

Die geometrische Leistungsfähigkeit von Trommelscannern - Anspruch und Wirklichkeit -

Frank Boochs

Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn

BR Deutschland

Comm. II

1. Einleitung

In vielen Bereichen der Naturwissenschaften wie auch der Medizin werden die Vorteile der bildhaften Erfassung von Objekten, Zuständen und anderen Informationsträgern genutzt. Grundlage für die Entscheidung zugunsten von Meßaufnahmen - bzw. Bildern allgemein - ist die hohe geometrische und physikalische Informationsdichte. Nachteil dieser Datenvielfalt ist allderdings der gleichzeitig bei weitgehender Auswertung des Inhaltes entstehende Aufwand.

Die in der jüngeren Vergangenheit rasante Fortentwicklung der elektronischen Datenverarbeitungstechnik ermöglicht jedoch zunehmend auch den Einsatz in den mit bildhaften Daten arbeitenden Disziplinen. Die Bilder werden dazu in eine für den Rechner verständliche Form gebracht und anschließend auf vielfältige Weise verarbeitet.

Die Bereitstellung von digitalen Bilddaten, d.h. von zahlenmäßig codierten optischen Dichtewerten erfolgt entweder direkt im Prozeß der Aufnahme, wie z.B. in vielen Bereichen der Fernerkundung oder durch eine irgendwann später erfolgende Analog-Digitalwandlung eines auf herkömmlichen Film gespeicherten Bildes. Hierfür werden geeignete Geräte benötigt, von denen der Trommelscanner einen weit verbreiteten Bautyp darstellt.

Die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Bildern sind sehr vielschichtig. Dementsprechend verändert sich die Bedeutung, die den Komponenten der im Bild enthaltenen Informationen beizumessen ist. Im vorliegenden Fall steht der geometrische Informationsgehalt im Vordergrund, da die digitalen Meßbilder einem Korrelationsprozeß zugeführt werden. Derartigen Auswerteprozessen haftet eine eigene Empfindlichkeit gegenüber Störungen des geometrischen Aufbaus der Bilder an, womit hohe Anforderungen an die geometrische Abtastgüte der Scanner gestellt werden. Die Notwendigkeit, die geometrische Stabilität der digitalen Bilder kennen zu müssen, hat auch gleichzeitig den Anstoß für die vorgelegten Untersuchungen gegeben.

Charakteristisch für die folgenden Untersuchungen ist die Tatsache, daß die Betrachtungen genau an den für die Korrelation vorgesehenen Bildern durchgeführt worden sind. Dies hat den Vorteil, die dem einzelnen Bild anhaftenden Fehler im späteren Auswertevorgang berücksichtigen zu können, jedoch gleichzeitig den Nachteil, keinen speziell auf die Beurteilung der Abtastgeometrie abgestimmten Bildinhalt (Kontrastumfang, Form und Verteilung der Kontrollpunkte) zur Verfügung zu haben.

2. Zum Prinzip eines Trommelscanners

Für die Digitalisierung bildhafter Vorlagen werden prinzipiell Analog-Digitalwandler eingesetzt, von denen Trommel- und Flachbettscanner die weiteste Verbreitung finden. Trommelscanner zeichnen sich im Vergleich durch eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit aus, wodurch auch großformatige Bilder in vertretbaren Zeiten (z.B. 0.ⁿ5) abgetastet werden können. Dies ist sicherlich einer der wesentlichen Gründe, weshalb diese Bautypen in Photogrammetrie und Fernerkundung hauptsächlich zum Einsatz kommen.

In Abb.1 ist der Aufbau eines solchen Gerätes schematisch dargestellt. Charakteristisch ist dabei zunächst einmal ein Hohlzylinder auf dessen Mantelfläche das abzutastende Bild montiert ist. Je nach Ausführung kann der Zylinder offen sein (Optronics), das Bild wird dann am Rand längs der Trommelachse von Klammern gehalten, oder die Mantelfläche besteht aus einem Glaskörper (Joyce Loeb1), auf den das Bild mit Klebestreifen befestigt wird. Im Innern des Zylinders ist eine Lichtquelle (L) angebracht, die radial nach außen abstrahlt und den Film beleuchtet. Auf der Außenseite ist eine Optik mit einem Sensor (S) installiert, die das kleine beleuchtete Filmseg-

ment ausmißt. Die Zerlegung des Bildes in Zeilen und Spalten erfolgt durch Bewegung von Bild und Optik. Die Trommel des Scanners rotiert, wobei eine an den Drehwinkel gekoppelte elektronische Steuerung für die Zerlegung des abgetasteten Streifens (Bildzeile) in einzelne Elemente sorgt. Die Optik wird durch Drehung einer Schraubenwelle längs der Zylinderachse inkrementell verschoben, woraus die verschiedenen Bildzeilen entstehen.

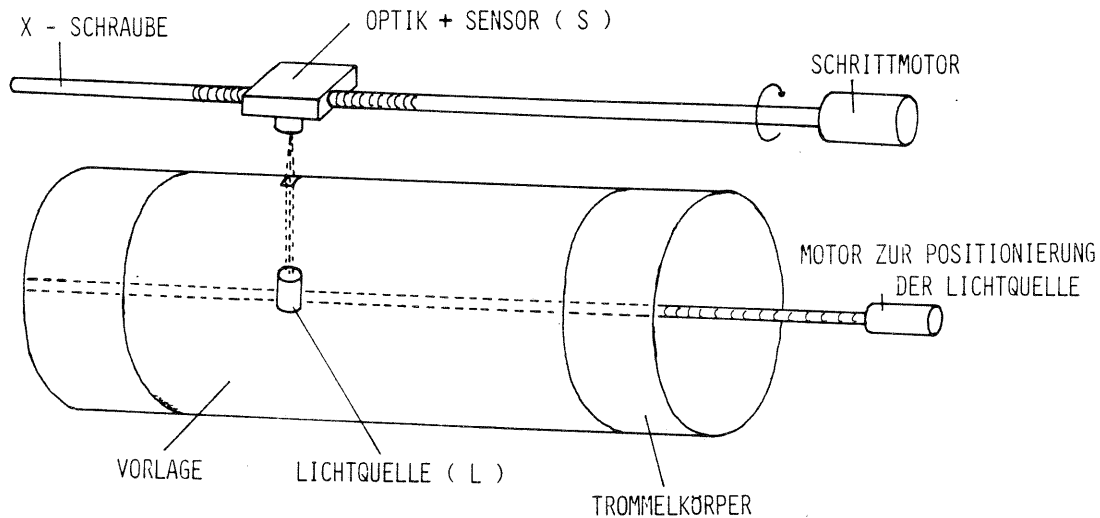


Abb.1 Prinzip eines Trommelscanners

Die geometrische Auflösung, d.h. die Größe der Bildelemente (Pixel) kann zwischen 12.5 und $200 \mu\text{m}$ eingestellt werden. Berücksichtigt man die hohe mögliche Auflösung, so müßte auch die geometrische Stabilität in vergleichbaren Größen liegen.

Geht man von den Angaben der Hersteller aus, dann ist die Genauigkeitsleistung von Trommelscannern auch über jeden Zweifel erhaben. Die aus Firmenprospekten hervorgehenden Zahlen sprechen von Positioniergenauigkeiten bis zu $2.0 \mu\text{m}$, und auch die Maximalfehler sollen über das gesamte Format (23cm)² hinweg weniger als $50 \mu\text{m}$ betragen. Erstaunlicherweise stimmen diese Werte ziemlich genau mit den in der Literatur zu findenden Daten über die Anforderungen an die Genauigkeitsleistung von Scannern /Thompson, Ouellette 1972; Hinchliffe 1978/ überein. Die Vermutung, daß hiermit Anspruch und Leistung erfolgreich zur Deckung gebracht worden sind, ist jedoch falsch. Die immer wieder durchgeführten Genauigkeitsanalysen der Betreiber solcher Einrichtungen kommen zu anderen Ergebnissen /Johannsen 1976; Schäfer 1978; Lichtner 1981/. Faßt man die Resultate dieser Untersuchungen zusammen, so können folgende Fehlerquellen genannt werden:

- Maßstabsunterschied in x- und y-Richtung
- Schiefe zwischen Trommelachse und Bewegungsrichtung der Optik
- Unregelmäßigkeiten längs der Trommelachse
- Andruckfehler

Die Ursachen der Maßstabsfehler liegen entweder in der Arbeitsweise des Stepmotors, der die Positionierung entlang der Trommelachse übernimmt, oder in Abweichungen der Folienstärke vom angenommenen Maß. Die Fehler sind jedoch regelmäßig und lassen sich durch geeignete Transformationsansätze (affin) kompensieren. Gleiches gilt für die aus der Achsschiefe resultierenden maßstäblichen Änderungen. Wie aus Untersuchungen von /Schäfer 1978/ hervorgeht, können sich die Maßstabsunterschiede in x- und y-Richtung auf 0.23% belaufen. Dies entspricht einer Abweichung von ca. 11 Pixeln im Bildformat ($4600 \text{ Pixel} \times 50 \mu\text{m}$). Die Unregelmäßigkeiten längs der Achse können von Fehlern der Spindel herrühren (Teilungsfehler, Spiel zwischen Spindel und Schnecke, Verbiegungen der Spindel). Je nach Ursache sind die Fehler systematisch oder zufäl-

tiger Natur. Genaue Angaben über das Ausmaß werden jedoch nicht gemacht sowie auch keine Gegenmaßnahmen empfohlen werden.

Der Andruckfehler wird von den am Trommelrand angebrachten und die Filmränder fixierenden Halteklauen ausgelöst. Die tangentielle Wirkung der von den Andruckschienen ausgehenden Kräfte führt zu einer Verbiegung der Filmoberfläche. Dies schlägt sich in Form von systematischen Fehlern am Bildrand nieder. Nach Schäfers Erkenntnissen sollten daher 1-2 cm des äußeren Randbereiches von den Auswertungen ausgespart bleiben.

Insgesamt sind einige Fehlerquellen aufgedeckt worden, deren schädigende Wirkung von den Autoren jedoch aufgrund des systematischen Charakters oder mittels einfacher Vorsichtsmaßnahmen als kompensierbar betrachtet worden ist.

Im Zusammenhang mit der geometrischen Auswertung der hier verwendeten Aufnahmen sind allerdings Fehler aufgetreten, die auf unregelmäßige Störungen der Geometrie in den digitalen Bildern schließen ließ. Aus diesen Grund scheint eine örtlich differenzierte Untersuchung der Bildgeometrie angebracht zu sein.

3. Beschreibung der Meßanordnung

Die Überprüfung der Bildgeometrie erfolgte anhand von Kontrollpunkten. Diese sind im digitalen sowie in dem als Digitalisierungsvorlage dienenden analogen Meßbild bestimmt worden. Die Messung der analogen Bildpunkte wurde am KOMESS 3030 vorgenommen, um eine für die Kontrolle ausreichende Genauigkeit in den Bezugskordinaten zu erhalten.

Die Lage der Punkte in den digitalen Bilder ist durch Auszählen der Zeilen und Spalten auf einem Papierplot geschehen. Bedingt durch die Arbeitsweise des Rasterplotters ist der Dichteumfang der als Messungsgrundlage dienenden Papierbilder allerdings stark eingengt. Die Identifizierung der Punkte ist damit zusätzlich erschwert. Da kein geeigneter graphischer Bildschirm zur Verfügung stand konnte jedoch kein anderer Weg beschritten werden.

Bei der Überprüfung der Geometrie digitalisierter herkömmlicher photogrammetrischer Meßbilder ist die Frage der Punktidentifizierung ohnehin ein zentrales Problem. Neben den Schwierigkeiten der Erkennung identischer Punkte im analogen und digitalen Bild kann aufgrund mangelnden Detailreichtums die Zahl und Verteilung der Kontrollpunkte zu einer in Teilbereichen nicht ausreichenden Beschreibung des geometrischen Aufbaus führen. So sind auch in den untersuchten Bildern nicht alle Flächenteile gleich dicht besetzt.

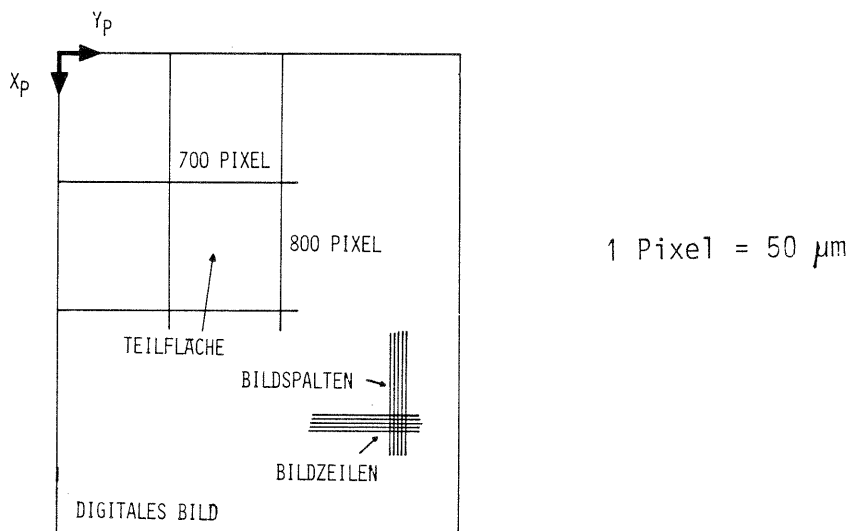


Abb. 2 Aufteilung der Bildfläche in einzelne Teilbereiche

Zur Erleichterung einer differenzierten Betrachtung der Fehlereinflüsse sind die Bilder in gleich große Teilflächen aufgeteilt worden, in denen jeweils eine, soweit möglich, gleich große Zahl von Stützpunkten festgelegt wurde (vgl. Abb.2). Die Verteilung der Punkte ist zur Begrenzung des Aufwandes auf den von beiden Meßbildern gemeinsam überdeckten Objektbereich (ca. 70%) beschränkt worden, da nur dieser für die beabsichtigte Modellauswertung von Bedeutung ist.

Die Zahl der Punkte lag bei ca. 240-250 pro Meßbild, von denen nach Elimination von Meß- und Identifizierungsfehlern je ca. 200 verblieben sind.

4. Transformationsergebnisse

Die Gegenüberstellung der gemessenen Kontrollpunkte erfolgte getrennt nach den beiden zur Digitalisierung herangezogenen Scannertypen (Optronics - Joyce Loeb1), die sich aufgrund ihrer bautechnischen Unterschiede (vgl. 1.) auch im Fehlerverhalten unterscheiden könnten.

Zunächst sind alle Punkte gemeinsam in die Berechnungen miteinbezogen worden. Die Transformationsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Außerdem sind die Restabweichungen für Bild 28 (Optronics) in den Abb. 3-5 wiedergegeben.

Wie zunächst aus dem Vergleich der unterschiedlichen Transformationsansätze hervorgeht, zeigen sich deutliche Gerätefehler, die einen affin-systematischen Charakter haben und sich mit einem entsprechenden mathematischen Ansatz kompensieren lassen (vgl. /Johannsen 1976; Schäfer 1978; Lichtner 1981/).

Transformation	Optronics		Joyce-Loebl	
	Bild 28	Bild 31	Bild 28	Bild 31
Helmert	61.3	56.8	31.0	36.4
Affin	22.3	19.6	16.2	18.8
Polynom (3.Grades)	18.4	15.8	14.1	15.8

Tabelle 1 Mittlere quadratische Restabweichungen an den Bildpunkten in μm

Allerdings unterscheiden sich die beiden Gerätetypen gravierend in ihrem Justierzustand, wie die Ergebnisse der Helmerttransformation ausweisen. Durch die Wahl komplexerer mathematischer Ansätze geht das Genauigkeitsgefälle zwar immer weiter zurück, es bleibt jedoch auch noch beim Polynom 3.Grades sichtbar. Wegen der schon

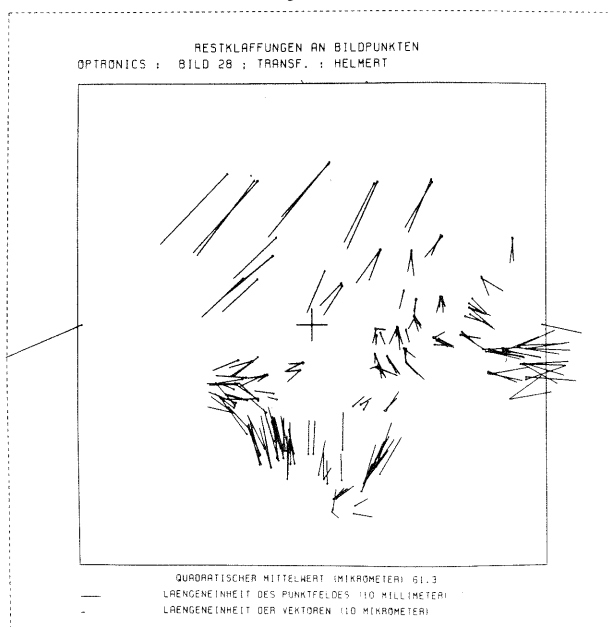


Abb. 3

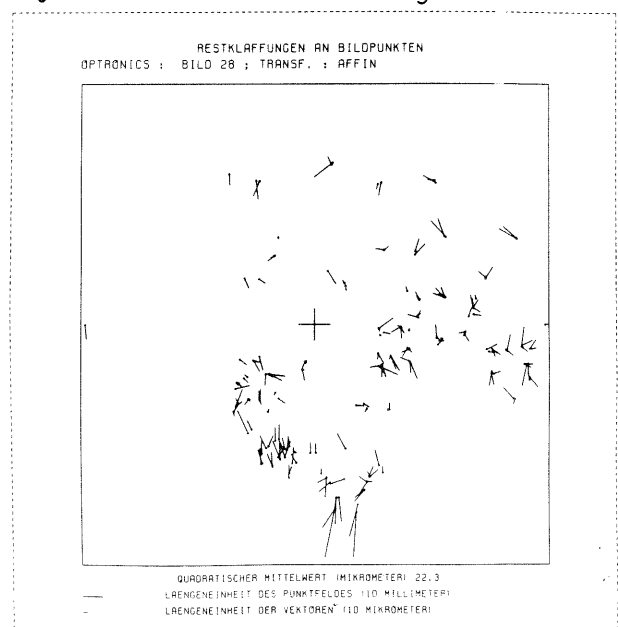


Abb. 4

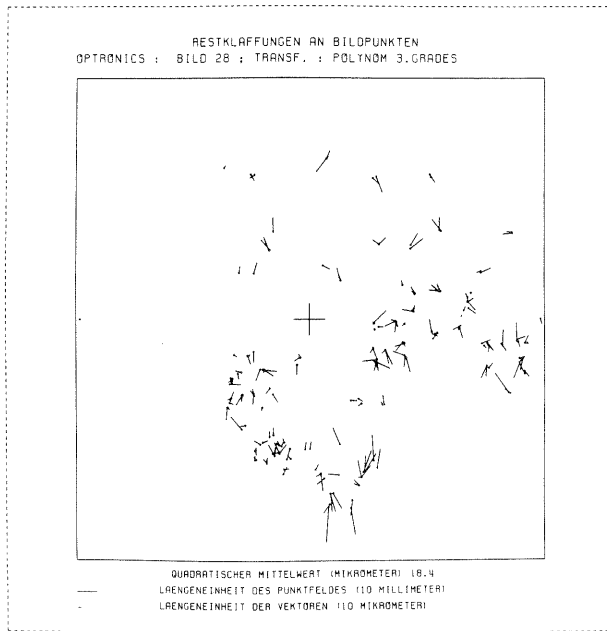


Abb. 5

sehr weitgehenden Kompensationsleistung von 20 Unbekannten im polynomialen Ansatz ist daher zu vermuten, daß die Ursache für die Unterschiede zwischen den Geräten lokalen Charakter hat und die verbliebenen Systematiken nicht durch ein Polynom zu beschreiben sind. Hierfür spricht auch die Verteilung der Restabweichungen (vgl. Abb. 3-5), die noch gemeinsame Ausrichtungen der Fehlervektoren benachbarter Kontrollpunkte ausweist.

Diese Vermutung wird durch die Ergebnisse in Tabelle 2 bestätigt. Hier sind die mittleren quadratischen Restabweichungen für Bild 28 (Optronics) nach Durchführung lokaler Affintransformationen ausgewiesen (vgl. Abb. 6+7).

Bild 28 (Optronics)	Affintransformation in 6 Teilbereichen	Affintransformation in 14 Teilbereichen
		14.8

Tabelle 2 Mittlere quadratische Restabweichungen an Bildpunkten in μm

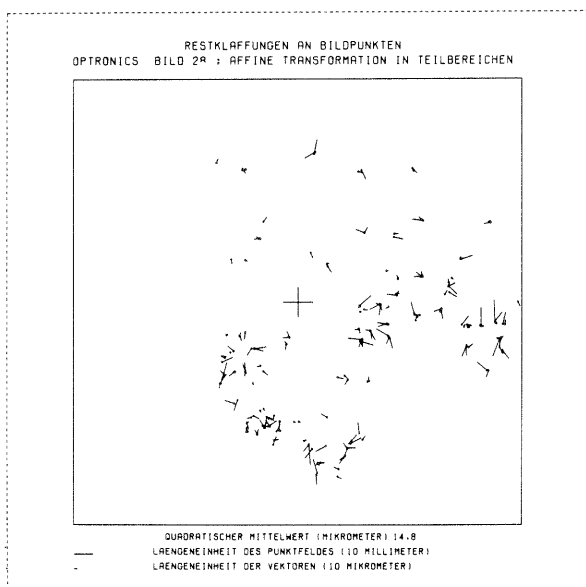


Abb. 6

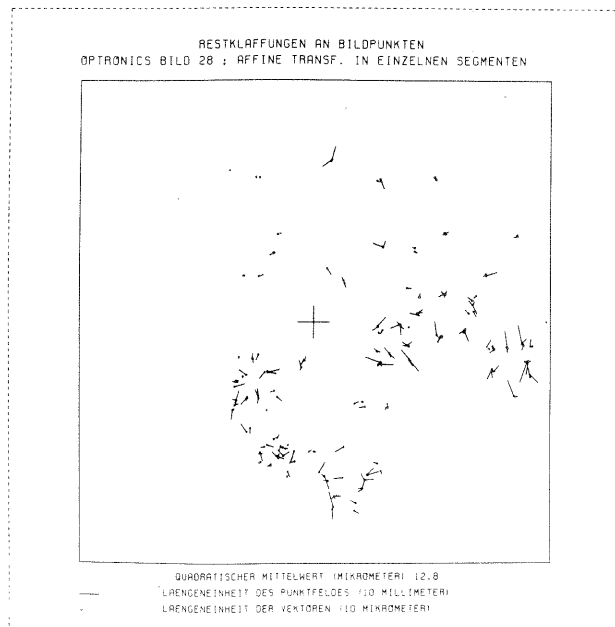


Abb. 7

Im Fall der 6 Teilbereiche sind die insgesamt 14 Teilflächen in Gruppen mit gemeinsamen Bildspalten (vgl. Abb.2) zusammengefaßt worden. Dadurch wird das Bild in einzelne längs der Trommelachse ausgerichtete Gebiete aufgeteilt. Mit einer derartigen Anordnung können vor allem Fehlereinflüsse, die sich durch Wölbung der Bildfläche in Umfangsrichtung des Hohlzylinders ergeben, erfaßt werden. Wie der deutliche Rückgang der Restfehler zeigt, scheint die Aufbiegung der Bildfläche auch eine große Rolle zu spielen.

Allerdings sind damit noch nicht alle lokalen Störeinflüsse erfaßt, wie die weitere Aufspaltung in separat betrachtete Bildbereiche verdeutlicht, so daß zumindest dem mit dem Optronicsgerät abgetasteten Bild 28 ein chaotisches Fehlerverhalten bescheinigt werden muß. Der Kompensationseffekt mit 14 Teilbereichen ist andererseits jedoch auch schon groß genug, daß sich in den Fehlervektoren wieder einige noch verbliebenen Meß- und Identifizierungsfehler erkennen lassen (vgl. Abb.7).

Nachdem das Vorhandensein lokalsystematischer Fehler nachgewiesen ist, sollen nun die Ergebnisse für die verschiedenen Scannertypen gegenübergestellt und auf Einflüsse der Bauweise untersucht werden. Im Vordergrund steht hierbei die Frage, ob der Glaszylinder des Joyce-Loebl Gerätes zu einer stabileren Bildgeometrie der abgetasteten Aufnahmen beiträgt.

Hierzu sind die Teilbereiche innerhalb der einzelnen Maßbilder zu 6 Gebieten mit einer Ausdehnung von je 3200 Zeilen (Größe des Überdeckungsbereiches) und 700 Bildspalten (gekennzeichnet durch die mittlere Bildspalte y) und zu 4 Gebieten mit einer Form von je 4600 Bildspalten und 800 Bildzeilen (markiert durch die mittlere Bildzeile x) zusammengefaßt worden. Für diese wurden einzeln Affintransformationen gerechnet. Als Indikator zur Andeutung der Fehlerquellen sind die Maßstabsfaktoren λ_x und λ_y herangezogen worden. Das Verhalten der errechneten Unbekannten ist, versehen mit den Fehlersäumen, jeweils gemeinsam für alle 4 Bilder in Diagrammen festgehalten (vgl. Abb. 8-11).

Die Verwendung eines affinen Ansatzes empfiehlt sich aufgrund der Wirkung aufgewölbter Filmoberflächen. Wie Abb. 12 zu entnehmen ist, hat die Veränderung des Abstandes zwischen Optik und Filmoberfläche eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung der erfaßten Pixelfläche ($\Delta x_a, \Delta y_a$) gegenüber der Sollgröße ($\Delta x_s, \Delta y_s$) zur Folge. Durch die mechanische Positionierung entlang der Trommelachse, die unbeeinflusst von der maßstäblichen Veränderung geschieht, kommt es zu einer Überlappung benachbarter Zeilenelemente und gleichzeitig zu einer rechteckigen Pixelform. Daraus resultiert für die Berechnungen die Kantenlängen Δx_s und Δy_a , die nur über einen affinen Ansatz ausreichend beschrieben werden können.

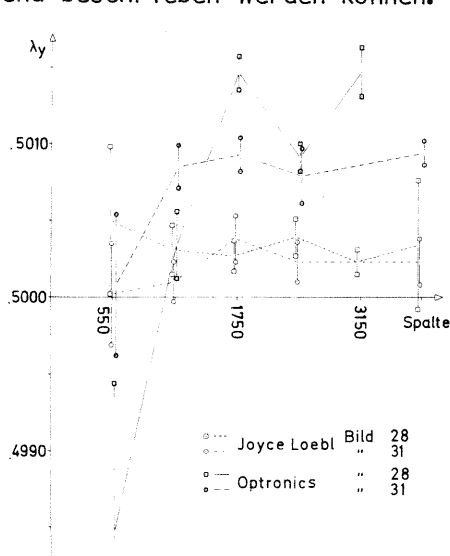


Abb. 8

Variation von λ_y mit der Bildspalte

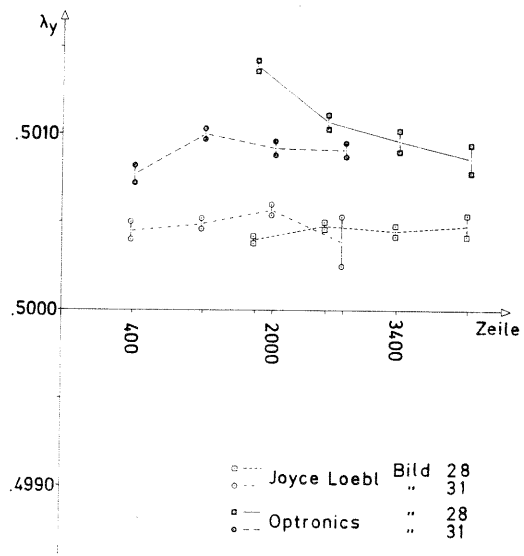


Abb. 9

Variation von λ_y mit der Bildzeile

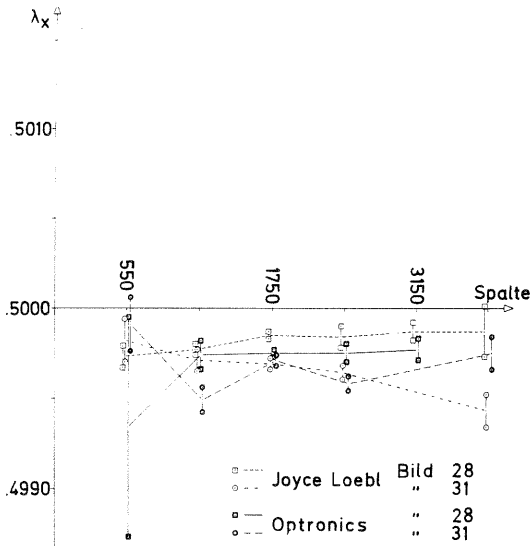


Abb. 10

Variation von λ_x mit der Bildspalte

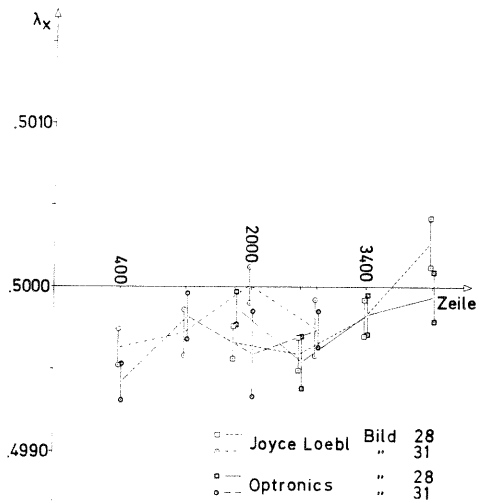


Abb. 11

Variation von λ_x mit der Bildzeile

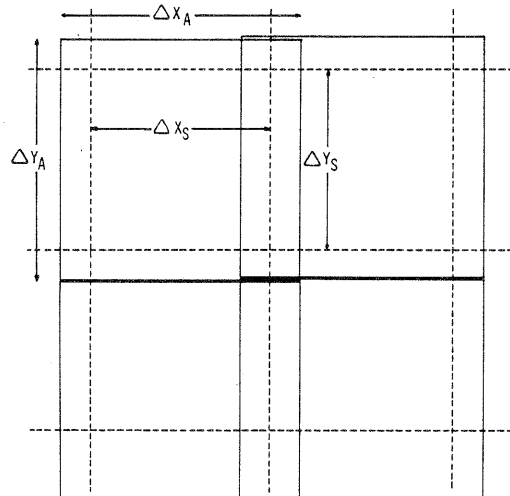


Abb. 12 Maßstäbliche Veränderung der Pixelfläche durch Veränderung der Entfernung zwischen Optik und Filmoberfläche

Der Einfluß einer gewölbten Bildfläche wird hauptsächlich in λ_y abzulesen sein. Mit Hilfe der unterschiedlichen Ausrichtung der Testflächen in Zeilen- und Spaltenrichtung könnte sich zusätzlich Aufschluß über die Komplexität der Verbiegung gewinnen lassen.

Anhand des Maßstabs in x-Richtung können Neigungen der Filmoberfläche nachgewiesen werden, die allerdings mittelbar auch zu Wölbungen führen müssen und sich daher auch in λ_y niederschlagen. Ansonsten können mit in λ_x Unregelmäßigkeiten im Aufbau der die Zeilenpositionierung steuernden Schraube enthalten sein, die sich geräteeinheitlich verhalten müßten.

Betrachtet man die Diagramme, so ist für beide Geräte das systematische Auf- und Abwölben des abgetasteten Filmes in λ_y wiederzufinden (vgl. Abb.8). Das Trendverhalten der Bilder ist ähnlich, obwohl natürlich kein einheitlicher Aufbau erwartet werden kann, da die Fehler von der jeweiligen Form der Filmoberfläche während der Digitalisierung abhängen, die jedoch nicht reproduzierbar ist.

Zu erkennen ist weiterhin, daß die in den mit dem Optronicsgerät digitalisierten Bilder wesentlich größere Fehler aufweisen. Es kann sogar eine Wölbung der Filmober-

fläche längs der Trommelachse festgestellt werden (vgl. Abb.9). Der Nachweis von gerätefesten Fehlern durch λ_x kann nicht mit Sicherheit erfolgen. Aufgrund der Beschränkung auf die Ausmessung des Überdeckungsbereiches der beiden Meßbilder, haben die Teilflächen unterschiedliche Lagen bezogen auf die Längsachse der Trommel. Es können daher nur für wenige Stellen entlang der Antriebsschraube aus beiden Bildern Maßstabsfaktoren gewonnen werden, deren Vergleich eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Fehler zugelassen hätte. Dennoch deutet das Fehlen von Trends quer zur Trommelachse (vgl. Abb.10) und die Ähnlichkeit der in Längsrichtung ermittelten Kurven (vgl. Abb. 11) auf mögliche Gerätefehler hin.

Faßt man zusammen, so muß vermerkt werden, daß für geometrische Auswertungen bedenklich große lokale Fehlereinflüsse in den digitalisierten Bildern ermittelt werden konnten. Das Gerät von Joyce-Loebl garantiert zwar eine bessere Bildgeometrie, jedoch sind die gefundenen Fehler auch hier größer als vom Hersteller angegeben (vgl. Tab.3).

Die Ursache für die aufgedeckten Fehlereinflüsse liegt weniger in mechanischen oder elektronischen Störungen der Gerätekomponenten, als vielmehr in einer Abweichung der abzutastenden Filmoberfläche von der Idealform eines Kreiszyinders. Die Gewährleistung einer ausreichend regelmäßigen Form des abzutastenden Filmes durch geeignete bautechnische Maßnahmen sollte jedoch zu den Voraussetzungen zählen, die Geräte mit der von den Herstellern hier angestrebten Genauigkeitsleistung zu erfüllen haben.

	Fehler durch die Schwankungen der zwischen den Testgebieten ermittelten Maßstabsfaktoren (umgerechnet auf eine Strecke von 4600 Pixel)							
	Testgebiete in Zeilenrichtung				Testgebiete in Spaltenrichtung			
	Bild 28		Bild 31		Bild 28		Bild 31	
	λ_x	λ_y	λ_x	λ_y	λ_x	λ_y	λ_x	λ_y
Optronics	3.8 (5.6)	27.7 (9.0)	3.9 (1.4)	7.8 (4.2)	3.7 (1.5)	4.9 (0.7)	3.7 (2.4)	2.1 (0.5)
Joyce-Loebl	1.3 (0.5)	2.5 (4.4)	3.6 (1.1)	3.3 (3.0)	5.0 (1.4)	0.7 (0.5)	3.5 (1.5)	2.5 (1.3)

Tabelle 3 Auswirkung der Schwankungen in den Maßstabsfaktoren. Die Werte sind in Pixeln angegeben und mit der aus der Bestimmungsgenauigkeit der Parameter resultierenden Toleranz (in Klammern) versehen.

5. Anmerkung

Der vorliegende Aufsatz stellt eine erweiterte Betrachtung einiger im Rahmen einer Dissertation gewonnener Ergebnisse dar. Die Dissertation ist der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn vorgelegt worden. (vgl. /Boochs,1984/).

6. Dank

Herrn Dipl.-Ing. Paul Hartfiel möchte ich für die tatkräftige Unterstützung mit der er bei der Durchführung der Untersuchungen und der Vorbereitung dieses Artikels geholfen hat, ebenso danken, wie für die fruchtbaren Gespräche im Verlauf der Arbeiten.

Literatur :

- Boochs, F., 1984: Schrittweise räumliche Auswertung photogrammetrischer Steremodelle mittels Korrelation digitaler Bildflächen (Arbeitstitel)
Dissertation an der Universität Bonn, erscheint demnächst
- Fischer, E.U., 1982: Digitale Signalverarbeitung in der rechnergestützten Kartographie
DGK Reihe C, Heft 278, München
- Hinchliffe, F., 1978: Digital image processing for printed wire photomasks
Optronics Journal, 2.78, 6p.
- Johannsen, Th., 1976: Der Scanner - ein Gerät zum schnellen Digitalisieren inhaltsreicher Vorlagen
NaKaVerm, Heft 70, Frankfurt, S. 13-20
- Lichtner, W., 1981: Anwendungsmöglichkeiten der Rasterdatenverarbeitung in der Kartographie
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft 105, S.72S
- Schäfer, W., 1976: Untersuchung von Optronics Scanner und Plotter
Ingenieurarbeit, Fachhochschule Frankfurt, unveröffentlicht
- Thompson, R.H.,
Ouellette, R.J.,
1972: Design considerations for a high performance scanner
printer
Bendix technical journal, 8p.