- /136/ Voss, F. Die Herstellung von Orthophotokarten 1:5 000 in Nordrhein-Westfalen, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst Nordrhein-Westfalen, 1/1968
- /137/ Waldhäusl, P. Besondere Bildflugbedingungen für Photokarten, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen 1/1971, S. 6-11
- /138/ Wild, Heerbrugg Avioplan OR 1, Firmendruckschrift, Wild, Heerbrugg 1976, 11 S.
- /139/ Winkelmann, G. Erfahrungen bei der Herstellung von Orthophotokarten, BuL 5/1969, S. 183-186
- /140/ Wrobel, B. Photogrammetrische Bestandsaufnahme des Klosters Walkenried im Harz, Internationales Symposium für Architekturphotogrammetrie, Bonn 1976, Landeskonservator Rheinland, Arbeitsheft 17, S. 159-174

- /141/ Wrobel, B
Ellenbeck, K.H. Terrestrial photogrammetric determination of point coordinates by simultaneous adjustment of image coordinates and observed orientation elements using Bundle Blockadjustment, XIII. ISP-Kongress, Komm. V, Helsinki 1976, 21 S.
- /142/ Zeiss, Oberkochen Photogrammetrische Instrumente, Firmendruckschrift Nr. 51-560, Carl Zeiss, Oberkochen 1972, 143 S.
- /143/ Zeiss, Oberkochen Gebrauchsanleitung zur Stereomeßkammer SMK 40/120, Firmendruckschrift Nr. 51/1055, Carl Zeiss, Oberkochen 1974
- /144/ Zeiss, Oberkochen Gebrauchsanleitung zum Orthoprojektor GZ 1 in "direkter Ankopplung", Firmendruckschrift Nr. 51-1009/II
- /145/ Zeiss, Oberkochen Gebrauchsanleitung zum Analog-Speichergerät SG 1, Firmendruckschrift Nr. 51-1050
- /146/ Zeiss, Oberkochen Gebrauchsanleitung zum Orthoprojektor GZ 1 mit Analog-Lesegerät LG 1 im off-line Betrieb, Firmendruckschrift Nr. 51-1048
- /147/ Zeiss, Oberkochen Verfahrenshinweise zur Herstellung von Orthophotos und Photokarten mit dem Orthoprojektor GZ 1 - System, Firmendruckschrift Nr. 51-1049
- /148/ van Zuylen, L. Orthophoto - Orthophotomap - Basemap - Revision, The Canadian Surveyor 1/1968, S. 194-205

A N H A N G

Anhang A	<u>Abbildungen A/1 bis A/12</u> Orthophotos und Halbton-Abwicklungen auswärtiger Institute	Seiten 297 - 309
Anhang B	<u>Abbildungen B/1 bis B/12</u> Im Rahmen dieser Untersuchung hergestellte Orthophotos	Seiten 310 - 323
Anhang C	<u>Abbildungen C/1 bis C/7</u> Im Rahmen dieser Untersuchung hergestellte Strich-Halbton-Pläne	Seiten 324 - 331

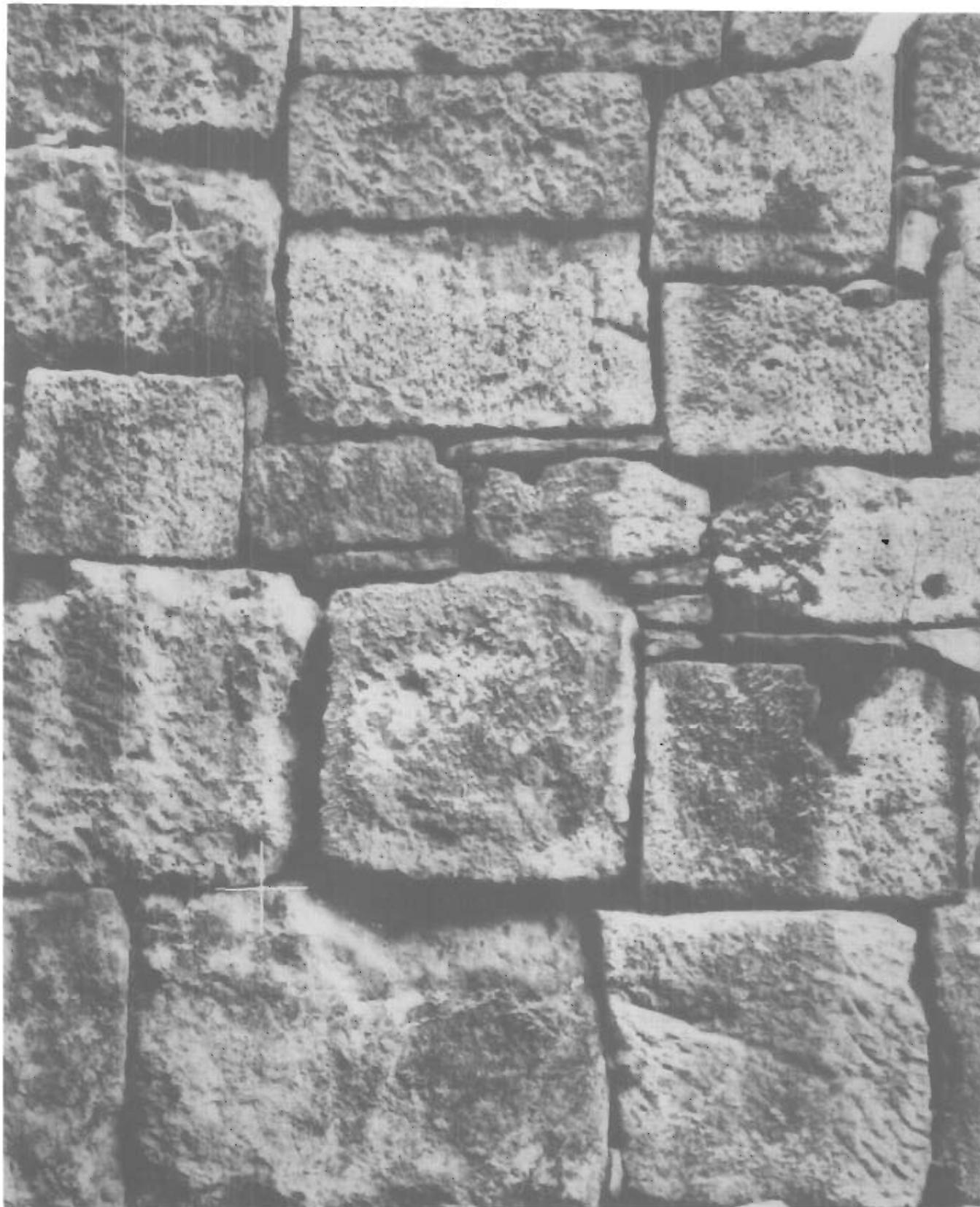


Abb. A/1 Regensburg; Römische Mauer, Ausschnitt
Orthophoto (PPO 8, on-line)
Universität Karlsruhe / Wild Heerbrugg

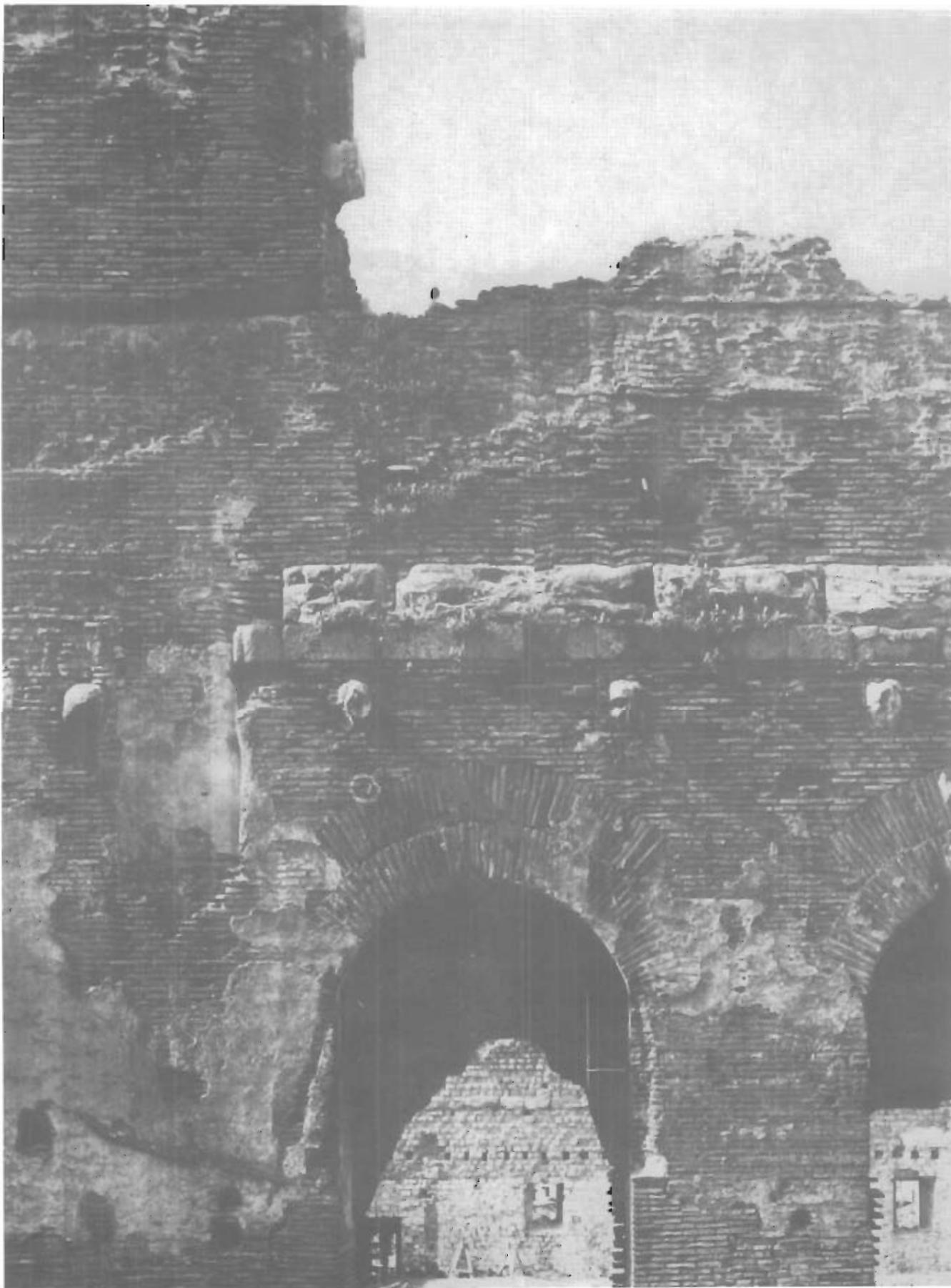


Abb. A/2 Pergamon/Türkei; Rote Halle, Ausschnitt
Orthophoto (GZ 1, off-line)
Universität München / LVA Stuttgart

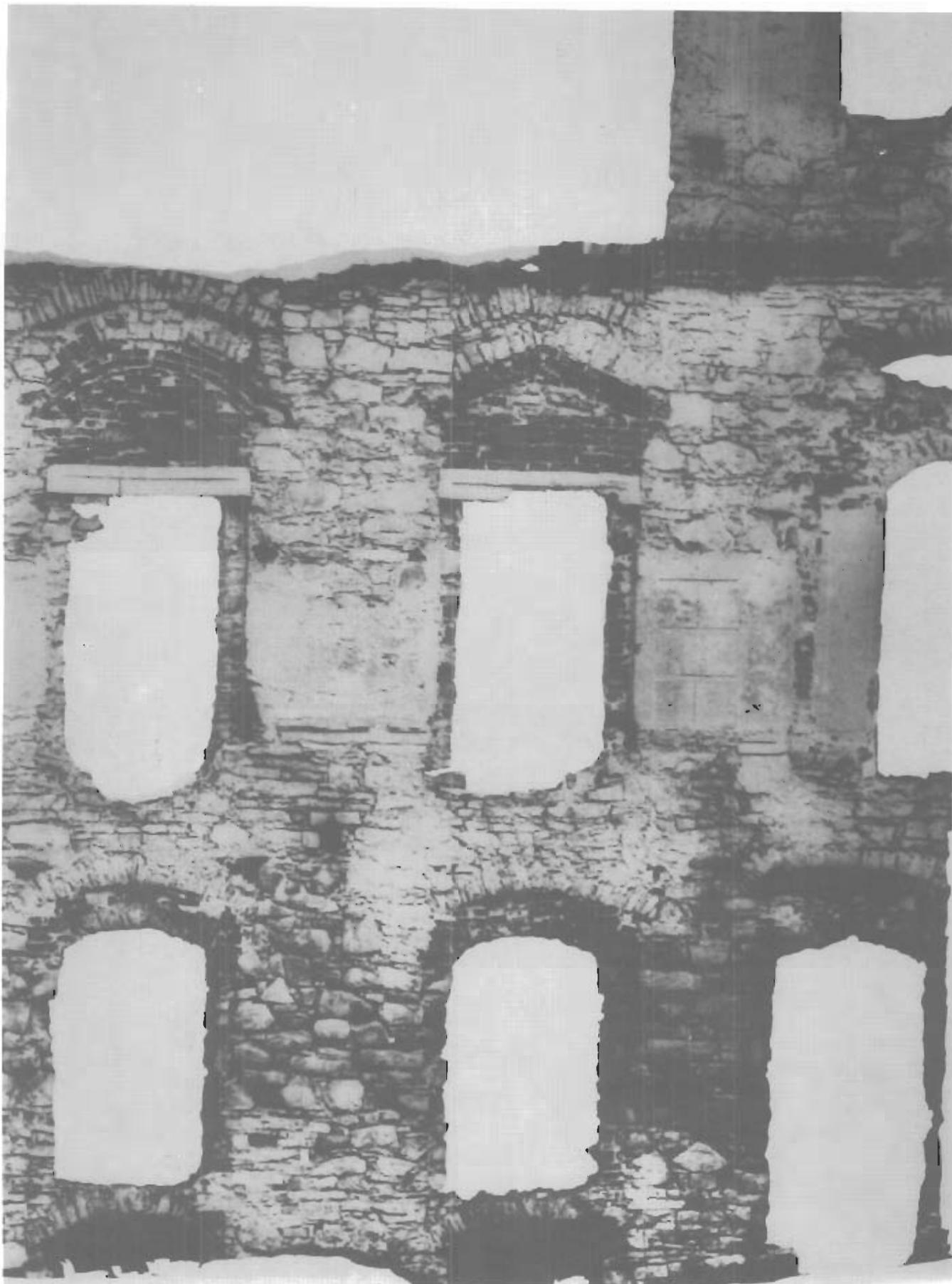


Abb. A/3 Ujasd/Polen; Mauer, Ausschnitt
Orthophoto (Orthophot B, on-line)
Universität Krakau

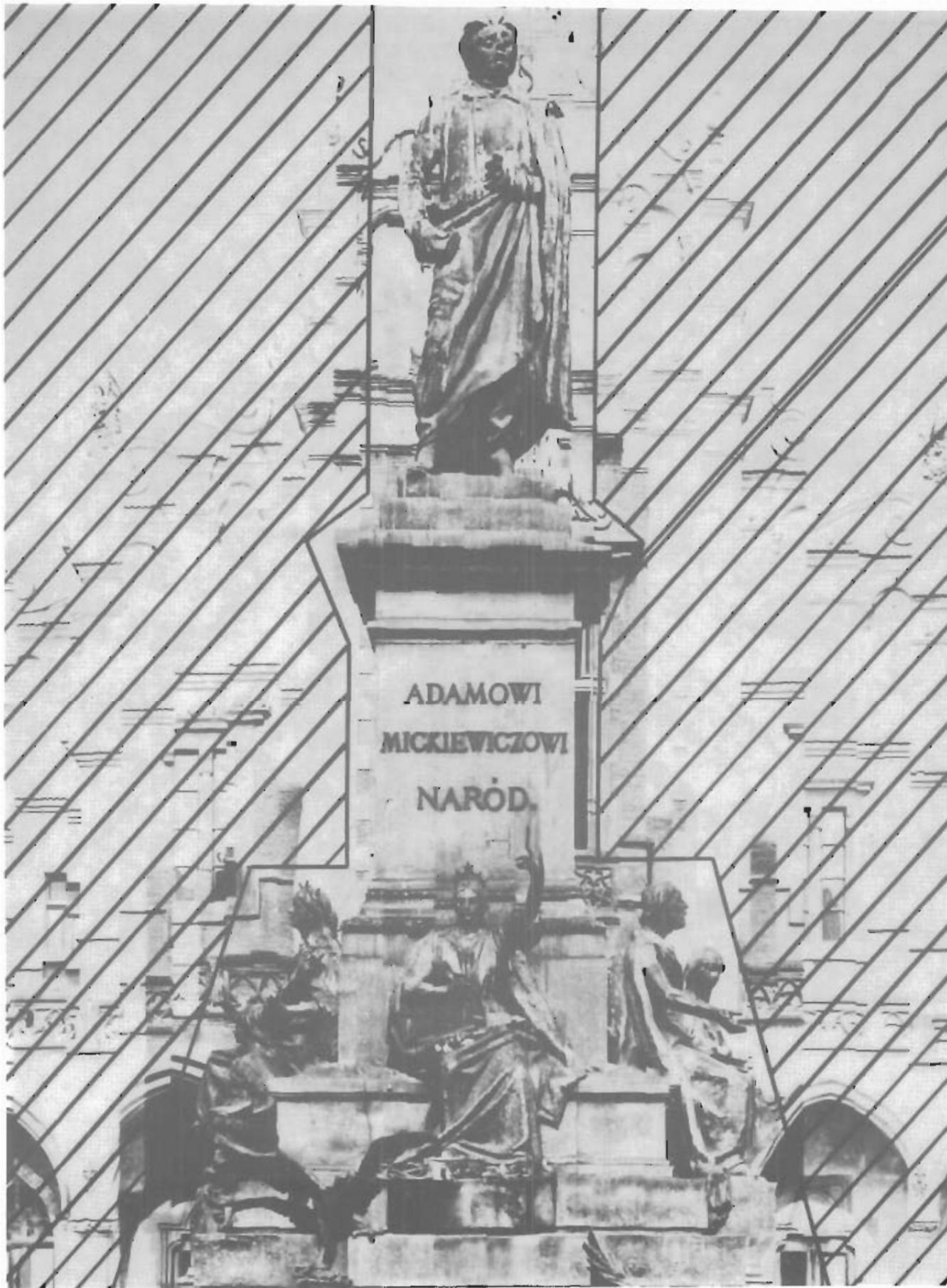


Abb. A/4 Krakau/Polen; Monument
Orthophoto (Orthophot B, on-line)
Universität Krakau

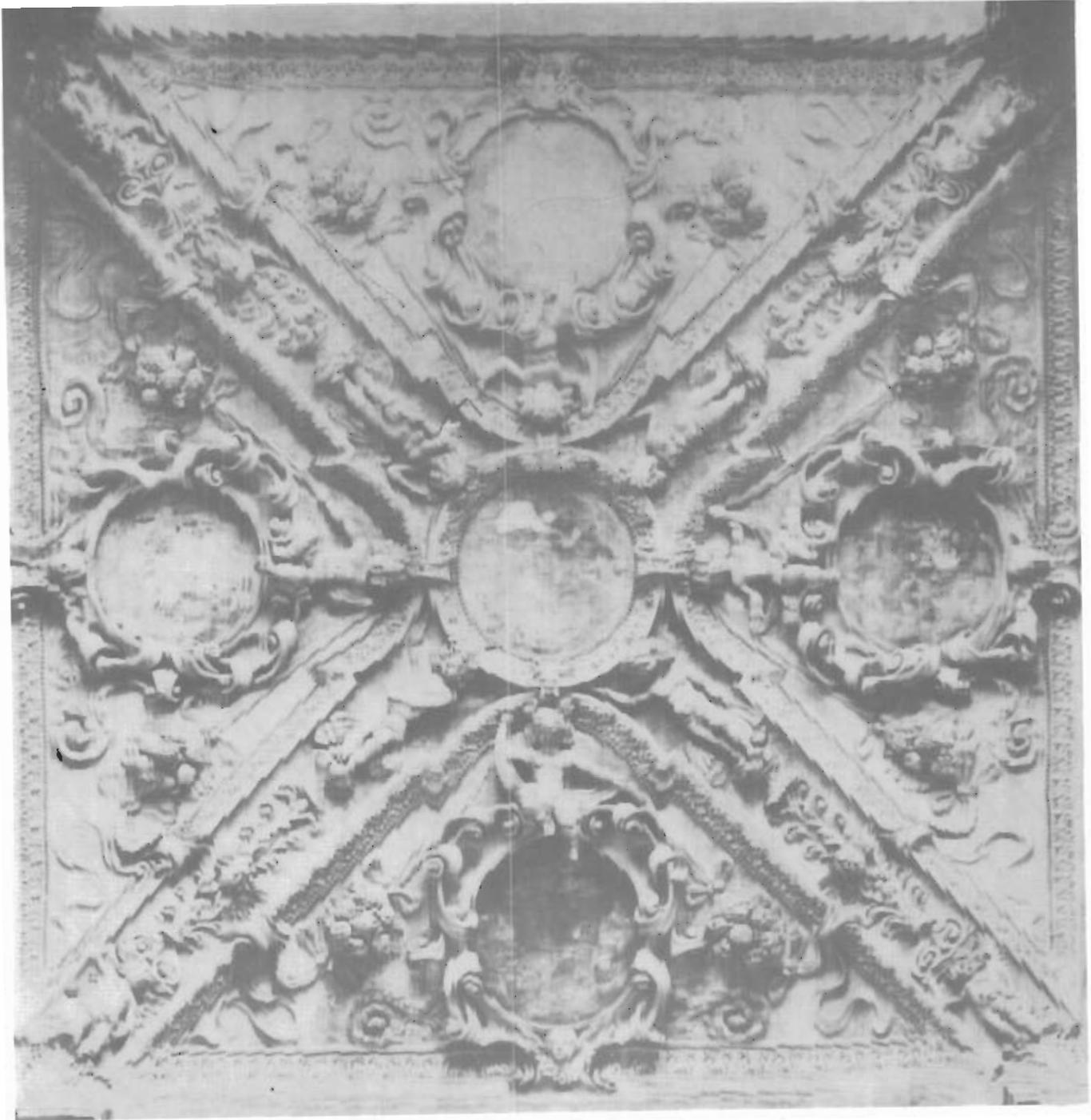


Abb. A/5 Krakau/Polen; Kirche, Stuckdecke
Orthophoto (Orthophot B, on-line)
Universität Krakau

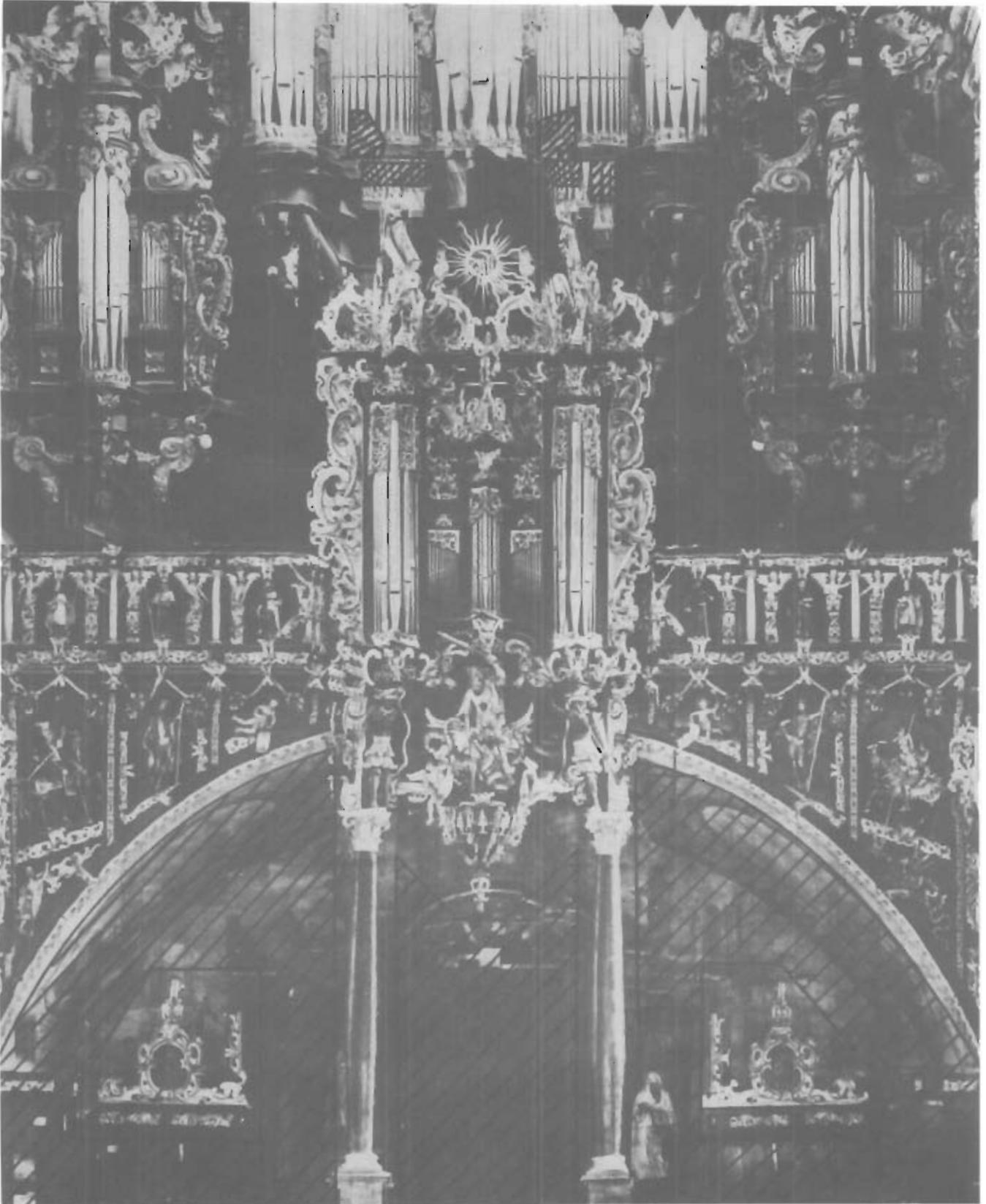


Abb. A/6 Leżajsk/Polen; Kirche, Orgelprospekt
Orthophoto (Orthophot B, on-line)
Universität Krakau - Warschau

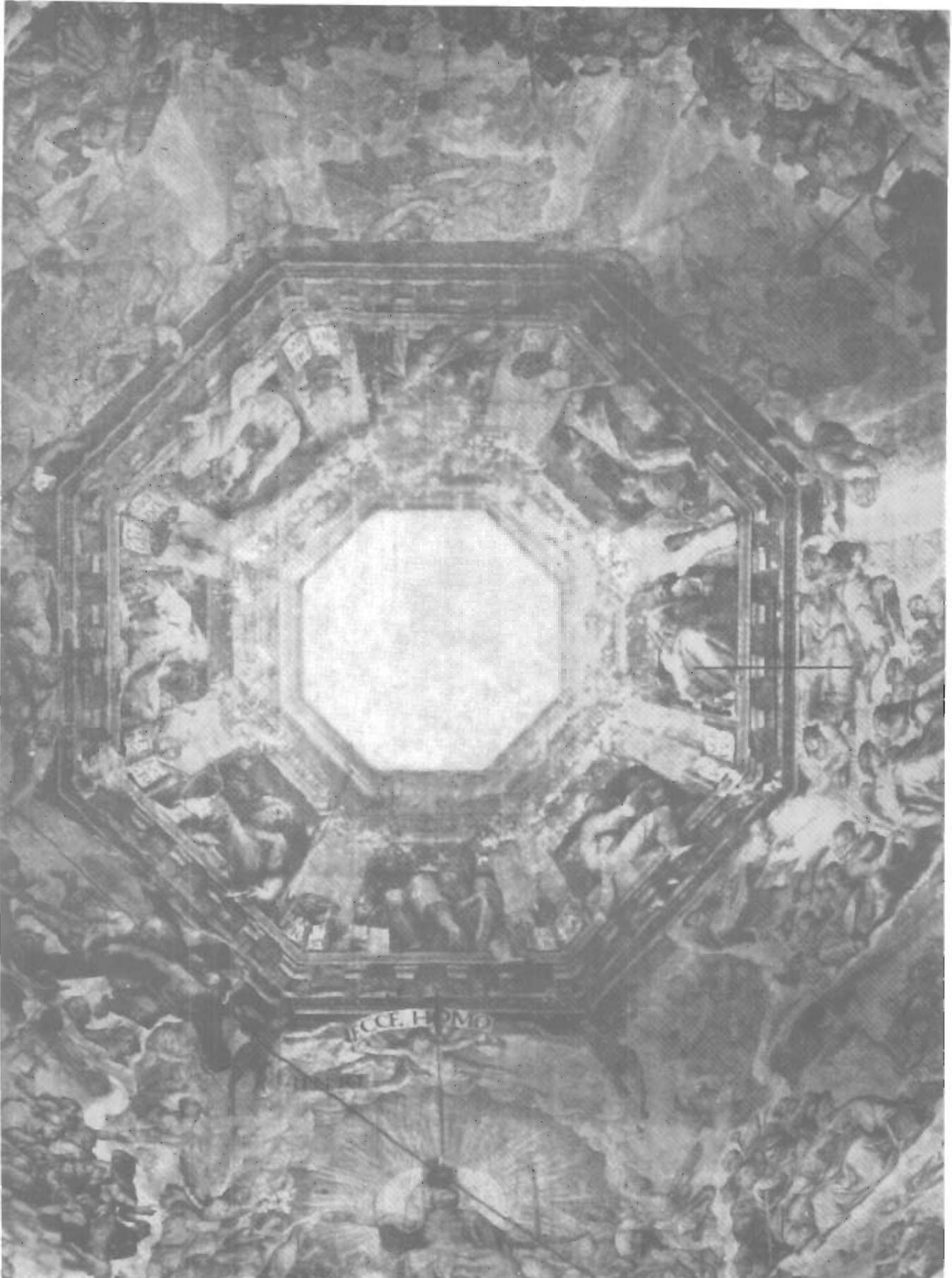


Abb. A/7 Florenz/Italien; Kirche St. Maria del Fiore, Kuppel
Orthophoto (Orthophoto-Simplex, on-line)
Officine Galileo

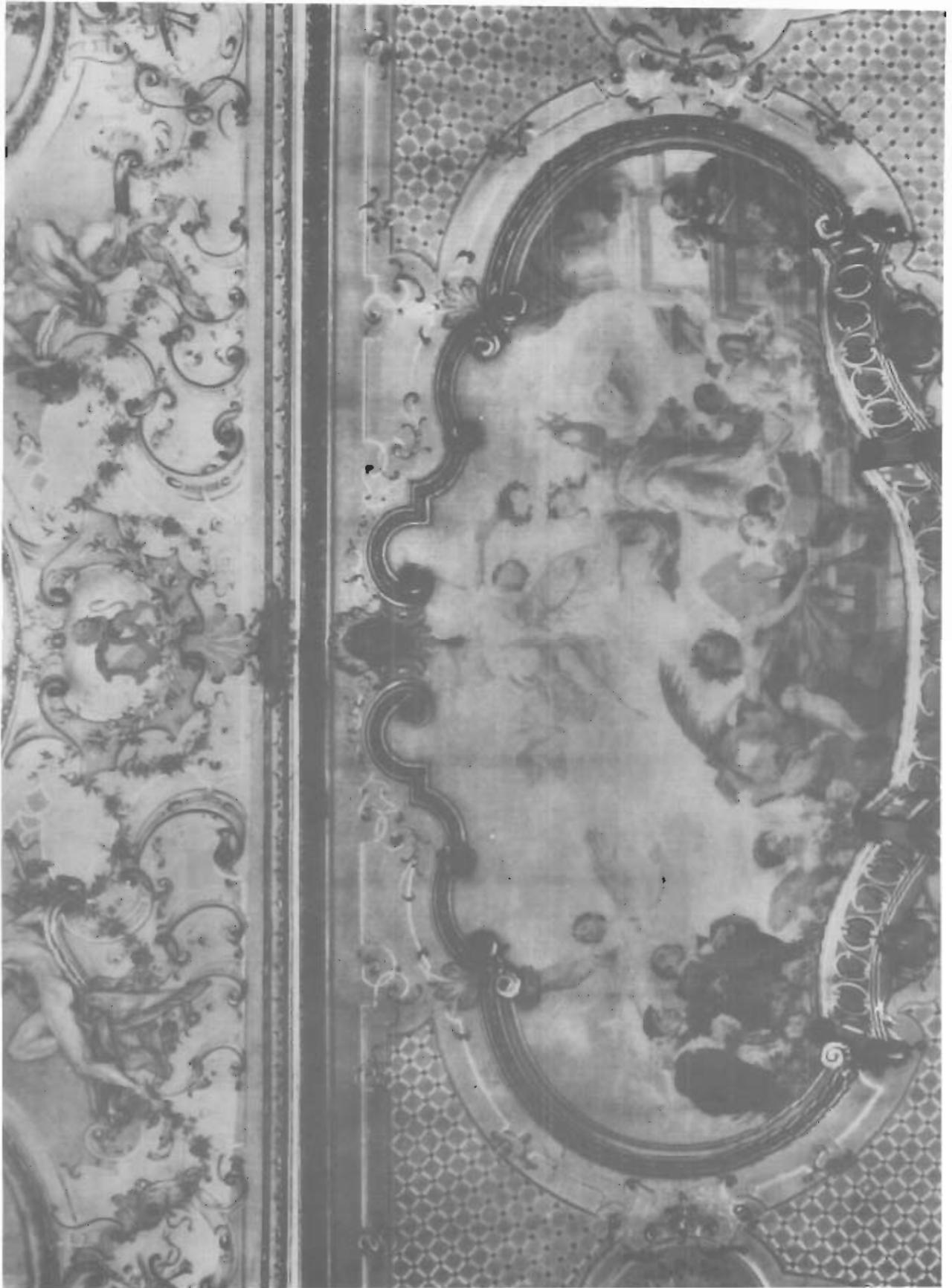


Abb. A/8 Zürich/Schweiz; Opernhaus, Decke; Orthophoto (GZ 1, off-line); De Waal / Hansa Luftbild

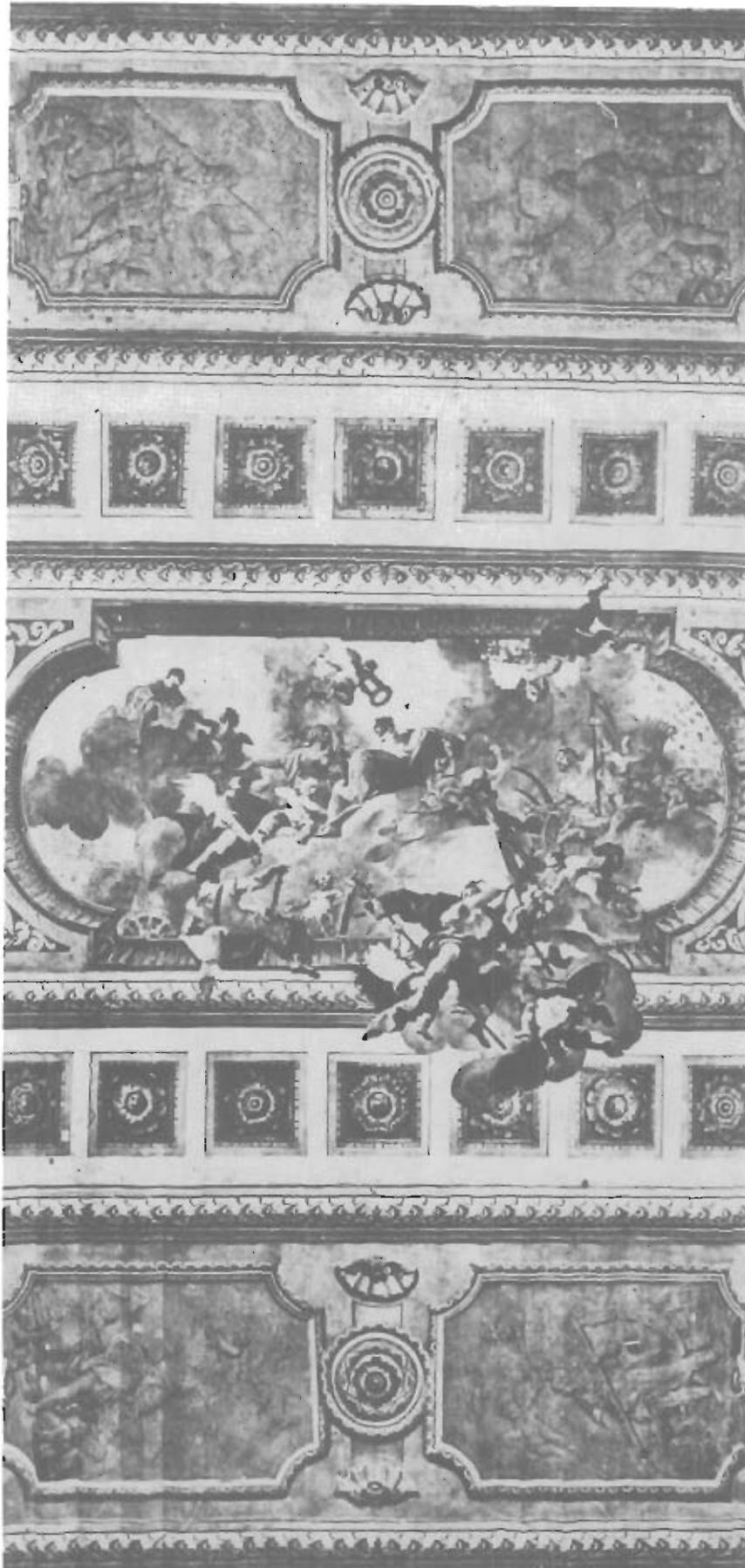


Abb. A/9 Wien/österreich; Nationalbibliothek,
Decke, Orthophoto (GZ 1, off-line)
Bundesdenkmalamt Wien / Institut für
Angewandte Geodäsie Frankfurt



Abb. A/10 Belgrad, Jugoslawien; Kalemegdan, Festung
Orthophoto (PPO 8, on-line)
Universität Belgrad

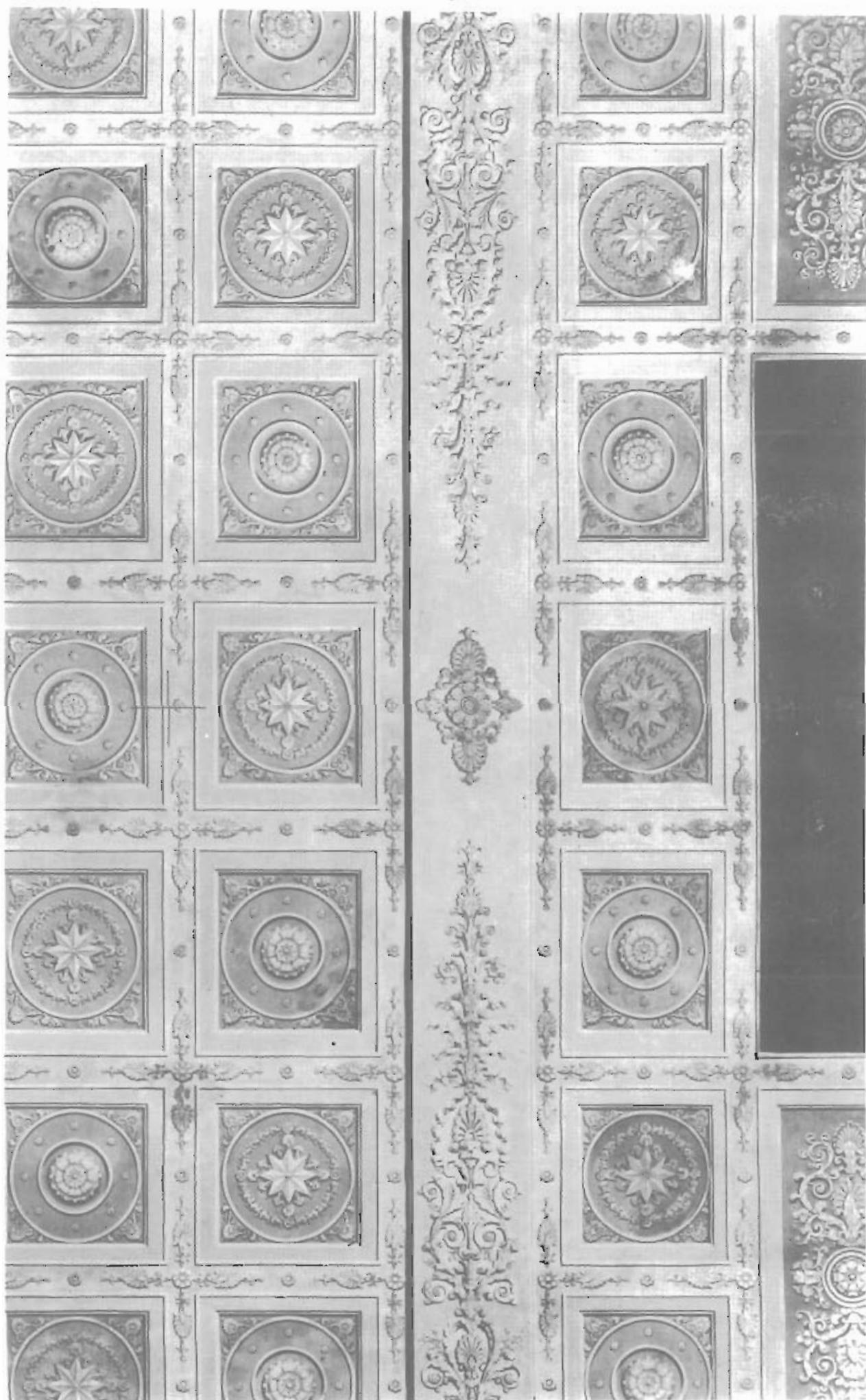


Abb. A/11 Wien/österreich; Schottenstift, Decke; Photographische Abwicklung (OR 1, off-line);
Universität Wien



Abb. A/12 Wien/Österreich; Schottenstift, Decke; Photographische Abwicklung (OR 1, off-line);
Universität Wien

A N H A N G B

Abbildungen B/1 bis B/12

Eigene Orthophotos



Abb. B/1 Eltingen; Fachwerkhhaus
Orthophoto (GZ 1, on-line)
Universität Stuttgart



Abb. B/2 Stuttgart; Klassizistische Fassade
Orthophoto (GZ 1, on-line)
Universität Stuttgart

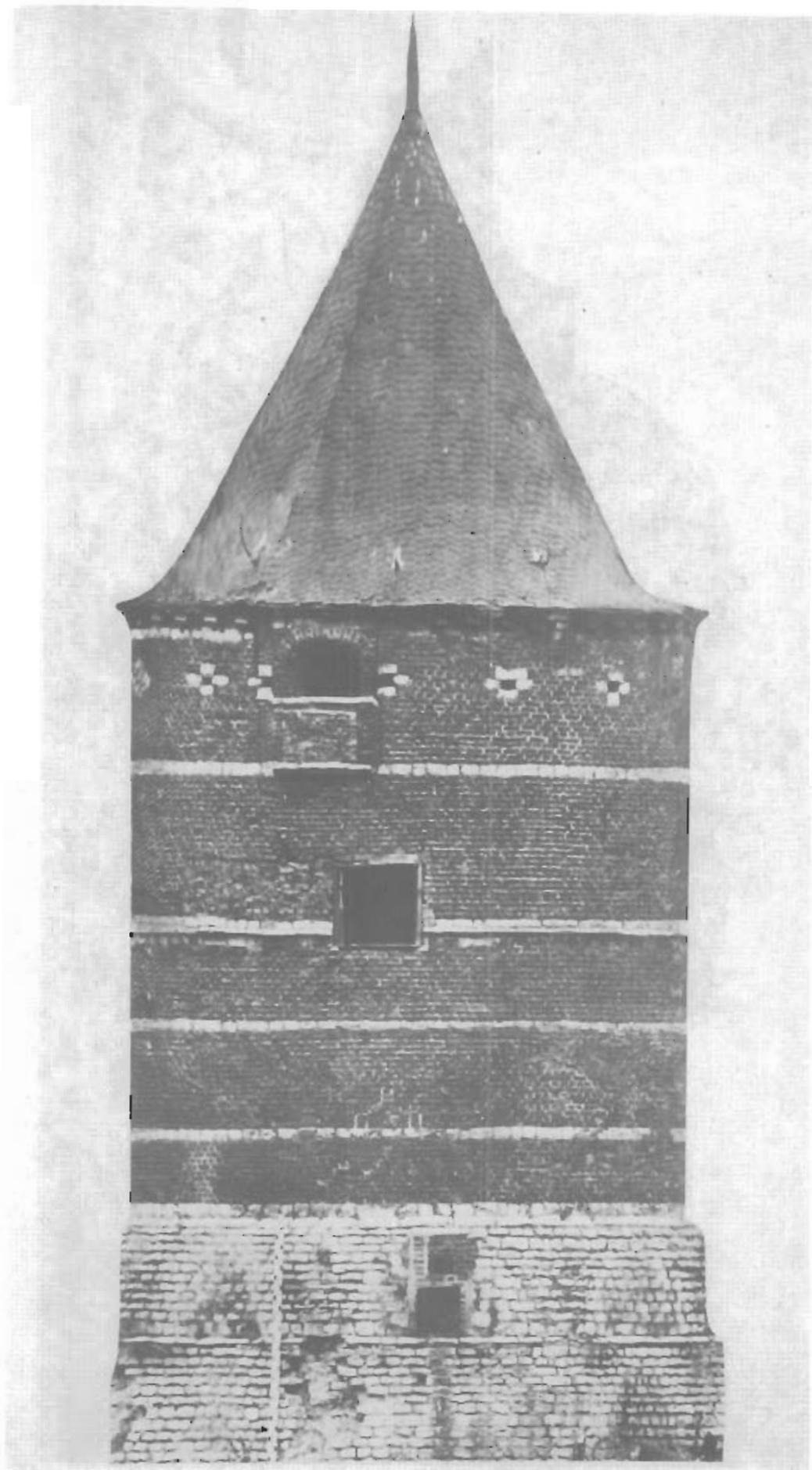


Abb. B/3 Mechelen/Belgien; Taubenturm
Orthophoto (GZ 1, off-line)
Universität Stuttgart

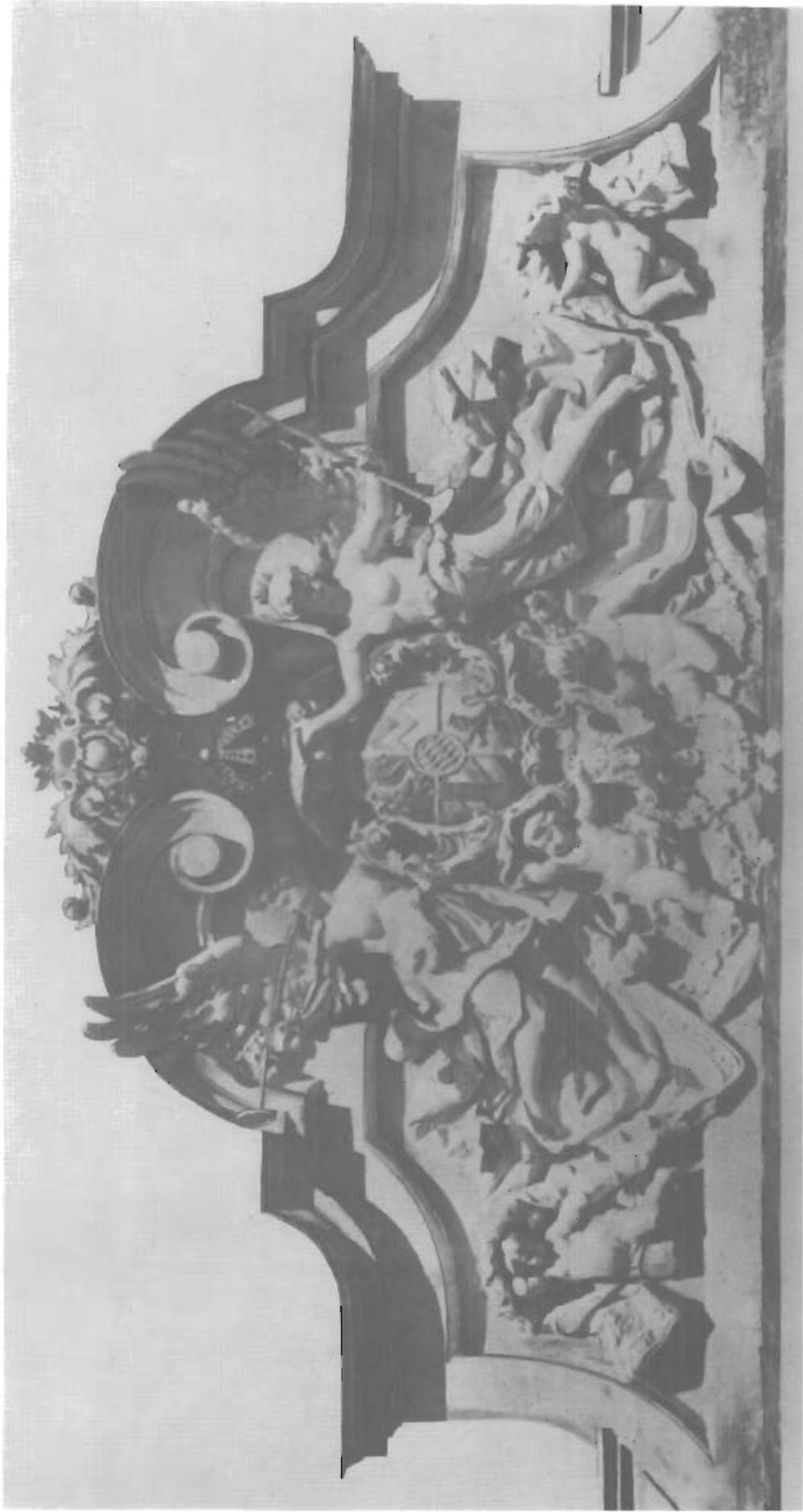


Abb. B/4 Schloß Linderhof, Südgiebel; Orthophoto (GZ1, on-line); Universität Stuttgart

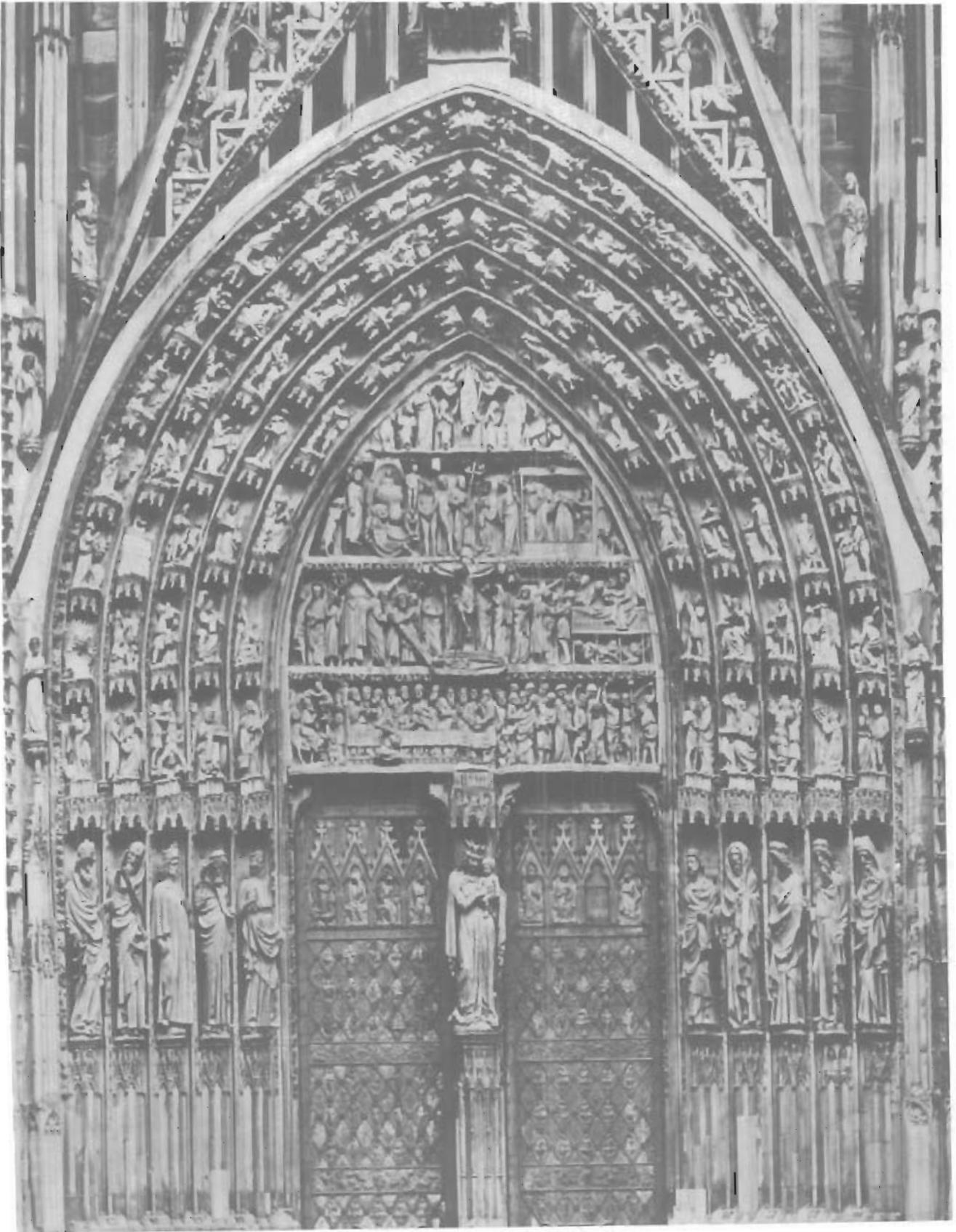


Abb. B/5 Straßburg/Frankreich; Münster, Hauptportal
Orthophoto (GZ 1, off-line)
Universität Stuttgart

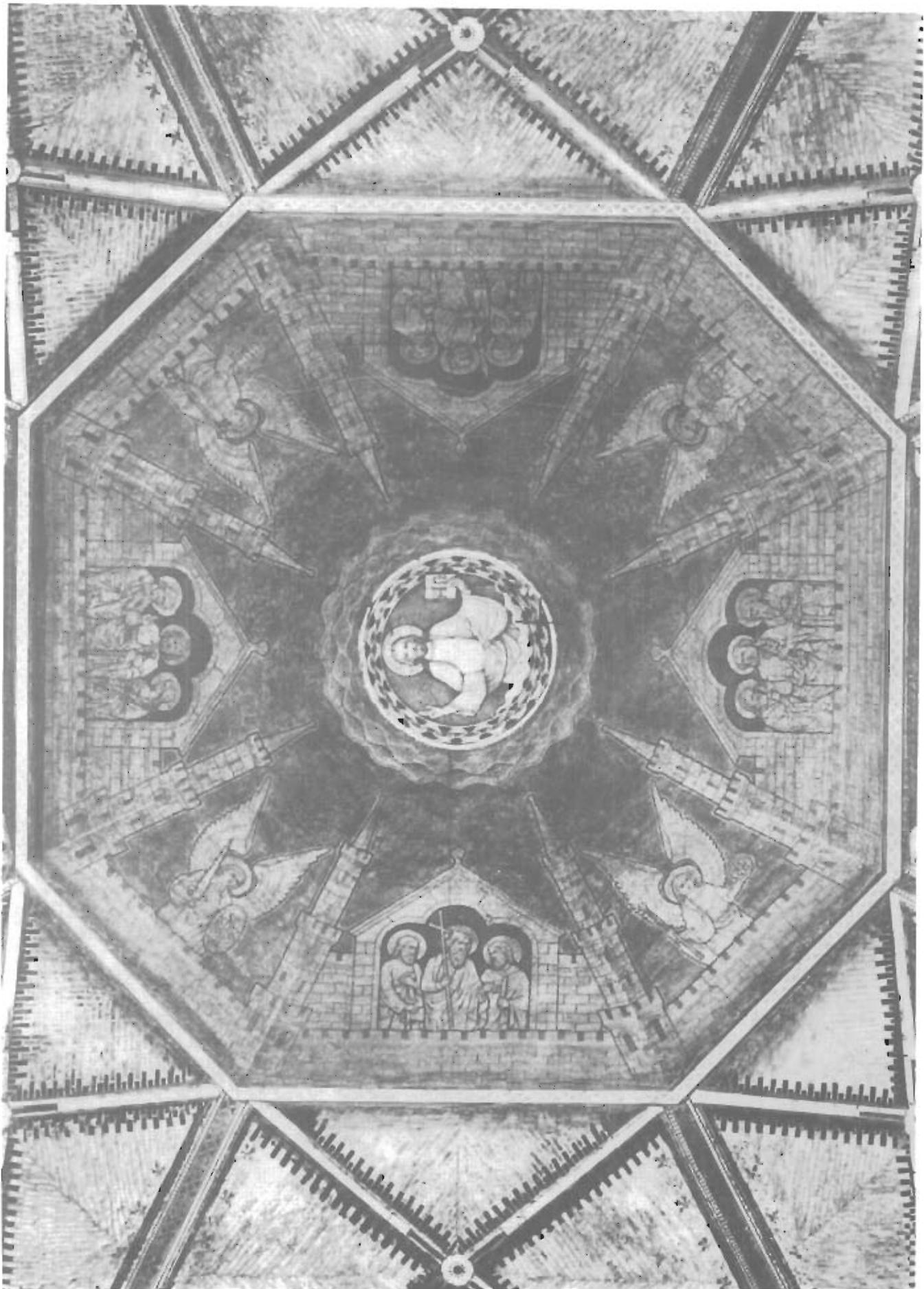


Abb B/6 Amsterdam/Niederlande; Vondelkerche, Decke
Orthophoto (GZ 1, on-line)
Universität Stuttgart



Abb. B/7 Ettal; Klosterkirche, Decke; Orthophoto (GZ 1, off-line); Universität Stuttgart



Abb. B/8 Ottobeuren; Klosterkirche, Westkuppel
Orthophoto (GZ 1, on-line)
Universität Stuttgart



Abb. 6/9 **Ottobeuren**; Klosterkirche, Hauptkuppel
Orthophoto (GZ 1, off-line)
Universität Stuttgart



Abb. B/10 Schloß Linderhof; Speisezimmer,
Wandansicht; Orthophoto (GZ 1, off-line)
Universität Stuttgart

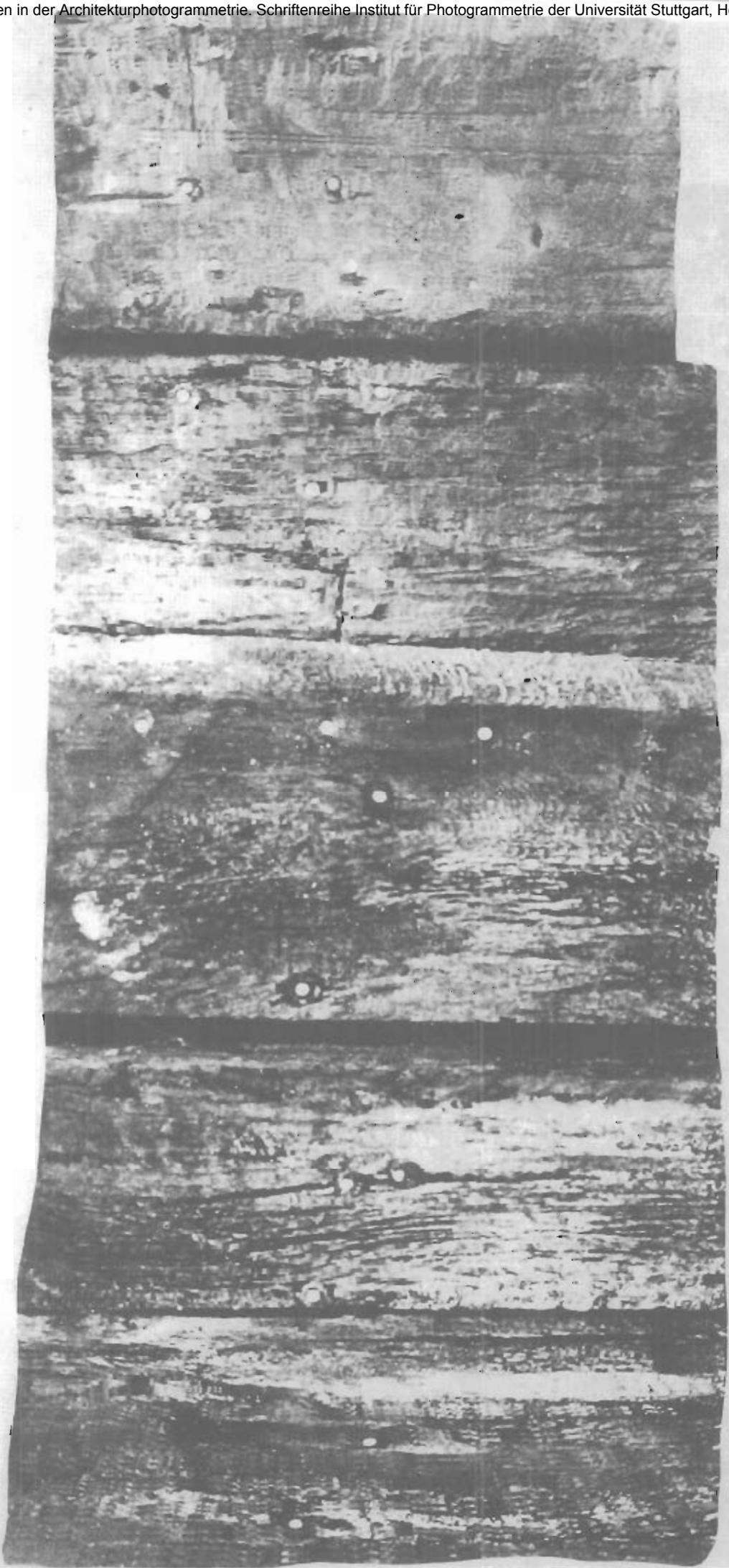


Abb. B/11a Hastings/England; Schiffsrumpf, außen; Orthophoto (GZ 1, on-line);
Universität Stuttgart

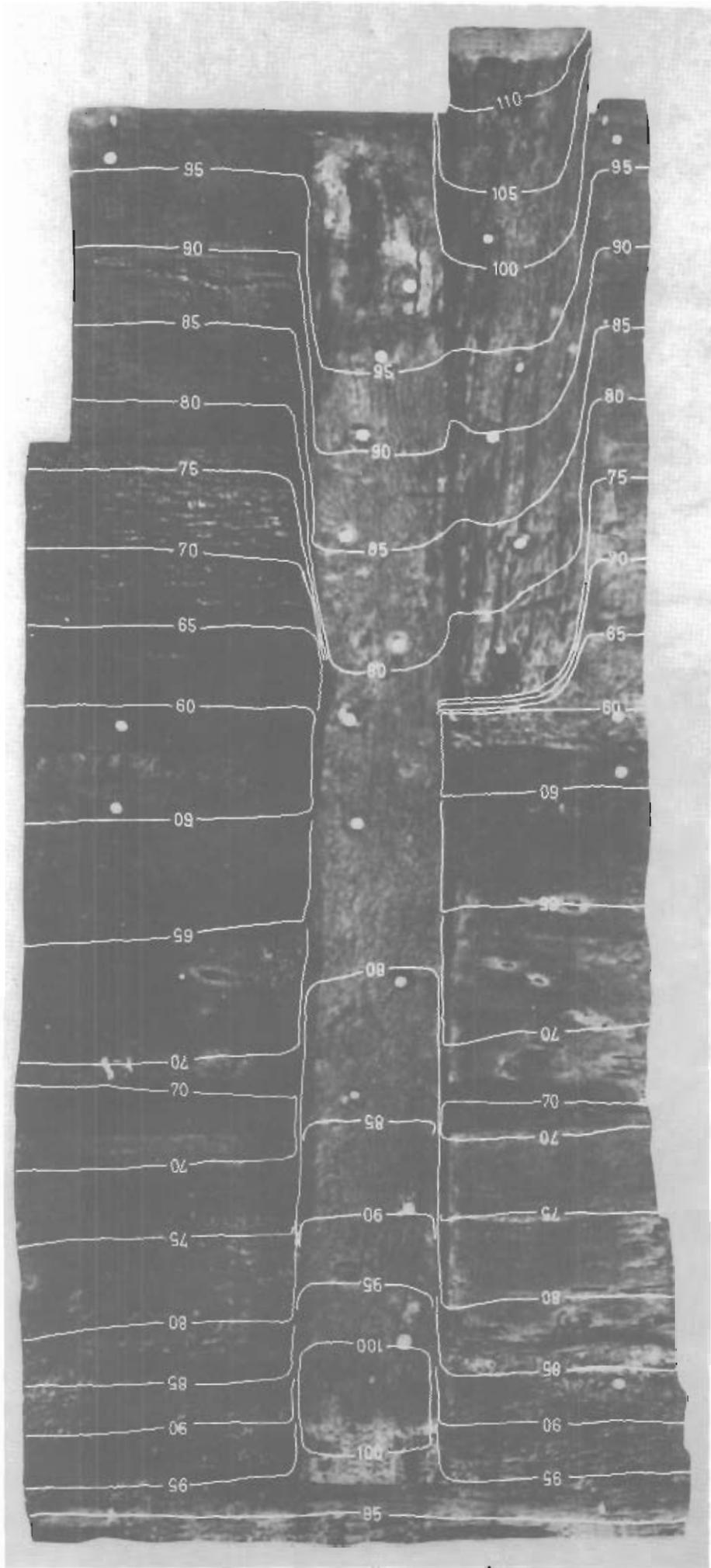


Abb. B/11b Hastings/England; Schiffsrumpf, innen; Orthophoto (GZ 1, on-line),
Schichtlinien in (cm) am Objekt; Universität Stuttgart

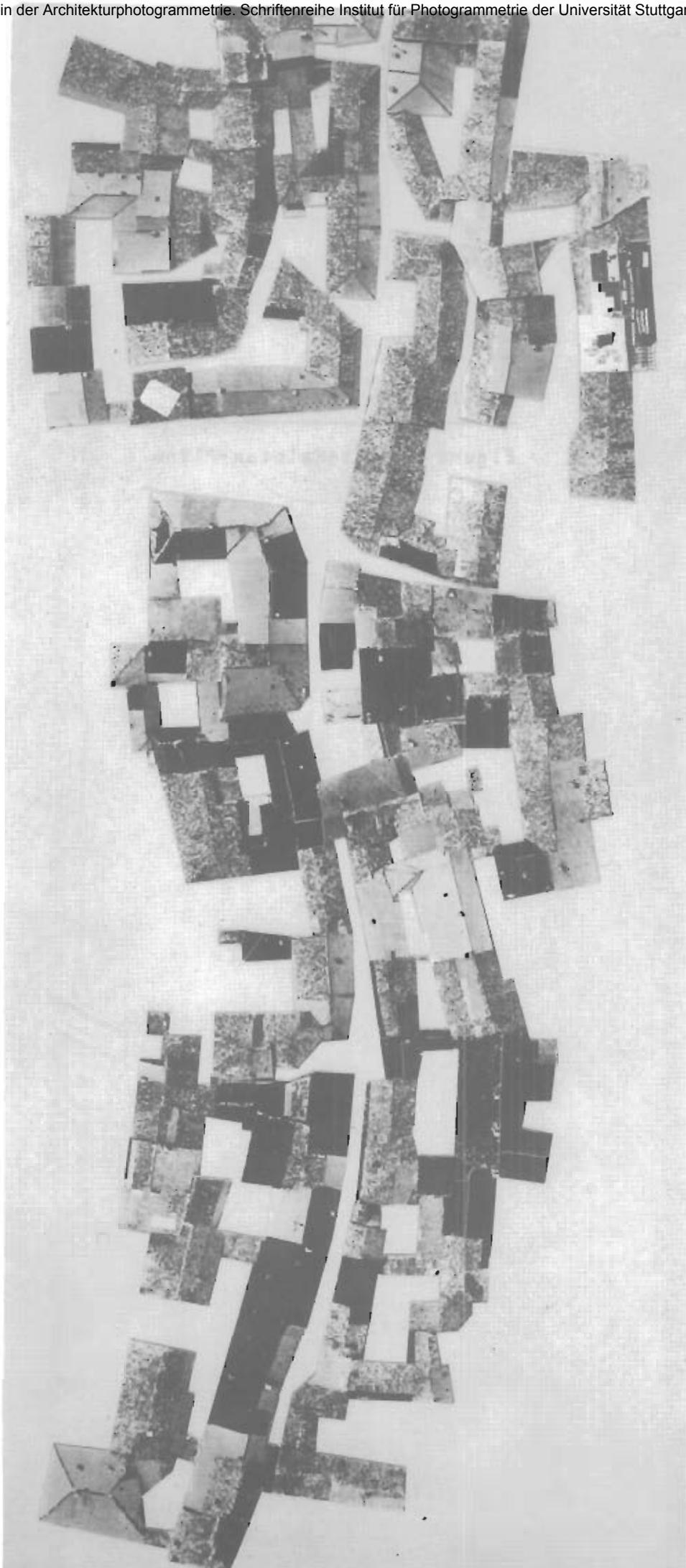


Abb. B/12 Meride/Schweiz; Dachlandschaft; Orthophoto der Dachzonen (GZ 1, on-line);
Universität Stuttgart

A N H A N G C

Abbildungen C/1 bis C/7

Eigene Strich-Halbton-Pläne

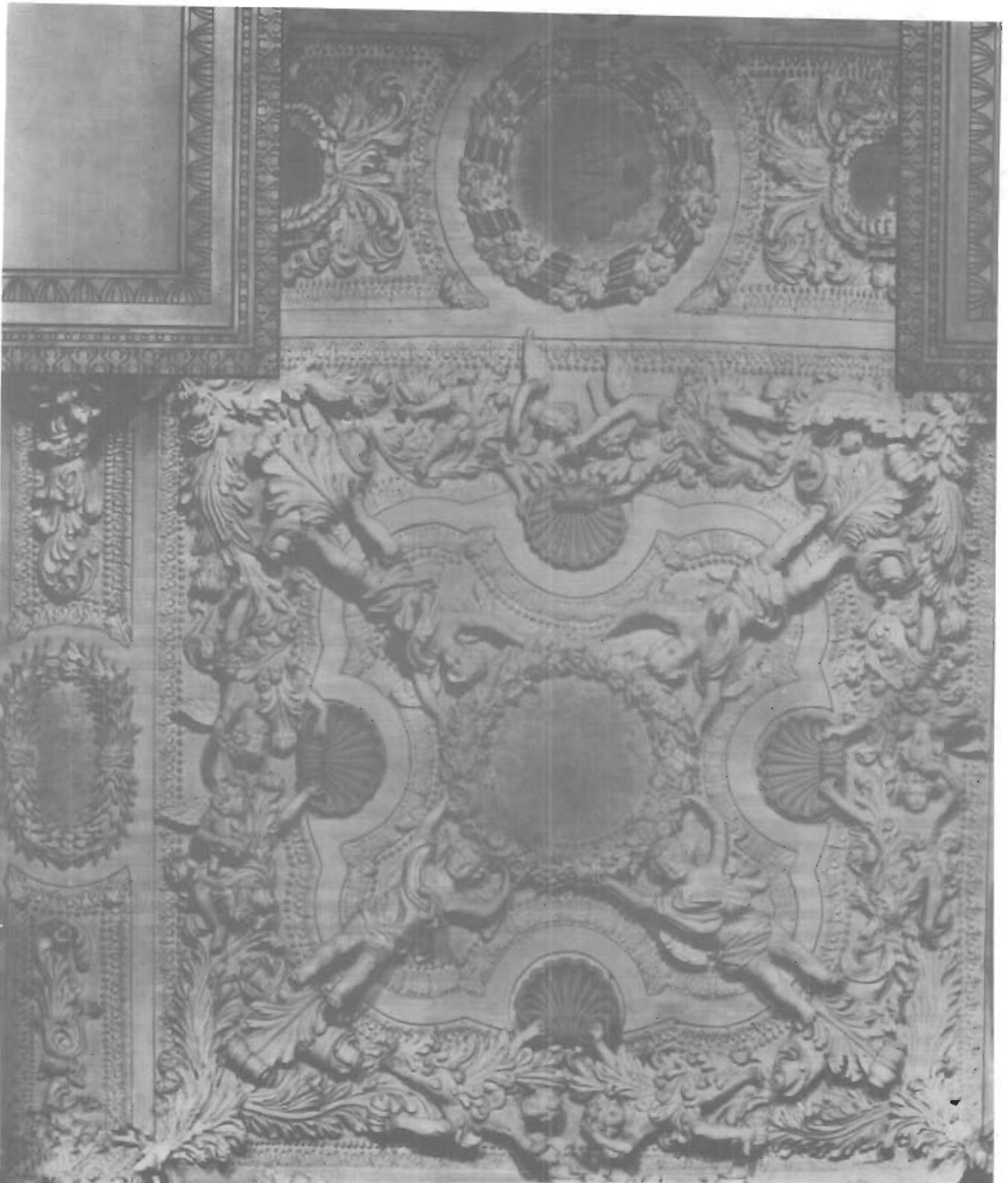


Abb. C/1 Ellwangen; Schönenbergkirche, Stuckdecke
Orthophotokarte (GZ 1, off-line)
Universität Stuttgart



Abb. C/2 Oberstenfeld; Kirche, Apsis
Orthophotokarte (GZ 1, on-line)
Universität Stuttgart

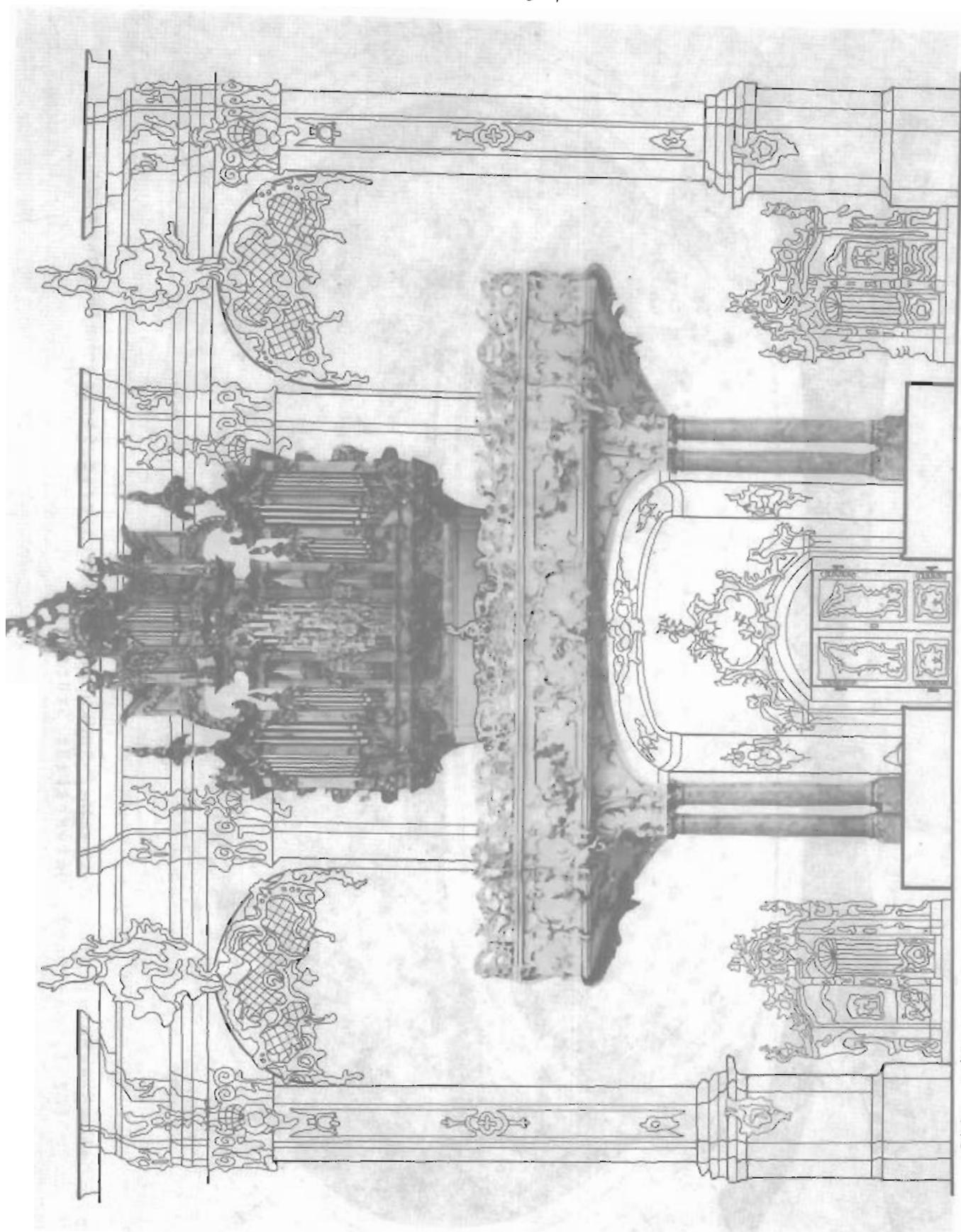


Abb. C/3 Ettal; Klosterkirche, Orgelprospekt; Kombinierte Strich-Halbtonekarte (GZ 1, off-line), Universität Stuttgart

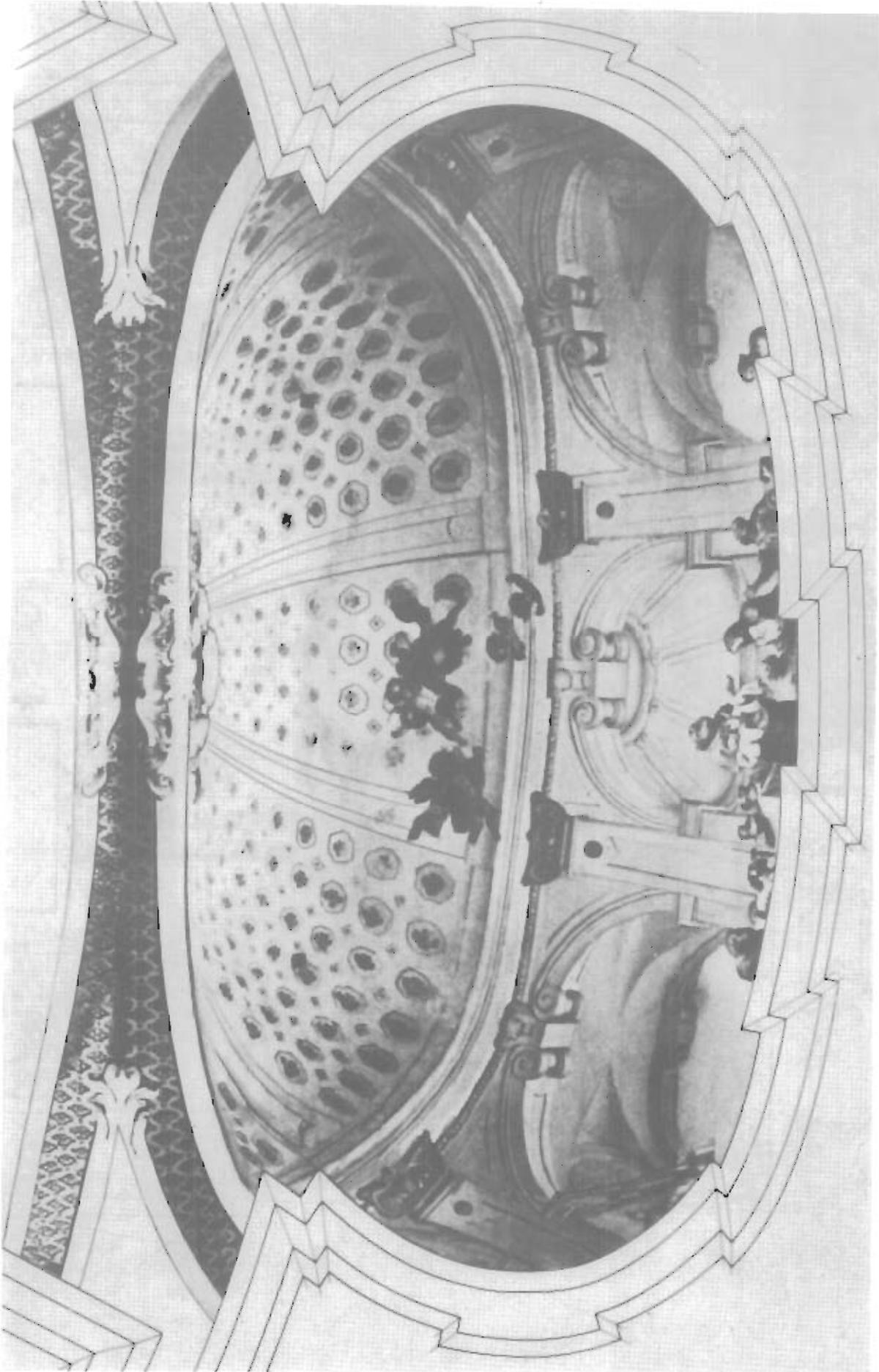


Abb. C/4 Neresheim; Klosterkirche, Südkuppel; Kombinierte Strich-Halbtonekarte
(GZ 1, on-line), Universität Stuttgart

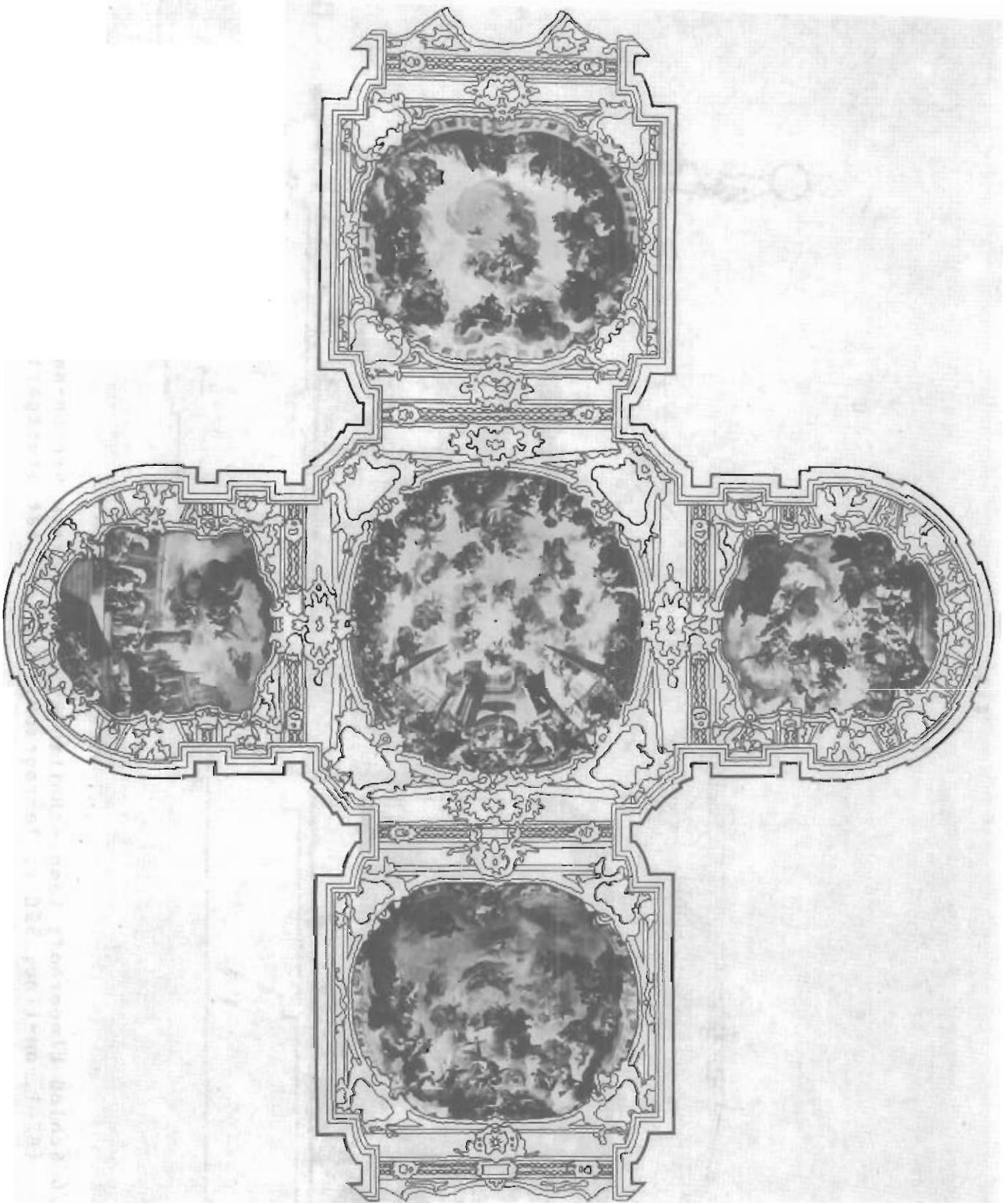


Abb. C/5 Ottobeuren; Klosterkirche, Deckenansicht
Kombinierte Strich-Halbtonekarte
Universität Stuttgart

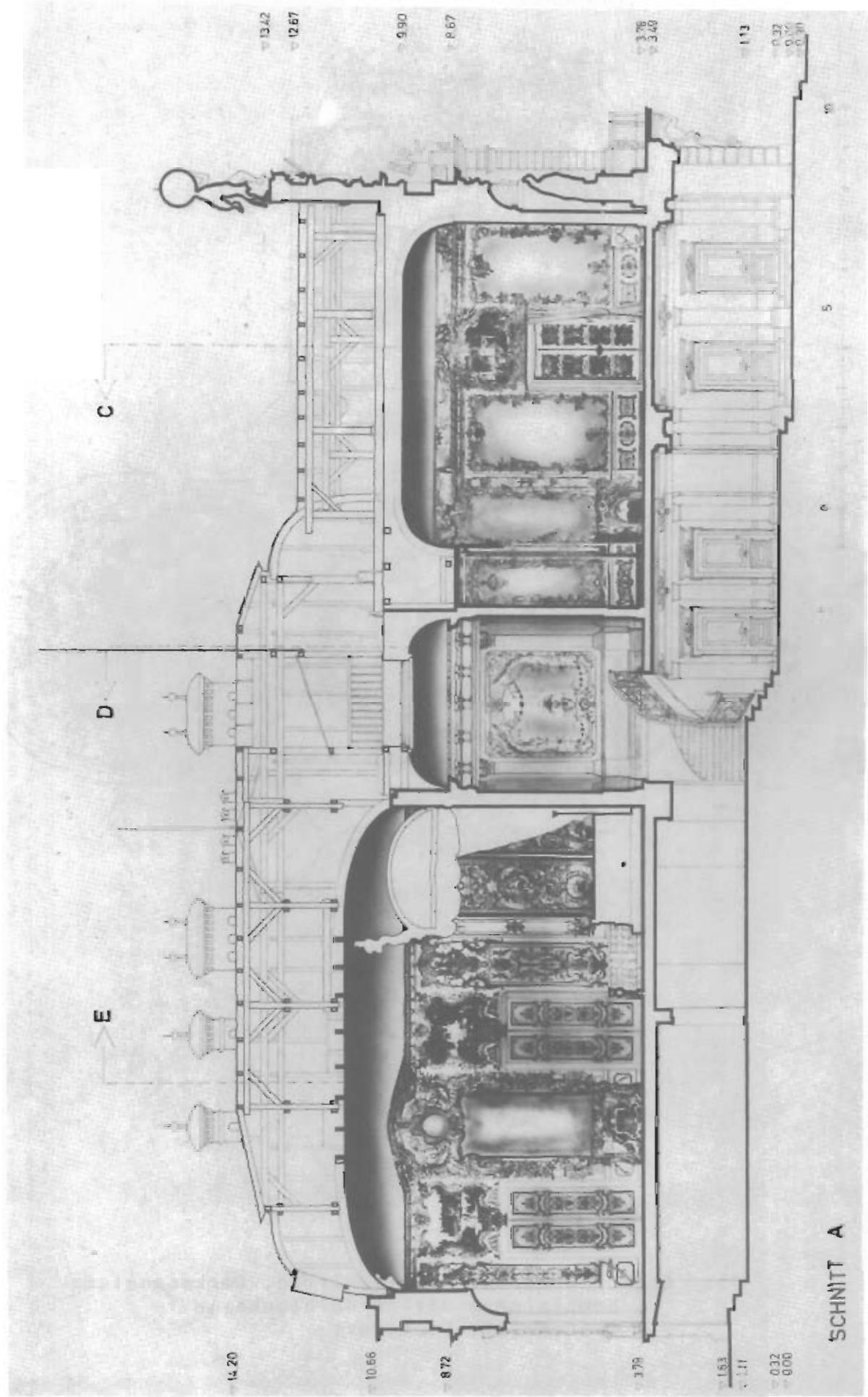


Abb. C/6 Schloß Linderhof; Längsschnitt "A"; Kombinierte Strich-Halbtonekarte (GZ 1, on-line, SEG V, Terragraph), Universität Stuttgart

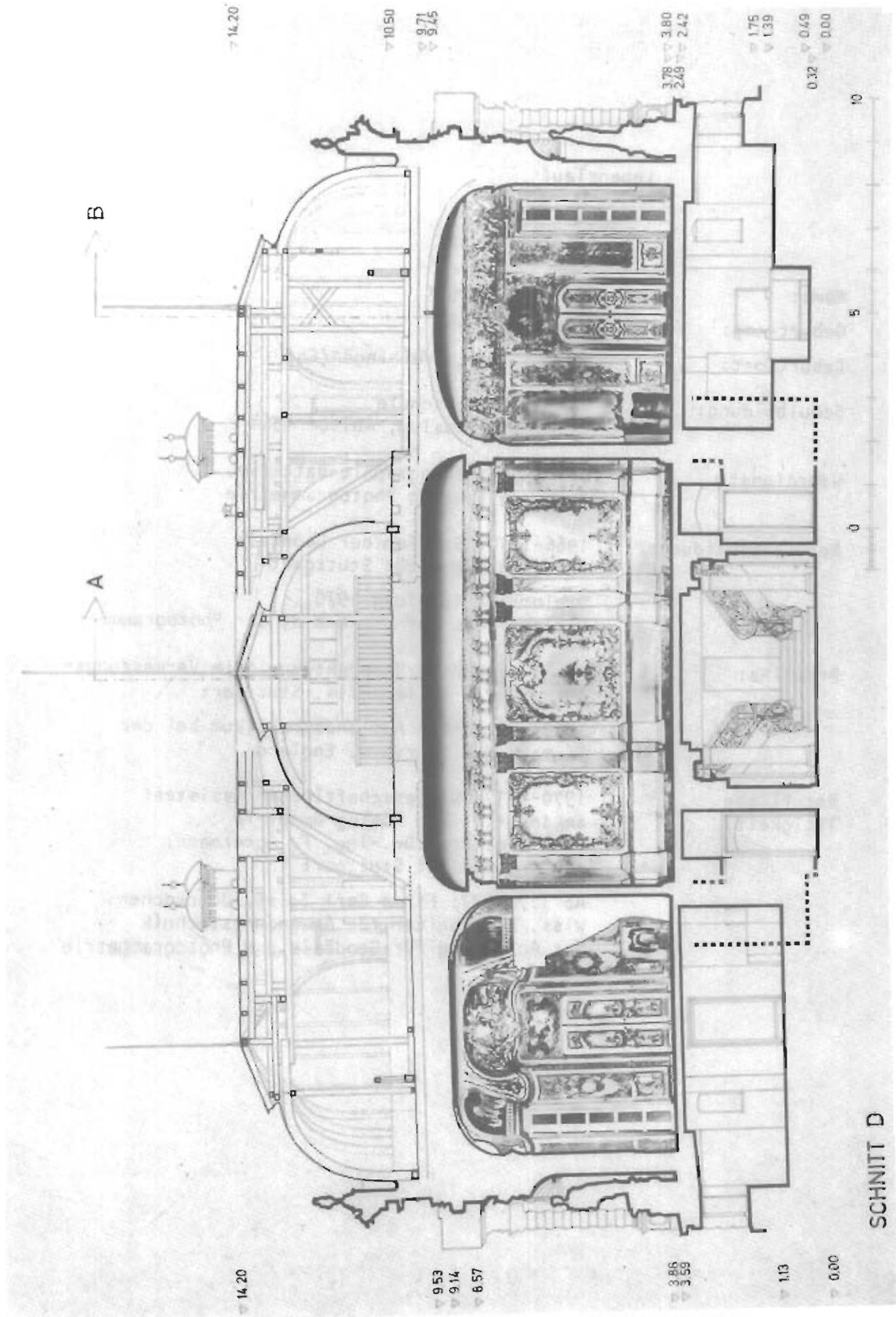


Abb. c/7 Schloß Linderhof, Querschnitt "D"; Kombinierte Strich-Halbtonekarte (GZ 1, on-line, SEG V, Terragraph), Universität Stuttgart

Lebenslauf

Name: Eberhard Seeger

Geburtstag: 18. März 1945

Geburtsort: Schmie, Kreis Vaihingen/Enz

Schulbildung: 4 Jahre Volksschule
9 Jahre Gymnasium, Abitur 1964

Wehrdienst: 1964-1966: Topographie-Batterie, Ulm
Fachausbilder in Photogrammetrie

Berufsausbildung: 1966-1970: Studium der Geodäsie
an der Universität Stuttgart
Diplom-Hauptprüfung 1970,
Diplomarbeit auf dem Gebiet der Photogrammetrie

Praktika: 1964: 6 Monate Vorpraktikum beim Vermessungs-
Büro (öbVI) Roller-Hils, Stuttgart
1969: 2 Monate Auslandspraktikum bei der
Firma B.K.S. Surveys, England

Berufliche Tätigkeit: 1970-1977: Wissenschaftlicher Assistent
am Institut für Photogrammetrie
(Leitung: Prof.Dr.-Ing. F. Ackermann)
der Universität Stuttgart
Ab 1.7.1977: Firma Carl Zeiss, Oberkochen,
Wiss. Mitarbeiter für Anwendungstechnik
der Abteilung für Geodäsie und Photogrammetrie