Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE
MITTEILUNGEN

Heft 24

Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen

Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programmes

von
J. JANSA

Veröffentlichung des Institutes für Photogrammetrie

Geowiss. Mitt.
24, 1983

Wien, im Mai 1983

Herausgeber und Verleger: o.Prof.Dr.-Ing.K.Kraus
Vorstand des Institutes für Photogrammetrie
der Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation und aus eigenen Einnahmen des Institutes für Photogrammetrie der TU Wien getragen.

Einband: Fa. F. Manhardt, Wien
Druck: ÖHTUW - Vervielfältigung, Wien
Auflage: 300 Stück

Kurzfassung:

Die geometrische Rektifizierung von MSS-Bildern und die Herstellung von MSS-Bild-Mosaiken wird immer wieder von den Scannerbildinterpreten verlangt. Die komplizierten Abbildungsgesetze , die vom Prinzip der Aufnahmetechnik herrühren, führen zu Verzerrungen, die teilweise bei den konventionellen Photoaufnahmen unbekannt sind. Die wichtigsten Verzerrungen werden besprochen und ihre Auswirkungen auf die Abbildung eines regelmäßigen Rasters dargestellt.
Ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten der MSS-Bildentzerrung, wobei die Probleme der Grauwertinterpolation bei digitaler Umbildung etwas näher diskutiert werden, leitet über zum zentralen Teil der Arbeit. Dieser stellt ein Verfahren zur praktischen Durchführung einer Rektifizierung nach der unparametrischen Lösungsmethode mit Hilfe der Interpolation nach kleinsten Quadraten vor. Die Umbildung selbst kann digital oder optisch (mit dem Wild AVIOPLAN OR1) erfolgen. Anhand der einzelnen Teile des entwickelten EDV-Programmes werden die wichtigsten Punkte der Entzerrungsmethode besprochen (z.B. Punktauswahl und -messung, Erfassung der Verzerrungen mit der Methode der Interpolation nach kleinsten Quadraten, die Wahl der Bildelementgröße und der AVIOPLAN-Schlitzlänge, Umbildung, Mosaikbildung). Hinweise auf die Möglichkeiten der Fehlersuche und Abschätzung der Rektifizierungsgenauigkeit, sowie die Besprechung einer Rektifizierung anhand eines Beispieles beschließen die Arbeit.

Abstract:

It is a recurring demand of interpreters of scanner images to have these images geometrically corrected, and mounted to continuous mosaics. In correspondence with the techniques of their creation, MSS images are distorted in complex ways, inpart non pertinent to conventional photography. Main types of distortion are discussed and illustrated by their influence on images of a regular grid.
A review of techniques to rectify MSS imagery densities, is leading over to the main chapter. These are dealing with a practicable method to rectify MSS imagery using the nonparametric solution with least squares interpolation. The rectification can be performed digitally or optically (applying the Wild AVIOPLAN OR1). Main steps of the process are discussed in connexion with the corresponding sections of the computer program (such as point selection and measurement, determining image distortions by least square interpolation, selecting pixel size, choosing slit length for the AVIOPLAN, rectification itself, and mosaicing). Closing thoughts consider possibilities of error detection and of quality evaluation. Finally, the process of rectification is discussed in practical terms in connexion with an example.

INHALTSVERZEICHNIS:

Vorwort 1

1. EINLEITUNG 3
2. ALLGEMEINES ZUM MSS-BILD 3
   2.1. Das Aufnahmeprinzip 3
   2.2. Die Bildspeicherung 6
      2.2.1. Analoge Bildspeicherung 6
         2.2.1.1. Der photographische Film 6
         2.2.1.2. Der Magnetspeicher 6
      2.2.2. Die digitale Bildspeicherung 7
   2.3. Bildwiedergabe 7
      2.3.1. Der Zeilendrucker 7
      2.3.2 Das Bild-Lese- und -schreibgerät Optronics C4500 9
      2.3.3. Das Bildausgabegerät GOBI 9
3. URSACHEN DER MSS-BILDVERZERRUNGEN 10
   3.1. Einfluß der Fluggeschwindigkeit 12
      3.1.1. Overscan 12
      3.1.2. Scanschiefe 13
   3.2. Kursabweichungen 14
   3.3. Änderung der Flughöhe 15
   3.4. Längsneigung des Flugzeuges 15
   3.5. Der Querneigungsfehler 16
   3.6. Die Kantung 17
   3.7. Einflüsse der Geländeform 18
   3.8. Systembedingte Verzerrungen (Panoramaverzerrung) 18
4. ENTZERRUNGSVERFAHREN UND GRAUWERTZUORDNUNGEN 21
   4.1. Art des Lösungsansatzes 22
      4.1.1. Parametrische Verfahren 22
      4.1.2. Unparametrische Verfahren 24
         4.1.2.1. Polynome 24
         4.1.2.2. Interpolation nach kleinsten Quadraten 25
   4.2.Art der Umbildemethode 26
      4.2.1. Optische Umbildung 26
      4.2.2. Digitale Umbildung 26

4.3. Art der Umbilderichtung 28
4.3.1. Direktes Umbildeverfahren 28
4.3.2. Indirektes Umbildeverfahren 28
4.4. Grauwertzuordnungen 29
4.4.1. Methode der nächsten Nachbarschaft 29
4.4.2. Methode der bilinearen Grauwertinterpolation 30
4.4.3. Grauwertinterpolation höherer Ordnung 31
4.4.4. Diskussion 34
5. PRAKTISCHE DURCHFÖHRUNG EINER MSS-REKTIFIZIERUNG 38
5.1. Forderungen an das Rektifizierungsverfahren 38
5.2. Unparametrischer Ansatz mit Hilfe der Interpolation nach kleinsten Quadraten 38
5.2.1. Vorbemerkung 38
5.2.2. Interpolation nach kleinsten Quadraten 39
5.3. Optisches und digitales Entzerrungsverfahren 43
5.4. Auswahl der Punkte für die Verzerrungsbestimmung 43
5.4.1. Ausgangsmaterial 44
5.4.1.1. Bildwiedergabe des verzerrten MSS-Bildes 44
5.4.1.2. Rektifizierungsvorlage 45
5.4.2. Auswahl der Paßpunkte und Verknüpfungspunkte 47
5.4.2.1. Für Paßpunkte geeignete Bilddetails 48
5.4.2.2. Messung der Paß- und Verknüpfungspunkte 50
5.4.2.2.1. Messung mit dem Digitizer 51
5.4.2.2.2. Messung mit dem Stereokomparator 52
5.4.2.2.3. Automatische Korrelation 52
5.4.2.3. Genauigkeit der Punktmessung 53
5.4.2.4. Meßeinheiten 56
5.5. Der erste Programmteil 56
5.5.1. Aneinandertransformieren der Meßeinheiten 57
5.5.2. Anpassen an eine Rektifizierungsvorlage 58
5.5.3. Beseitigen der Systematik der Panoramaverzerrung 58
5.6. Der zweite Programmteil 59
5.6.1. Berücksichtigung der Paßpunkte in einem Streifen 59
5.6.1.1. Recheneinheiten 59
5.6.1.2. Bestimmung der Kovarianzfunktion 61
5.6.1.3. Bestimmung des Produktes $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$ 69

5.6.2. Berücksichtigung der Verknüpfungspunkte 70
5.6.2.1. Die wahrscheinlichste Lage eines Verknüpfungspunktes in der Vorlage 70
5.6.2.2. Invertieren der Interpolation nach kleinsten Quadraten 72
5.7. Der dritte Programmteil 75
5.7.1. Wahl der Bildelementgröße im Ergebnisbild 76
5.6.2. Wahl der Rasterweite 79
5.8. Die Rektifizierung 83
5.8.1. Digitale Rektifizierung 83
5.8.1.1. Die Bildeinheiten 83
5.8.1.2. Der Bildhintergrund 85
5.8.2. AVIOPLAN-Rektifizierung 86
5.9. Fehlersuche und Genauigkeiten 86
5.9.1. Fehlersuche 86
5.9.2. Die Genauigkeit des Rektifizierungsergebnisses 90
5.10. Ausgeführte Projekte 92
5.10.1. Projektliste 92
5.10.2. Projekt "OBERHAUSEN" 93
5.10.2.1. Aufgabenstellung und vorhandene Unterlagen 93
5.10.2.2. Eignung der vorhandenen Unterlagen und Angaben für die Rektifizierung 96
5.10.2.3. Punktmessung und Berechnung 97
6. SCHLUSSBEMERKUNGEN 100
Literatur 102

Vorwort:

Diese Arbeit, die am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien angefertigt worden ist, hat ihren Ursprung in einer Zusammenarbeit des Institutes mit der Fa. SPACETEC, Wien. Es sollte ein EDV-Programm erstellt werden, mit dem es möglich wäre, Flugzeugscannerbilder zu rektifizieren und zu einem Bildmosaik zusammenzufügen. Obwohl die digitale Umbildemethode bevorzugt wurde, erschien es doch sinnvoll auch eine optische Methode zu berücksichtigen, die mit Hilfe des Differntialumbildegerätes Wild AVIOPLAN OR1 durchgeführt werden sollte.

Die vorliegende Arbeit bringt eine Zusammenfassung und Diskussion der wichtigsten im Verlauf der EDV-Programm-Entwicklung aufgetretenen Probleme. Sie soll aber auch über die theoretischen Erkenntnisse hinaus dem Benutzer des besprochenen Rektifizierungsverfahrens auf kritische und daher besonders zu beachtende Punkte aufmerksam machen, deren Berücksichtigung die Voraussetzung für eine erfolgreiche Rektifizierung darstellt.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Kraus, dem Betreuer dieser Arbeit danken, der jederzeit gerne bereit war, anstehende Probleme zu diskutieren. Herrn Prof. Dr. Gerhard Brandstätter sei der Dank für die Übernahme des Koreferates ausgesprochen.§) Auch Herrn Dr. Helmut Kager, der für Diskussionen gerne zur Verfügung stand, und Herrn Dipl.Ing. M. Sartori (Fa. SPACETEC), durch dessen Zusammenarbeit die praktische Durchführung der Rektifizierung erprobt werden konnte und der das Bildmaterial für das angeführte Beispiel zur Verfügung gestellt hat, sei hier gedankt.

§) Diese Arbeit wird bei der technisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Häufig verwendete Symbole:

Wenn an der entsprechenden Stelle nicht anders definiert, gelten folgende Bedeutungen:

X, Y, Z	Landeskoordinaten
H	Flughöhe
h	Geländehöhe
x, y	Bildkoordinaten
c	Kammerkonstante (siehe auch: c-Wert der Kovarianzfunktion)
v	Fluggeschwindigkeit
v_Ω	Winkelgeschwindigkeit (Umdrehungen/sec)
2A	max. Scanneröffnungswinkel
$2A_o$	max. Scanneröffnungswinkel incl. ω-Kompensationsbereich
α	aktueller Scanwinkel (von Scanmitte weg)
$d\alpha$	Scanneraufl̈ösung
s	Distanz, Entfernung, Rasterweite (siehe auch: system. Anteil der Verzerrungswerte)
ds	Bodenauflösung
p	aktuelle Bildelementposition (von Scanmitte weg)
dp	Bildelementgröße
$\mathbf{c} = (c_1, c_2, \ldots, c_n)$	Kovarianzvektor
$\mathbf{C}$	Kovarianzmatrix
V	Varianz
q	Scheitelwert der Kovarianzfunktion
c	c-Wert der Kovarianzfunktion (siehe auch: Kammerkonstante)
d	Distanz, Entfernung, Rasterweite
e	2.7182818...
l	gemessenen Verzerrungswerte
s	systematischer Anteil der Verzerrungswerte
r	unregelmäßiger Anteil der Verzerrungswerte

1. EINLEITUNG

Der multispektrale Scanner (MSS) ist eines jener Bildaufnahmegeräte, die auf dem Gebiet der Fernerkundung neben der klassischen photographischen Kamera die größte Bedeutung besitzen. Allein durch die Möglichkeit der Registrierung der Wärmeabstrahlung im Wellenlängenbereich von 8-14 µm verdient der Scanner besondere Beachtung. Die gleichzeitige Aufnahme mehrerer Spektralbereiche innerhalb des sichtbaren Lichtes (0,3 - 0,7 µm) und des nahen Infrarots (0,7 - 1,1 µm) eröffnet eine Vielzahl von Interpretationsmöglichkeiten, die einer Reihe von Wissenschaften Aussagen erlauben, welche auf anderem Wege nicht oder nur unter großem Arbeitsaufwand gemacht werden könnten.

Die geometrische Unzulänglichkeit der MSS-Bilder und ihre nur schwer erfaßbaren Verzerrungen, deren Ursachen im speziellen Aufnahmeprinzip liegen, beeinträchtigen jedoch die Auswertung. Die Beseitigung der geometrischen Fehler und die Herstellung ausmeßbarer MSS-Bilder sind daher Forderungen aus der Praxis der Bildinterpreten.

In der folgenden Arbeit soll auf die geometrischen Eigenheiten der MSS-Bilder und auf die Möglichkeiten ihrer Entzerrung kurz eingegangen werden. Anhand eines Rektifizierungsverfahrens, dessen Tauglichkeit auch mit Hilfe praktischer Beispiele demonstriert wird, werden die Probleme, welche sich bei der Durchführung einer MSS-Bildentzerrung ergeben, näher besprochen.

2. ALLGEMEINES ZUM MSS-BILD

2.1. Das Aufnahmeprinzip

Das klassische Bauprinzip eines Scanners besteht aus einem rasch rotierenden Spiegel, kombiniert mit einigen Detektoren, welche die vom Spiegel aufgefangene, reflektierte und in Spektralbereiche zerlegte Strahlung empfangen und in elektrische Impulse umwandeln. Der rotierende Spiegel besorgt die Abtastung der Objektoberfläche in einer einzelnen Zeile (= Scan). Die gewünschte Flächenabtastung wird durch die Fortbewegung des Scanners parallel zur Spiegelrotationsachse erreicht.

Ein Scannerbild ist also keine Momentaufnahme wie eine Photographie. Es entsteht vielmehr kontinuierlich im Laufe des Abtastvorganges. Damit ist auch sofort erkennbar, daß jede Unregelmäßigkeit des Abtastens einen Ein-

fluß auf die geometrische Qualität der Aufnahme besitzt. Da gewöhnlich der Scanner in einem Flugzeug eingebaut ist, führt jede Störung in der gleichmäßigen Flugzeugbewegung zu einer Bildstörung.

Einen wichtigen Begriff stellt die "Auflösung des Scanners" dar. Man versteht darunter den Öffnungswinkel jenes Strahlenkegels, der zur Registrierung eines Strahlenwertes führt. Die Scanneraufl̈ösung ist daher eine Gerätekonstante.

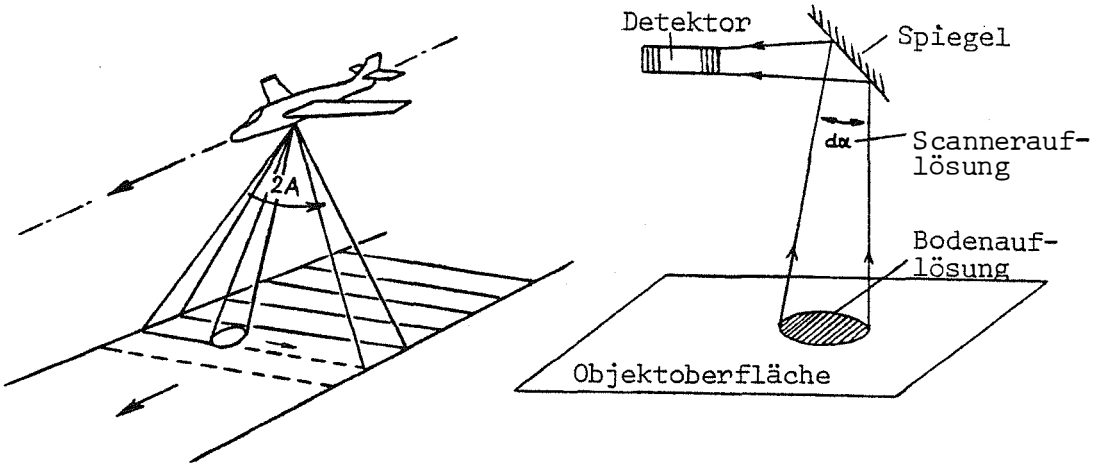
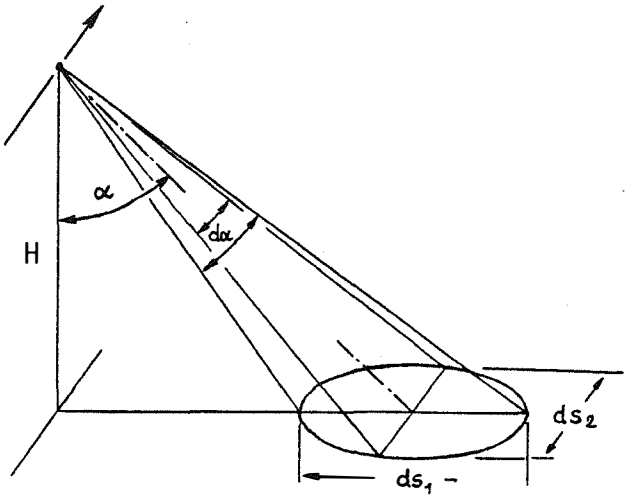


Abb. 2-1: Prinzip des Scannens; Scanner- und Bodenauflösung

Die Schnittfläche des Strahlenkegels mit der aufzunehmenden Objektfläche ergibt die sogenannte Bodenauflösung (Abb.2-1). Sie ist eine Funktion der augenblicklichen Aufnahmedisposition, des aktuellen Scanwinkels, der Objektoberfläche und der Scanneraufl̈ösung. Die Bodenauflösung ist daher im allgemeinen von Punkt zu Punkt verschieden. Zu beachten ist, daß die Bodenauflösung bei den konventionellen Scannern zum Streifenrand hin stark abnimmt, und zwar unterschiedlich in Flugrichtung und in Scanrichtung (Abb.2-2).

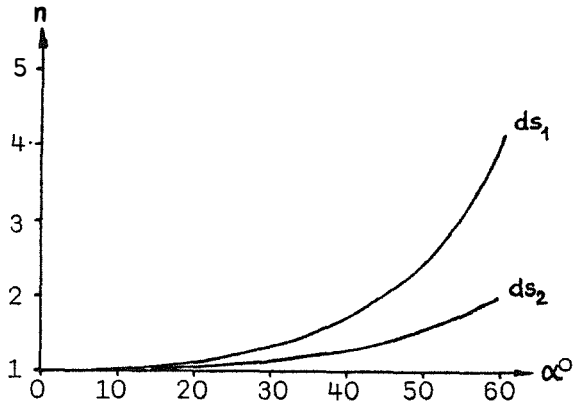


$$ds_1 = H \frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha \qquad (2\text{-}1)$$

$$ds_2 = H \frac{1}{\cos \alpha} d\alpha \qquad (2\text{-}2)$$

$d\alpha$ ... Scanneraufl̈ösung
ds_1... Bodenauflösung quer z. } Flugrichtung
ds_2... Bodenauflösung in } Flugrichtung
α ... aktueller Scanwinkel
H ... Flughöhe

Abb. 2-2: Bodenauflösung in Abhängigkeit des Scanwinkels



ds_1	1.03	1.13	1.33	1.70	2.42	4.00
ds_2	1.01	1.06	1.15	1.30	1.56	2.00

Abb. 2-3: n-fache Zunahme der Bodenauflösung in Abhängigkeit des Scanwinkels

Die Verschlechterung der Auflösung führt zu einem Tiefpaßfiltereffekt. Der Strahlungswert wird über eine immer größer werdende Fläche integriert, wodurch hohe Objektfrequenzen verloren gehen. Die Bodenauflösung wird zu den Streifenrändern hin schlechter. Sie ist verantwortlich dafür, bis zu welchen Objektdetails im aufgenommenen MSS-Bild noch eine einwandfreie Erkennbarkeit gegeben ist.

Die neue Scannergeneration arbeitet nicht mehr auf dem Prinzip des rotierenden Spiegels, sondern stellt für einen ganzen Scan eine Detektorreihe zur Verfügung. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß die mechanisch bewegten und daher störungsanfälligen Teile wegfallen. Außerdem kann mit der neuen Technologie die Scanneraufläsung verbessert werden. Gewisse Probleme ergeben sich bei der exakten Eichung der Detektorreihe. Zu beachten ist, daß die Auflösung im Gegensatz zu den konventionellen Scannern gegen den Streifenrand hin nicht abnimmt und alle damit zusammenhängenden Probleme bei so erhaltenen Bildern nicht auftreten. In den folgenden Ausführungen wird jedoch immer der konventionelle Scanner als Aufnahmegerät angenommen.

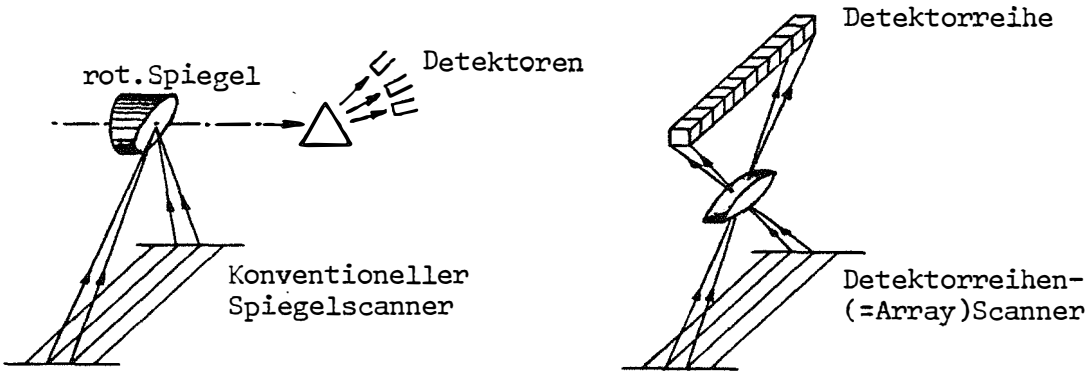


Abb. 2-4: Prinzip der Scannertypen

2.2. Die Bildspeicherung

Unter Bildspeicherung wird das Aufbewahren der durch das Aufnahmegerät oder durch bildverarbeitende Operationen erhaltenen Informationen verstanden, um diese zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Verfügung zu haben.

2.2.1. Analoge Bildspeicherung

Die empfangene Strahlung wird dazu verwendet, um auf ein geeignetes Speichermedium ein dem Original analoges Signal aufzubringen. Analoge Arten der Speicherung erlauben eine große Informationsdichte, haben jedoch den Nachteil, daß die gespeicherten Werte nicht mehr exakt abgerufen und verarbeitet werden können.

2.2.1.1. Der photographische Film

Die älteste Art der Speicherung ist die auf photographischem Film. Der wesentliche Vorteil liegt darin, daß der abgespeicherte Informationsgehalt vom Menschen auch ohne zusätzliche Hilfsmittel verarbeitet werden kann. Ein Nachteil liegt in der unexakten Reproduzierbarkeit der Bildinformation. Die Art des verwendeten Filmmaterials, die Länge der Belichtungszeit und der chemische Entwicklungsprozeß wirken sich auf die abgespeicherte Information aus. Für automatische Bildverarbeitung ist der Film nicht unmittelbar geeignet. Im Scanner erfolgt keine direkte Belichtung des Films. Für jeden Spektralbereich des Scanners muß ein eigener Film belichtet werden. Es ist jedoch in der Praxis unüblich, das aufgenommene Signal unmittelbar auf Film abzuspeichern.

2.2.1.2. Der Magnetspeicher

Das von den Detektoren erzeugte elektrische Signal wird zur Magnetisierung eines Magnetbandes verwendet. Die verschiedenen Spektralbereiche können gleichzeitig auf parallelen Spuren des Magnetbandes aufgezeichnet werden. Das empfangene Signal wird durch Störsignale, die in der Natur der Magnetbandaufzeichnung liegen (Bandrauschen), überlagert. Es kommt zu einer Verfälschung des Originalsignals. Diese Störungen können zwar sehr klein gehalten werden und durch entsprechende Aufnahmeverfahren auf ein Minimum reduziert werden, durch jeden weiteren Verarbeitungsprozeß (z.B. Kopieren) führen neue Störsignale zu einer weiteren Verfälschung. Eine Abhilfe bringen nur digitale Speicherverfahren.

2.2.2. Die digitale Bildspeicherung

Die empfangene Strahlung wird in definierten Zeitintervallen abgegriffen (Quantisierung) und entsprechend ihrer Intensität als Zahlenwert dargestellt (Digitalisierung, Analog-digital-Wandlung). Dieser Zahlenwert wird in kodierter Form auf Magnetband abgespeichert. Das Bild wird in eine digitale Zahlenmatrix zerlegt. Die geometrische Position innerhalb dieser Matrix ist das Bildelement, der Zahlenwert heißt Grauwert. Liegen mehrere Spektralbereiche vor, so werden jedem Bildelement mehrere Grauwerte zugeordnet.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß sich auf dem Speichermedium nicht mehr ein kontinuierliches Signal befindet sondern nur mehr Ø/1-Impulse, die eine hohe Lese- und Schreibsicherheit gewährleisten. Es ist daher ohne Qualitätsverluste möglich, Verarbeitungsschritte (z.B. Kopieren der Originaldaten) durchzuführen. Der Nachteil besteht natürlich hauptsächlich darin, daß nur eine relativ geringe Informationsdichte möglich ist.

Da aber die digitale Bildverarbeitung immer mehr an Bedeutung gewinnt und da diese Daten mit jedem digitalen Allzweckcomputer ausgewertet werden können, ist die digitale Speicherform neben der photographischen die wichtigste auf dem Gebiet der Fernerkundung.

Es ist jedoch zu beachten, daß die digitalen Daten zwar sehr universell verarbeitet werden können, daß jedoch eine unmittelbare Anschaulichkeit des Bildes nicht mehr gegeben ist. Eine sehr wichtige Aufgabe aller digitalen Verarbeitungsprozesse ist daher, die digitalen Bilder durch anschauliche darzustellen, z.B. durch Ausgabe auf photographischem Film (Digital-Analog-Wandlung).

2.3 Bildwiedergabe

An dieser Stelle sollen nur jene Bildwiedergabegeräte kurz besprochen werden, die bei der Ausführung der später besprochenen praktischen Beispiele zum Einsatz kamen.

2.3.1. Der Zeilendurcker

Der an einem Allzweckcomputer angeschlossene Zeilendrucker kann dazu herangezogen werden, Bilddaten anschaulich darzustellen. Natürlich ist diese Methode sehr einfach und qualitativ nicht befriedigend, in vielen Fällen aber für eine schnelle und billige Kontrolle ausreichend und empfehlenswert.

Der Zahlenausdruck:
Die Grauwerte der Bildelemente werden als Zahl (Hexadezimal, Oktal oder Dezimal) dargestellt. Dieser Ausdruck ist zwar optisch nicht sehr anschaulich aber für bildelementweise Detailkontrollen oft unumgänglich.

Die Bilddarstellung durch Übereinanderdrucken:
Jedes Bildelement wird einer Druckposition zugeordnet. Eine Druckzeile entspricht einer Bildzeile (= Scan). Der Grauwerteindruck des Bildelementes wird durch Übereinanderdrucken mehrerer Druckzeichen erreicht. Die Anzahl der optisch unterscheidbaren Grauwerte ist verhältnismäßig beschränkt, außerdem ist die Zeichenkombination für einen gewissen Grauwert auch vom Typ des Druckers und von der Abnutzung des Farbbandes stark abhängig. Es sollte erreicht werden, daß man mit möglichst wenig Übereinanderdrucken eine geeignete Grauwertskala erhält. Besonders bei langsameren Druckern und größeren Bildern bildet die Anzahl der Überdrucke einen entscheidenden Zeitfaktor.

Das im folgenden angeführte Beispiel enthält 13 Graustufen und ist auf einen speziellen Drucker abgestimmt.

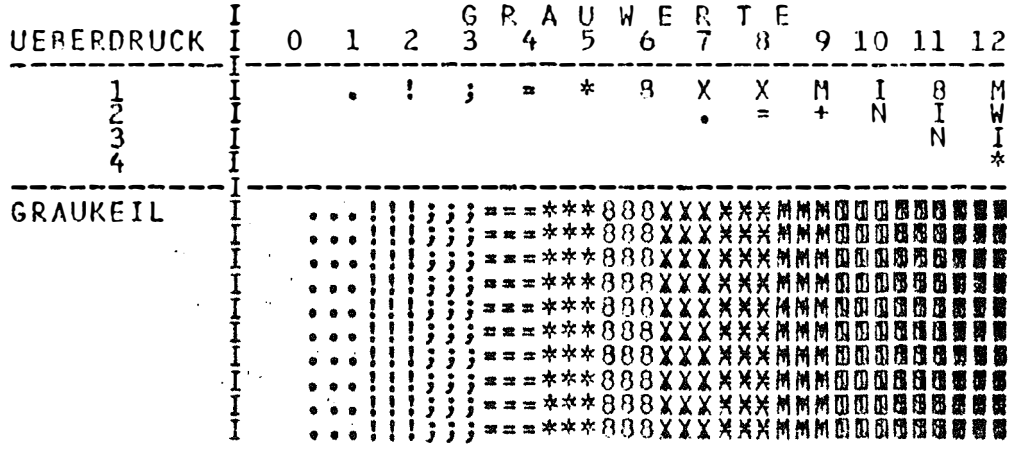
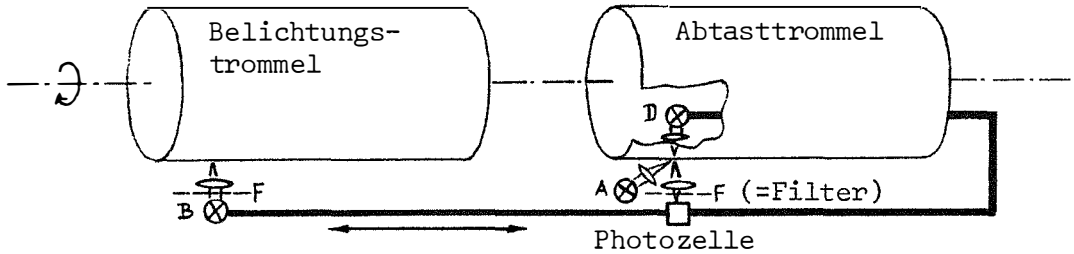


Abb. 2-5: Beispiel eines Graukeils für Zeilendruckerbildausgabe

In der Praxis sind immer mehr als 13 Graustufen vorhanden. Um trotzdem ein ausreichend gutes Bild zu erhalten, werden die 13 Graustufen möglichst gut über den vorhandenen Wertebereich verteilt, also eine Neuzuordnung der Grauwerte zum Zwecke der Bilddarstellung gemacht. Für qualitativ hochwertige Bilddarstellungen ist der Zeilendrucker nicht brauchbar.

2.3.2. Das Bild-Lese- und Schreibgerät Optronics C4500

Mit diesem Gerät können Filme digitalisiert und aus digitalen Bildern Filme hergestellt werden. Der Optronics-Scanner besteht aus zwei sich um eine gemeinsame Achse drehenden Trommeln, wobei eine für die Befestigung des zu belichtenden Films und die andere für die Befestigung des zu digitalisierenden Films dient (Abb. 2-6). Die Belichtung besorgt eine Lichtquelle, welche entsprechend der eingegebenen Grauwerte in ihrer Helligkeit verändert wird. Die Digitalisierung erfolgt durch konstante Beleuchtung des Bildes und Registrierung des reflektierten (Auflichtdigitalisierung) bzw. des durchfallenden (Durchlichtdigitalisierung) Lichtes mittels einer lichtempfindlichen Zelle. Die Rotation der Trommel bewirkt die Belichtung bzw. Abtastung eines Scans, die Bewegung der Lichtquelle bzw. Photozelle in Achsrichtung ermöglicht die Flächendeckung. Der Vorgang ist also analog zum Aufnahmeprinzip im Flugzeugscanner.



A...Lichtquelle f. Auflichtabtastung B...Lichtquelle f. Belichtung
D... - " - Durchlichtabtastung

Abb. 2-6: Prinzip des OPTRONICS

Außerdem besteht die Möglichkeit, die additiven Farbfilter (rot, grün, blau) vor die Lichtquelle bzw. Photostelle einzuschieben und so auch echte Farbbilder herzustellen oder abzutasten. Jeder Farbauszug stellt einen eigenen Spektralkanal dar. Die Bildelemente sind Quadrate mit einer Seitenlänge von wahlweise 25, 50 oder 100 µm. Das maximal nutzbare Bildformat ist auf 23 x 23 cm beschränkt.

2.3.3. Das Bildausgabegerät GOBI /Hruska, 1980/

Ein Nachteil der Bildausgabe am Optronics liegt im sehr beschränkten Bildformat. Da Scannerbilder meistens lange Bildstreifen sind, ist eine Ausgabe auf dem Optronicsgerät nur in Streifenteilen möglich. Andererseits fällt das rektifizierte Ergebnis oft als Bildmosaik an. Mehrere Einzelstreifen werden bei der Rektifizierung zu einem einheitlichen großen Bildverband zusammengefügt. Es ist daher sinnvoll, auch die Bildausgabe in einem großen Format durchzuführen.

Das Bildausgabegerät Gobi hat eine Belichtungsfläche von etwa 1 x 1 m und ist daher für die Ausgabe von Scannerstreifen und von Bildmosaiken bestens geeignet. Die Bildelementgrößen sind in großen Bereichen variabel, es können auch rechteckige Bildelemente dargestellt werden.

Das digitale Bild wird in Submatrizen auf einen Farbbildschirm gebracht. Über ein optisches System wird dieses Bild auf einen Zeichentisch übertragen, wo die Belichtung des Films durch lückenloses Aneinanderreihen der einzelnen Submatrizen erfolgt.

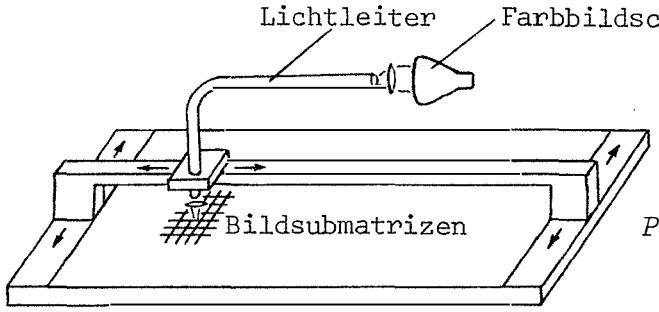


Abb. 2-7:
Prinzip des GOBI - Systems

3. URSACHEN DER MSS-BILDVERZERRUNGEN

Als Verzerrung eines Bildes versteht man die geometrische Abweichung gegenüber einer geometrisch richtigen Darstellung. Es ist Sache des Anwenders, ein geometrisch richtiges Bild vorzugeben. In vielen Fällen wird es sich um die Darstellung der Erdoberfläche in einer bestimmten kartographischen Projektion handeln. Erfolgt etwa die Entzerrung mit Hilfe von Paßpunkten, deren exakte Lage im Landeskoordinatensystem bekannt ist, so ist die Entzerrungsgrundlage die Gauß-Krüger-Projektion des Interessensgebietes.

In den folgenden Überlegungen bleiben die kartographischen Projektionen unberücksichtigt. Die Erdoberfläche wird als Geländeerhebungen über einer Ebene angesehen und das geometrisch richtige Ergebnis als Orthogonalprojektion des Geländes auf diese Ebene. Die Verzerrungen im Bild sollen anhand eines Liniensystems dargestellt werden, welches gedanklich auf dem Gelände so ausgebreitet wird, daß es in der Orthogonalprojektion ein regelmäßiges Raster ergibt.

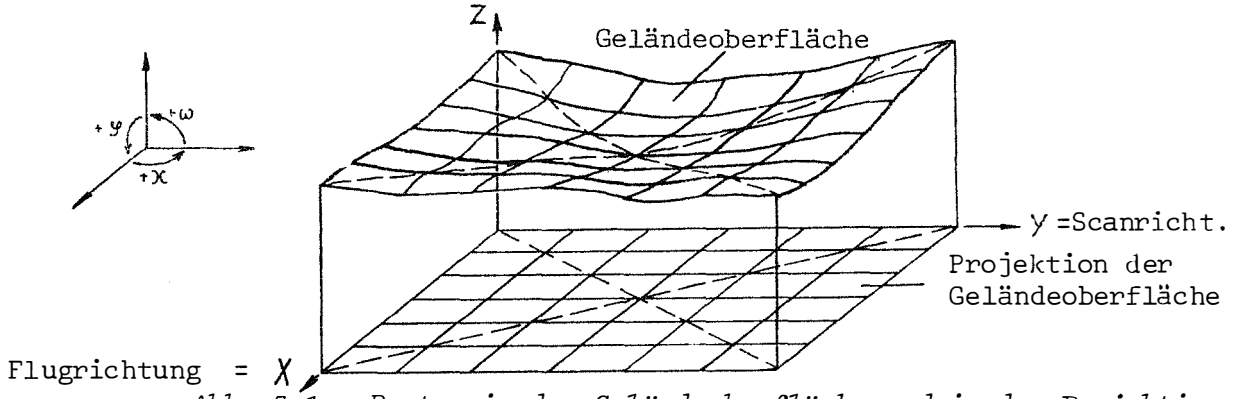


Abb. 3-1: Raster in der Geländeoberfläche und in der Projektion

Das geometrisch richtige Ergebnis wäre also in den folgenden Überlegungen ein regelmäßiges Raster, sodaß die erhaltenen Bildverzerrungen sofort erkannt werden können.

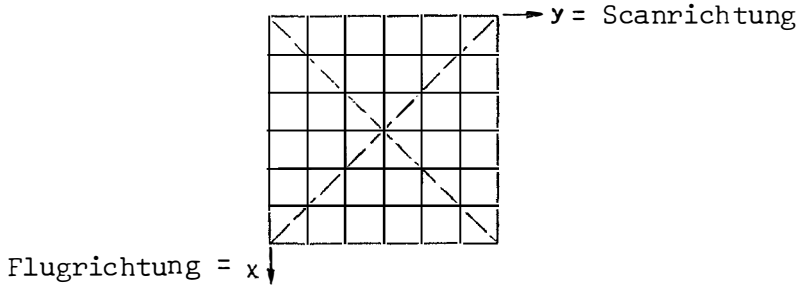


Abb. 3-2: Geometrisch richtiges Rasterbild

Die wichtigsten Verzerrungsursachen liegen in den

- Schwankungen der Fluggeschwindigkeit (Δv)
- Kursabweichungen ($\Delta\gamma$)
- Flughöhenschwankungen (ΔZ)
- Neigungsänderungen des Flugzeuges ($\Delta\phi, \Delta\omega, \Delta\kappa$)
- Einflüsse der Geländeform (Δh)
- Verzerrung bedingt durch das Aufnahmesystem (Panoramaverzerrung)

Aus der konventionellen Luftbildphotogrammetrie weiß man über die Größenordnung der Flugzeugschwankungen Bescheid. Für die folgenden Überlegungen werden jedoch diese Größenordnungen aus Demonstrationsgründen weit überschritten. Die Verzerrungen in echten Scannerbildern sind daher wesentlich geringer als in den Rasterbildern zum Ausdruck kommt.

Für die Betrachtung der Einflüsse soll zunächst die aufzunehmende Objektoberfläche auf eine horizontale Ebene beschränkt bleiben. Objekt und geometrisch richtiges Bild sind somit zueinander ähnlich.

3.1. Einfluß der Fluggeschwindigkeit

3.1.1. Der Overscan

Für die Bildgeometrie ist das Verhältnis von Fluggeschwindigkeit zur Abtastrate (= Anzahl der Scans pro Zeiteinheit) von Bedeutung. Bei der Bildwiedergabe wird immer ein Scan exakt neben dem anderen gesetzt. Bei der Aufnahme kann ein Scan zu seinem Vorgänger eine mehr oder weniger große Überlappung aufweisen. Dieses überlappende Abtasten nennt man Overscan. Der Overscan ist für Verzerrungen in Flugrichtung verantwortlich. Fluggeschwindigkeitsschwankungen führen zu Schwankungen des Overscans und damit zu Maßstabsänderungen in Flugrichtung. Je größer der Overscan, desto größer der Bildmaßstab in Flugrichtung.

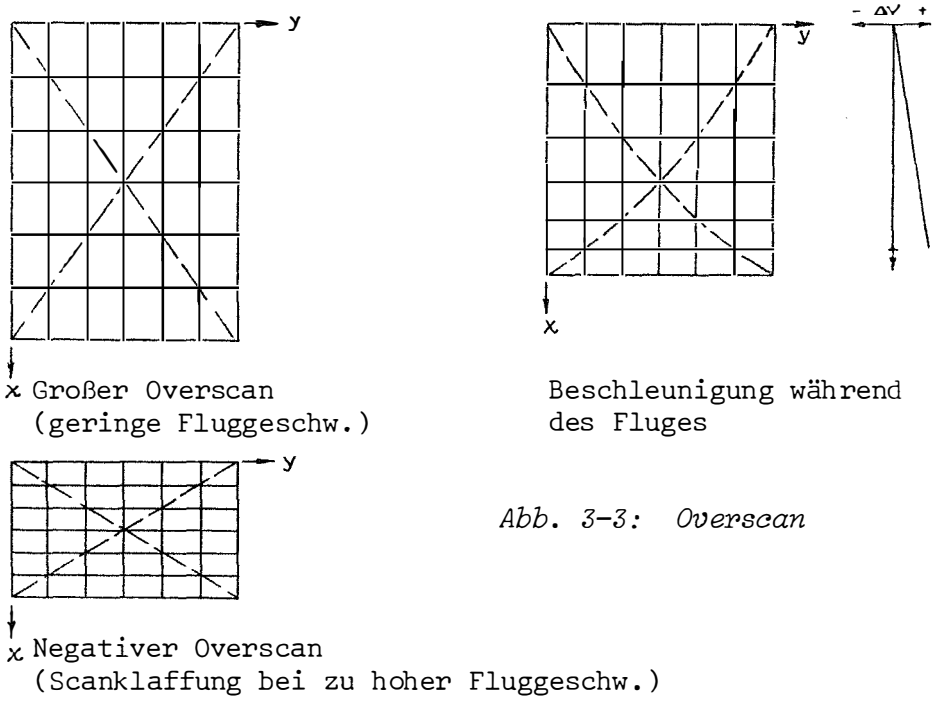


Abb. 3-3: Overscan

Wird die Fluggeschwindigkeit gegenüber der Abtastrate zu hoch, dann kommt es auf der Objektoberfläche zu Scanklaffungen (Abb. 3-3). Objektinformation geht verloren. Die Fluggeschwindigkeit soll so gewählt werden, daß der Overscan in Scanmitte an der höchsten aufzunehmenden Geländestelle Ø wird. Mit Hilfe von (3-1) ist jene Fluggeschwindigkeit zu errechnen, bei der der Overscan Ø wird. Die Formel (3-2) ermöglicht die Berechnung des Overscans bei gegebenen Gelände-, Flug- und Scannerspezifikationen.

$$v_{[km/h]} = d\alpha_{[rad]} \quad H_{[m]} \quad v_{\Omega[U/sec]} \quad 3.6 \qquad (3\text{-}1)$$

$$o_{[\%]} = 100 \quad (1 - \frac{v_{[km/h]}}{3.6 \quad v_{\Omega[U/sec]} \quad d\alpha_{[rad]} \quad H_{[m]}}) \qquad (3\text{-}2)$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß der Bildmaßstab in Flugrichtung nicht von der Flughöhe abhängt. Stark überstrahlende Objekte in der entfernteren Tallage erscheinen sogar in größerem Maßstab als in der näheren Berglage. Da der Overscan bei konstanter Fluggeschwindigkeit und Abtastrate auch von der Aufnahmeentfernung (Flughöhe über Grund) abhängt, werden Objekte auf Bergen von weniger Scans berührt als gleich große Objekte in Tälern. (Abb. 3-4)

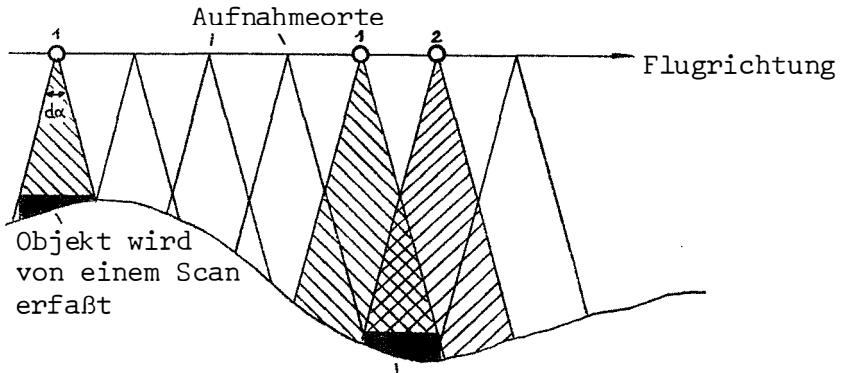
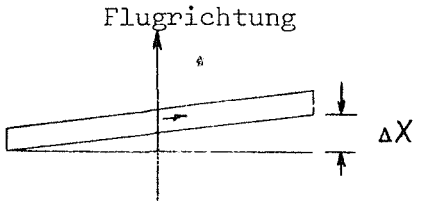


Abb. 3-4

3.1.2. Die Scanschiefe

In den bisherigen Überlegungen wurde angenommen, daß das Abtasten einer Zeile einer Momentaufnahme entspricht, also mit unendlicher Geschwindigkeit erfolgt. Es wird also vorausgesetzt, daß der Scan exakt senkrecht zur Flugrichtung angeordnet ist, so wie auch die Bildwiedergabe durchgeführt wird. Infolge der endlichen Spiegelgeschwindigkeit erfolgt auch während des Abtastens eines Scans eine Fortbewegung in Flugrichtung, sodaß der abgetastete Objektbereich nicht mehr senkrecht auf die Flugachse steht. Der Scananfang weist gegenüber dem Scanende eine Verschiebung in Flugrichtung auf. Diese Scanschiefe ist vom Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur Abtastrate abhängig.



$$\Delta X_{max[m]} = \frac{2\ A_{[o]}\ v_{[km/h]}}{v_{\Omega[U/sec]}\ 36^2} \qquad (3\text{-}3)$$

$$\Delta x = -\Delta X$$

Abb. 3-5: Scanschiefe

Die Scanschiefe ist nicht zu unterscheiden von einer Kantung κ. Die Wirkung im Bild ist entsprechend ($\Delta\kappa = \Delta X/(2\ H\ \tan A)$).

Da bei konventionellen Scannern die Abtastung am Streifenrand schneller erfolgt als in Scanmitte, wird genaugenommen der Scan nicht geradlinig sondern leicht s-förmig abgetastet.

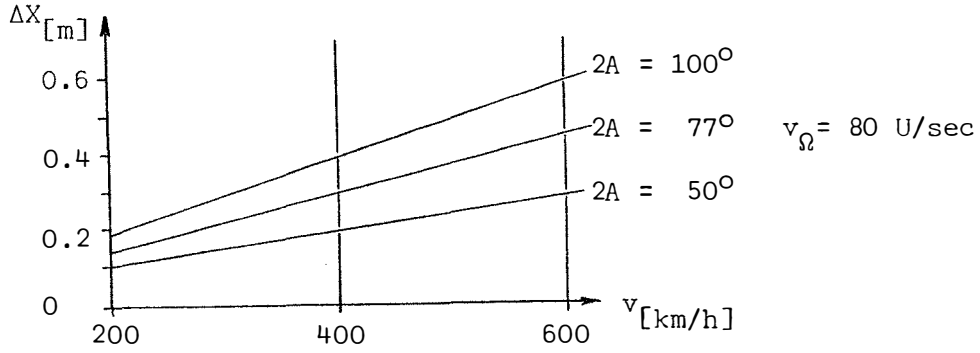


Abb. 3-6: Scanschiefe-Diagramm

3.2. Kursabweichungen (ΔY)

Die Geometriefehler Δy treten nur quer zur Flugrichtung auf und haben genau die gleiche Größe wie die Kursabweichung ΔY, jedoch umgekehrtes Vorzeichen.

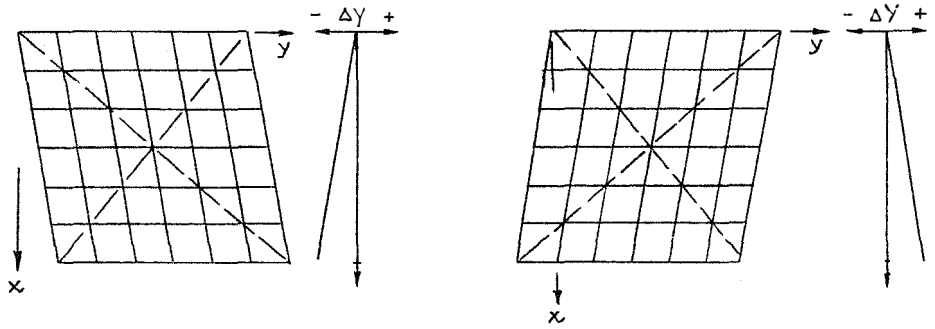


Abb. 3-7

$$\Delta y = -\Delta Y \qquad (3\text{-}4)$$

3.3. Änderung der Flughöhe (ΔZ)

Die Auswirkung auf die Geometrie des Bildes tritt nur quer zur Flugrichtung auf und ist eine Änderung des Bildmaßstabes im Scan. In Flugrichtung führen Höhenunterschiede nicht zu Verzerrungen.

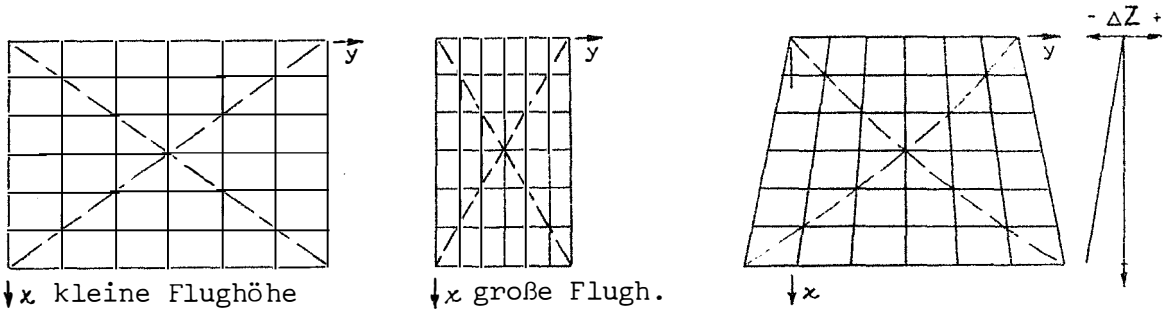


Abb. 3-8

$$\Delta y = -\Delta Z \frac{Y}{H + \Delta Z} \qquad (3\text{-}5)$$

3.4. Längsneigung des Flugzeuges (Δϕ)

Eine Längsneigungsänderung wirkt in erster Näherung wie eine Geschwindigkeitsänderung, führt also zu Maßstabsänderungen in Flugrichtung. Da durch die Neigung sich auch geringfügig die Aufnahmeentfernung vergrößert, ist auch eine Auswirkung auf den Maßstab im Scan vorhanden (Wirkung wie ein +ΔZ). Diese Auswirkung ist jedoch bei den in der Praxis vorkommenden kleinen Längsneigungen von untergeordneter Bedeutung.

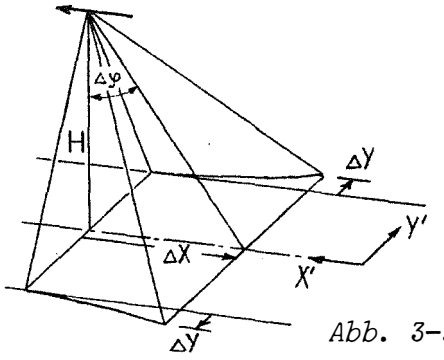


Abb. 3-9

$$\Delta X = H\ \Delta\phi \qquad (3\text{-}6)$$

$$\Delta Y = \pm\, Y' \frac{\Delta\phi^2}{2} \qquad (3\text{-}7)$$

Bei negativer Längsneigung kommt es zu einer Verringerung des Overscans. Es besteht die Gefahr von Abtastklaffungen am Boden. Im Bild führt dies zu einer Verkleinerung des Maßstabes. Eine positive Längsneigung führt zu einer Vergrößerung des Overscans. Erreicht der Overscan 100%, so kommt es zu einem Stillstehen des Abtastvorganges. Das Objekt wird an dieser Stelle mehrmals abgetastet. In Fortsetzung dieser Überlegung ist es sogar möglich, daß das Gelände entgegen der Flugrichtung abgetastet wird. Im Bild bewirkt dieser Flugfehler Mehrfachabbildungen die durch ein Entzerrungsverfahren nicht mehr korrigiert werden können.

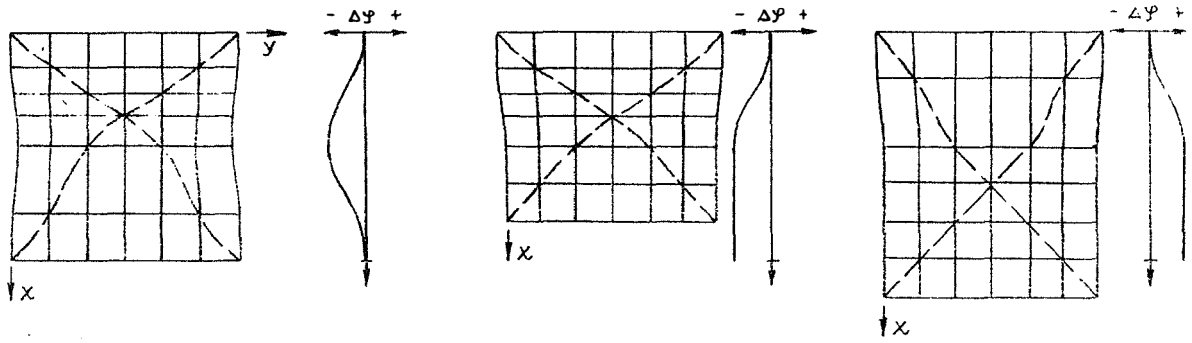


Abb. 3-10: Längsneigungsfehler

3.5. Der Querneigungsfehler (Δω)

Ein Querneigungsfehler ist bei den konventionellen Scanneraufnahmen von untergeordneter Bedeutung, da eine sehr einfache Möglichkeit besteht, ihn mit Hilfe eines Kreisels zu kompensieren. Durch Verschieben des Fensters 2A (= Öffnungswinkel für Datenaufzeichnung) innerhalb der Scanlänge $2A_o$ (= Öffnungswinkel für die Datenerfassung) entsprechend der Kreiselkorrekturangaben wird aus dem Gesamtsignal S_{A_o} das kompensierte Signal S_A ausgewählt und aufgezeichnet.

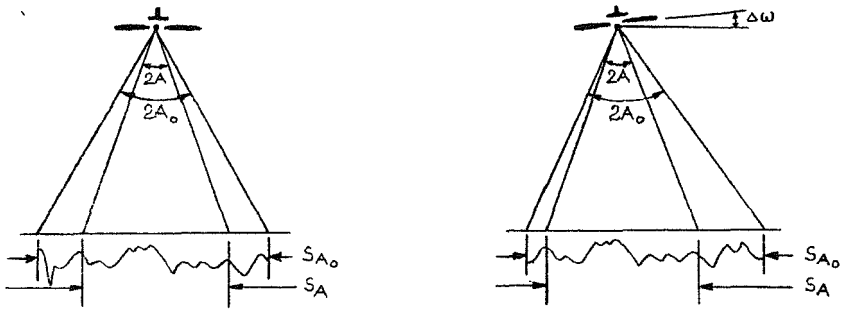


Abb. 3-11: Kompensation des Querneigungsfehlers

Ist keine Kompensation möglich, so wirkt sich eine ω-Neigung ähnlich wie eine Versetzung quer zur Flugrichtung aus (ΔY). Der Maßstab innerhalb eines Scans bleibt jedoch nicht mehr konstant.

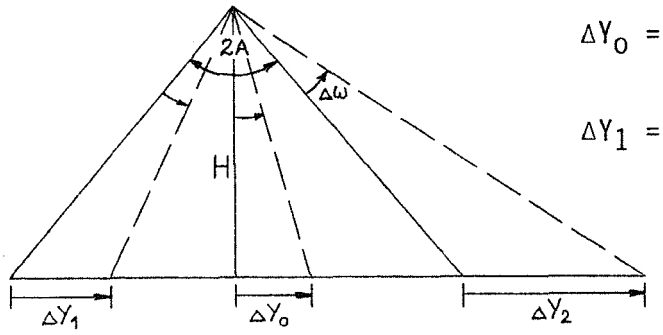


Abb. 3-12a

$$\Delta Y_o = H\ \Delta\omega$$

$$\Delta Y_1 = \Delta Y_2 = H\ \Delta\omega\ \frac{1}{\cos^2\alpha} \qquad (3\text{-}8)$$

Für 2A = 100° gilt pro °Δω:

$\Delta Y_o = 1.7\%\ H$

$\Delta Y_1 \doteq \Delta Y_2 = 4.2\%\ H$

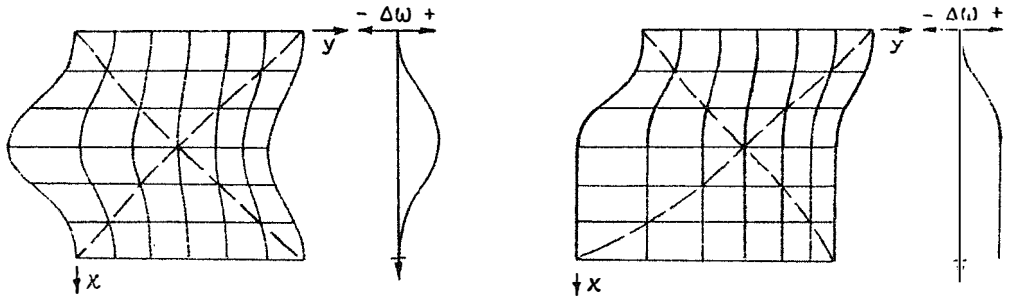
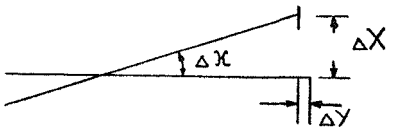


Abb. 3-12b: Querneigungsfehler

3.6. Die Kantung (Δκ)

Eine Kantung ist dann vorhanden, wenn der Scan nicht senkrecht zur Flugachse abgetastet wird. Das kann durch einen Flugfehler verursacht werden, kann aber auch bereits durch einen unexakten Einbau des Scanners bedingt sein. Im zweiten Fall ist Δκ während des gesamten Fluges konstant. Bei der Besprechung des Fehlers ΔX (≙ Δv) wurde auch die Scanschiefe erwähnt, die denselben Effekt wie ein Δκ aufweist und ebenfalls während des gesamten Fluges nahezu konstant ist. (Δκ wegen Scanschiefe ist abhängig von den Fluggeschwindigkeitsschwankungen und aber auch von der Flughöhe über Grund). Durch ein Δκ beim Einbau des Scanners könnte daher die Scanschiefe zum Teil aufgehoben werden.

Die Kantung wirkt sich kaum auf die Lage senkrecht zur Flugachse aus, wohl aber auf die Lage in Flugrichtung. Die Größe des Lagefehlers ist von der Position innerhalb des Scans und von der Flughöhe über Grund abhängig.



$$\Delta X = \Delta\kappa \; H \tan\alpha \qquad (3\text{-}10)$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta\kappa^2}{2} H \tan\alpha = \frac{\Delta\kappa}{2} \Delta X \qquad (3\text{-}11)$$

Für $2A = 100^{\circ}$ gilt: $\Delta X = 2.1\%\ H$ pro $^{\circ}\ \Delta\kappa$

$\Delta Y = 0.2\%\ H\ (\Delta\kappa = 1^{\circ})$

$4.5\%\ H\ (\Delta\kappa = 5^{\circ})$

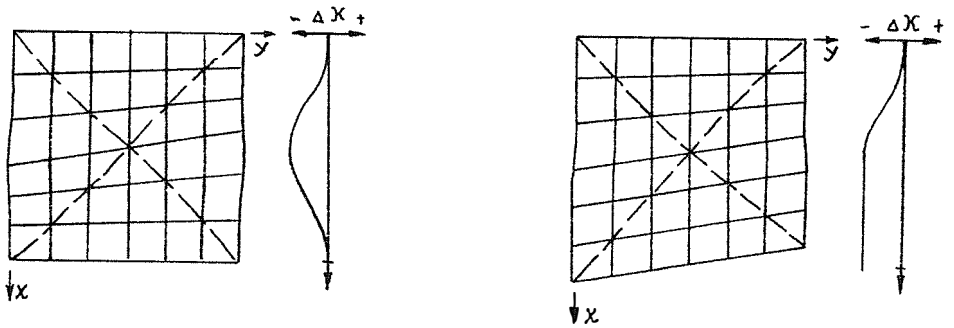


Abb. 3-13: Kantungsfehler

3.7. Einflüsse der Geländeform (Δh)

Für die Lage des abgebildeten Objektes ist die Flughöhe über Grund entscheidend. Daher sind die Auswirkungen, die von einer höhenmäßigen Schwankung der Flugbahn (ΔY) herrühren und jene, die von Schwankungen in den Geländehöhen herrühren, identisch. Geometriefehler treten nur im Scan, also quer zur Flugrichtung auf und sind abhängig von der Entfernung des Objektpunktes von der Scanmitte.

$$\Delta Y = \frac{-\Delta h \; Y}{H - \Delta h} \qquad (3\text{-}12)$$

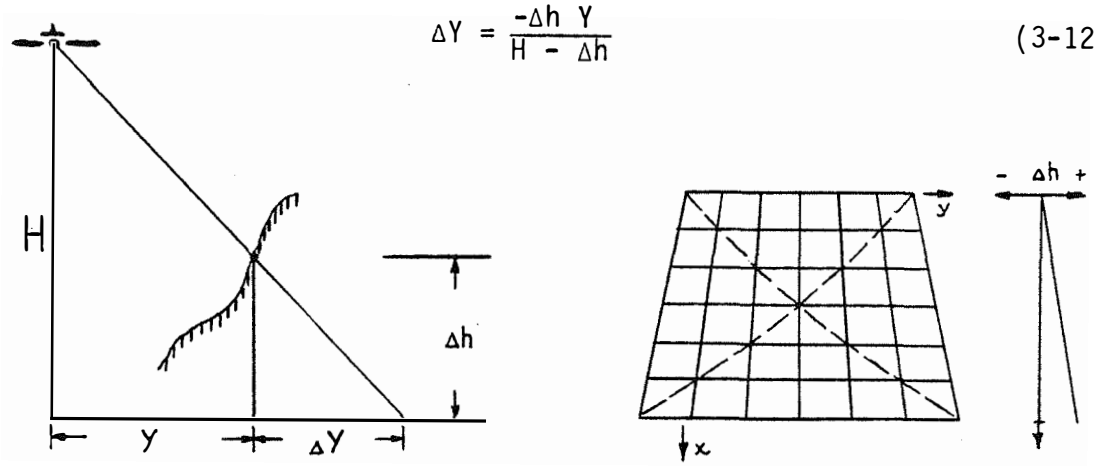


Abb. 3-14

3.8. Systembedingte Verzerrungen (Panoramaverzerrung)

In allen bisherigen Überlegungen (3.1 bis 3.7) wurde angenommen, daß sich die Aufnahme eines Scans wie eine Zentralperspektive verhält. Dies ist bei den Scanners der Fall, welche mit Optiken und Detektorreihen arbeiten. (Abb. 2-3) Jene Systeme jedoch, die auf dem Prinzip des rotierenden Spiegels basieren, erzeugen zusätzlich Geometriefehler innerhalb eines Scans, da bei konstanter Winkelgeschwindigkeit des Spiegels keine lineare Abtastung des Geländes erfolgt.

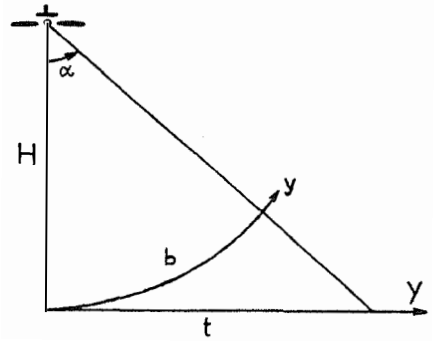


Abb. 3-15

Ein Scan im MSS-Bild ist die Abbildung der Tangente (t=Scan im Objekt) auf den Bogen (b).

In Abb. 3-15 gilt:

$$\begin{aligned} Y &= H \tan\alpha \\ y &= H\,\alpha \\ \Delta y &= Y-y = H\,(\tan\alpha-\alpha) \\ \frac{Y}{y} &= K_o = \frac{\tan\alpha}{\alpha} \end{aligned} \qquad (3\text{-}13)$$

Um die Panoramaverzerrung zu korrigieren, muß der Scan bei der Wiedergabe in Abhängigkeit der Entfernung von der Scanmitte gestreckt werden. Diese Streckung nimmt gegen den Rand hin mit $1/\cos^2\alpha$ zu.

$$dY = H \frac{1}{\cos^2\alpha}\, d\alpha \qquad dy = H\, d\alpha$$

$$\frac{dY}{dy} = \frac{1}{\cos^2\alpha} = K_1 = \text{differentieller Streckungsfaktor} \qquad (3\text{-}14)$$

Da die Panoramaverzerrung nur systembedingt und unabhängig von der Aufnahmeposition ist, ist es sinnvoll, diese Verzerrung bereits bei der Bildausgabe der Original-MSS-Bilder zu berücksichtigen. Für den Fall eines digitalen Bildes besteht ein linearer Zusammenhang zwischen α und der Bildelementposition innerhalb des Scans.

$\frac{2A}{2P} = K$

$\alpha = p\,K$

2P... Anzahl der Bildelemente im Scan
p... aktuelle Bildelementposition, bezogen auf Scanmitte

Es lassen sich daher die Größen K_o und K_1 (Abb. 3-16) auch als Funktion von p ausdrücken.

α	K_o	K_1
0	1.00	1.00
10	1.01	1.03
20	1.04	1.13
30	1.10	1.33
40	1.20	1.70
50	1.37	2.42
60	1.65	4.00

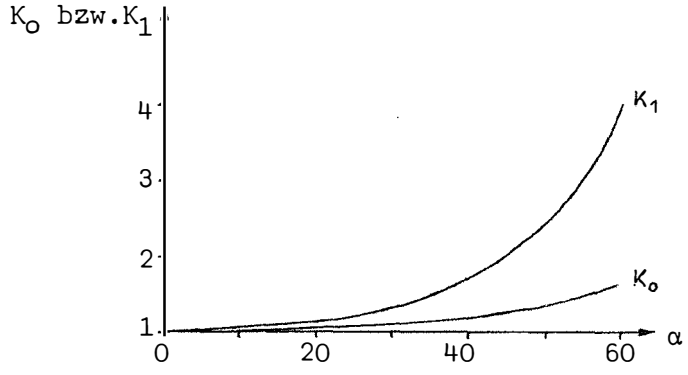


Abb. 3-16

Die Panoramakorrektur eines digitalen Bildes müßte durch Vergrößerung der Bildelemente in Scanrichtung in Abhängigkeit der Bildelementposition p er-

folgen. Diese Vergrößerung kann nur durch eine Vervielfältigung erreicht werden. Es gibt prinzipiell zwei Arten der Panoramakorrektur in digitalen Bildern.

1) Vervielfältigung der Bildelemente anhand des Faktors K_1, der für jedes Bildelement im Scan berechnet wird. Wegen der Rundung des unrunden Faktors K_1 ergibt sich eine Fehlersummation, sodaß ein Bildelement am Streifenrand über seiner Sollage um mehrere Bildelemente verschoben erscheinen kann. Das Bild wird zwar optisch korrigiert, bei der geometrischen Ausmessung kann aber nicht mehr auf die exakte ursprüngliche Lage eines Bildelementes geschlossen werden (Abb. 3-17).

2) Die Vervielfältigung erfolgt immer mit Bezug auf die Streifenmitte durch den Faktor K_0. Die fortlaufende Fehlersummation wird dadurch ausgeschlossen. Der Fehler kann in der gesamten Streifenbreite maximal ein halbes Bildelement betragen (Abb. 3-17).

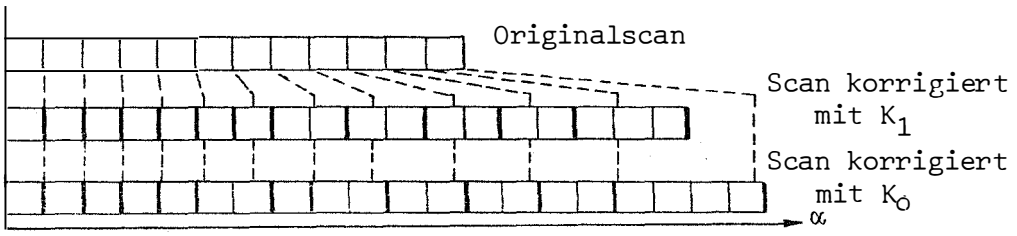
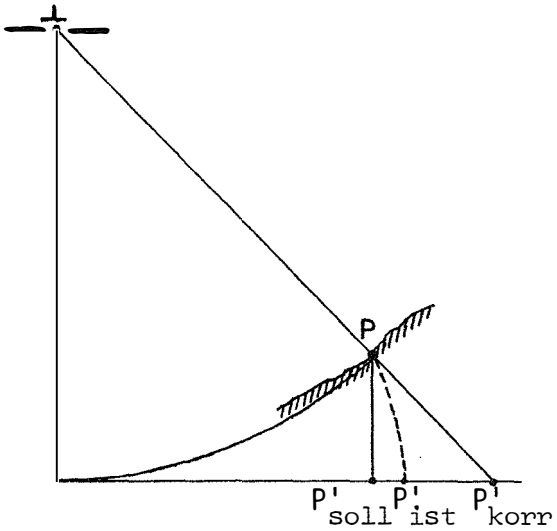


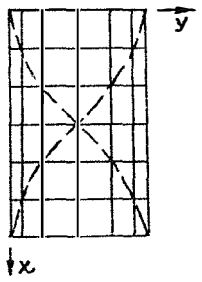
Abb. 3-17: Panoramakorrektur

Bei der Panoramakorrektur erfolgt eine geometrische Umordnung der Bildelemente und somit eine Änderung der Digitalisierungsstellen innerhalb des originalen Signalverlaufs. Für die Zuordnung der Grauwerte zu den Bildelementen sind einige Methoden üblich, die im Kapitel 4. näher besprochen werden sollen. Eine bloße Bildelementvervielfachung ohne Grauwertoperation entspricht der "Methode der nächsten Nachbarschaft" und ist im allgemeinen ausreichend.

Bei Flügen entlang von Tälern ist es unter Umständen besser, keine Panoramakorrektur anzubringen. Die Verzerrung infolge eines Geländehöhenunterschiedes wird nämlich teilweise durch die Panoramaverzerrung wieder aufgehoben. (Abb. 3-18a)



(a): Panoramakorrektur im Gebirge



(b): Panoramaverzerrung

Abb. 3-18

4. ENTZERRUNGSVERFAHREN UND GRAUWERTZUORDNUNGEN

In diesem Kapitel soll überblickmäßig überlegt werden, welche Möglichkeiten bestehen, aus verzerrten Scannerbildern geometrisch richtige Bilder herzustellen.

Die verschiedenen Entzerrungsmethoden lassen sich prinzipiell nach drei Kriterien einteilen.

(4.1.) Nach Art des Lösungsansatzes in
(4.1.1.) parametrische Verfahren
(4.1.2.) unparametrische Verfahren

(4.2.) Nach Art der Umbildungsmethode in
(4.2.1.) optische Umbildungen
(4.2.2.) digitale Umbildungen

(4.3.) Nach Art der Umbildungsrichtung in
(4.3.1.) direkte Umbildeverfahren
(4.3.2.) indirekte Umbildeverfahren

Für ein Entzerrungsverfahren sind alle Kombinationen von 4.1. bis 4.3. möglich.

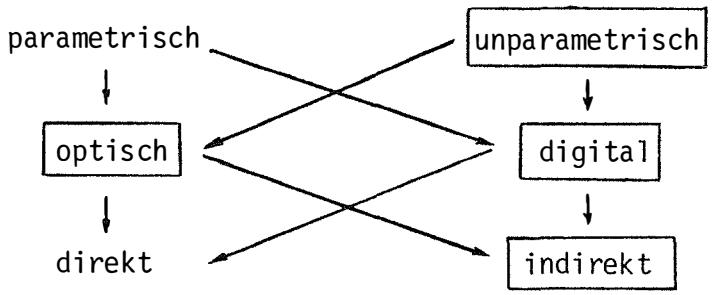


Abb. 4-1: Entzerrungsmethoden (▭ in Kap. 5. besprochen)

Die später näher beschriebenen Verfahren befassen sich nur mit dem unparametrischen Ansatz, wobei sowohl die optische als auch die digitale Umbildung mit Hilfe der indirekten Bildzuordnung verwendet wird.

4.1. Art des Lösungsansatzes

4.1.1. Parametrische Verfahren

Bei diesem Ansatz werden die Parameter, welche die Verzerrung des Bildes verursachen, berücksichtigt und Abbildungsgleichungen aufgestellt. Auf Grund des Aufnahmeprinzipes ist es nicht möglich, für das gesamte MSS-Bild eine einheitliche Abbildungsgleichung aufzustellen. Die Abbildungseinheit ist der Scan. Ein Scan kann als eine perspektive Abbildung angesehen werden, deren Ausdehung in Flugrichtung konstant = Ø ist. Dabei wird die endliche Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels vernachlässigt und unterstellt, daß in Abtastrichtung die Panoramakorrektur (3.8.) angebracht wird.

Es gilt somit für jeden Scan

$$X = \mathbf{R}(x - x_0) + X_0 \qquad (4\text{-}1)$$

X ... Koordinaten des Objektpunktes im Entzerrungssystem (z.B. Landeskoordinatensystem)

X_0 ... Koordinaten des Projektionszentrums im Entzerrungssystem

x ... Bildkoordinaten des Objektpunktes

x_0 ...Bildkoordinaten des Projektionszentrums

R ... räumliche Drehmatrix, eine Funktion der Drehwinkeln ω,ϕ,κ

Daraus erhält man die bekannten Abbildungsgleichungen:

$$x = x_0 - c(r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0))/N$$

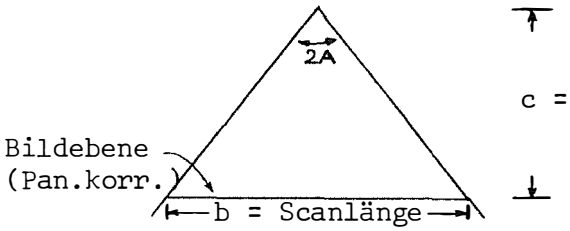
$$y = y_0 - c(r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0))/N$$

wobei $N = r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)$

r_{ij} sind die Koeffizienten von R

c ist die Kammerkonstante

Die Kammerkonstante ist bei den Spiegelscannern im Gerät nicht vorhanden. Sie ist eine Rechengröße, die sich aus der Analogie zu den echt perspektiven Aufnahmen ableiten läßt. (Abb. 4-2)



$$c = \frac{b}{2 \tan A} \qquad (4\text{-}2)$$

Abb. 4-2

Durch Einführen von Näherungswerte für die einzelnen Unbekannten, wobei ω, ϕ und κ in 1. Näherung $\emptyset$ gesetzt werden können, läßt sich die Lösung in eine lineare Form bringen. Die Unbekannten sind dann die Verbesserungen zu den Näherungswerten. Für jeden Paßpunkt lassen sich 2 Verbesserungsgleichungen aufstellen.

$$v_{x\,i} = dx_o + a_{oi}dc_s + a_{1i}d\omega_s + a_{2i}d\phi_s + a_{3i}d\kappa_s + a_{4i}dX_{os} + a_{5i}dY_{os} + a_{6i}dZ_{os} - (x - \bar{x})$$

$$v_{y\,i} = \text{analog zu } v_{x\,i} \qquad (4\text{-}3)$$

i .... Index des Paßpunktes

s .... Index des Scans

$\bar{x}$ .... gemessene Bildkoordinaten der Paßpunkte

x .... anhand der Näherungswerte und der perspektiven Beziehungen gerechnete Bildkoordinate des Paßpunktes

a_{ji} ... partielle Differentialquotienten des perspektiven Abbildungsgleichungen, gerechnet aus den Näherungswerten

Für eine vollständige Lösung des Problems sind die mit Hilfe der Paßpunkte gewonnenen Verbesserungsgleichungen nicht ausreichend. Man benötigt eine Verknüpfungsinformation zwischen den einzelnen Scans. Diese kann in Form von Differenzengleichungen angegeben werden, in denen berücksichtigt wird, daß die Orientierungselemente benachbarter Scans korreliert sind.

Für die Aufstellung dieser Differenzengleichungen kann keine strenge Vorschrift gegeben werden, da die Korrelationen von vornherein nicht bekannt sind und nur empirische Annahmen getroffen werden können. Es ist also möglich, pro Orientierungselement Differenzenverbesserungsgleichungen anhand einer a priori angenommenen Kovarianzfunktion aufzustellen.

Beschränkt man sich nicht nur auf die Rektifizierung eines einzelnen Scannerstreifens, dann kommen noch weitere Verbesserungsgleichungen hinzu, welche aus den Verknüpfungspunkten zwischen den Streifen gebildet werden. Die zur Lösung dieses Problems entstehenden Normalgleichungssysteme werden sehr umfangreich, deren Bearbeitung selbst auf Großrechenanlagen zu Schwierigkeiten führen kann.

Als Ergebnis erhält man die Orientierungselemente für jene Scans, in welchen Paßpunkte und Verknüpfungspunkte gemessen worden war. Die Orientierungselemente für dazwischenliegende Scans, müssen durch ein Interpolationsverfahren gewonnen werden, wobei die für die Aufstellung der Differenzengleichungen verwendete Kovarianzfunktion zu Hilfe genommen werden kann.

Ein Vorteil der parametrischen Lösungsmethode liegt in der Möglichkeit, ohne Schwierigkeiten die Geländeform berücksichtigen zu können. Dies ist besonders für Entzerrung von Aufnahmen stark bewegten oder gebirgigen Geländes wichtig. Ein Nachteil liegt in dem großen Rechenaufwand, der durch die großen Gleichungssysteme entsteht, besonders bei der Entzerrung von Bildmosaiken. /Bähr, 1976a; Ebner, 1976; Konecny, 1970; Leberl, 1970; u. a./

4.1.2 Unparametrische Verfahren

Bei diesen Verfahren bleiben die Verzerrungsursachen unberücksichtigt. Es wird ein allgemeiner Interpolationsansatz verwendet, der anhand gleichmäßig über das MSS-Bild verteilter Lagepaßpunkte, das gesamte MSS-Bild geometrisch an die Rektifizierungsvorlage anpaßt.

4.1.2.1 In der Praxis haben sich verschiedene Ansätze durchgesetzt, wovon Polynome besonders für einfache Entzerrung Bedeutung erlangt haben. /Bähr, 1975; Bernstein, 1976/

$$X = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij}\, x^i\, y^j \quad ; \quad Y = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij}\, x^i\, y^j \qquad (4\text{-}4)$$

n ist der maximale Grad des Polynomes.

Sind mehr Paßpunkte vorhanden als für die Bestimmung der Polynomkoeffizienten notwendig wären, so erfolgt ein Ausgleich. Die Polynomansätze sind nicht sehr flexibel und bringen nur bei leicht verzerrten Bildern (z.B. Landsat-Bilder) gute Ergebnisse.

4.1.2.2. Universeller verwendbar, wenn auch rechnerisch aufwendiger, ist die Entzerrung mit Hilfe der "Interpolation nach kleinsten Quadraten" oder der linearen Prädiktion. / Kraus, 1975b; Bähr, 1976a/
Aus Gründen der Vereinfachung werden die beiden Koordinaten unabhängig voneinander behandelt: (4-5)[§]

$$X = F_x(x,y) + \sum_{i=1}^{n} a_i \, f_x(x,y,x_i,y_i) \; ; \; Y = F_y(x,y) + \sum_{i=1}^{n} b_i \, f_y(x,y,x_i,y_i)$$

Die Anzahl der Koeffizienten n entspricht der Anzahl der verwendeten Paßpunkte, sodaß auch bei diesem Verfahren unter Umständen sehr große Gleichungssysteme auftreten. Durch Zerlegung eines MSS-Bildes in sich überlappende Teile und getrennte Behandlung derselben kann jedoch die Größe der Gleichungssysteme im begrenzten Rahmen gehalten werden.

Die Koeffizienten a_i und b_i ergeben sich aus den statistischen Eigenschaften der Verzerrungswerte l_i an den Paßpunkten und aus der Forderung, daß das Quadrat des mittleren Fehlers der interpolierten Werte ein Minimum wird. Daraus ergibt sich die endgültige Formel für die "Interpolation nach kleinsten Quadraten"

$$u = \mathbf{c}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{l} \; ; \qquad X = F_x(x,y) + u_x \qquad Y = F_y(x,y) + u_y \qquad (4\text{-}6)$$

wobei $\mathbf{c}$ die Kovarianzen der Verzerrungswerte zwischen dem zu interpolierenden Punkt und den Paßpunkten enthält.
($\mathbf{c}$ ist ein Vektor mit n Spalten.)

$\mathbf{C}$ enthält die Kovarianzen der Verzerrungswerte zwischen den Paßpunkten.
($\mathbf{C}$ ist eine symmetrische Matrix, die n x n Elemente hat und in der Hauptdiagonalen die Varianzen der Verzerrungswerte enthält; n = Anzahl der Paßpunkte.)

Bei entsprechendem Ansatz ist auch Interpolation mit Filterung möglich, d.h., daß kleine unregelmäßige Fehler (z.B. Meßungenauigkeit), die von Paßpunkt zu Paßpunkt rein zufälligen Charakter besitzen, beim Aufstellen der Interpolationsgleichungen berücksichtigt werden können.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist, daß die Verzerrungswerte in Bezug auf das gesamte Interpolationsgebiet eine stochastische Größe darstellen, aber in Teilbereichen systematische Eigenschaften zeigen. Diese Voraussetzung kann durch einfache Transformationsoperationen ("zentrieren") ausreichend gut erreicht werden.

[§] F = Deterministischer Anteil; f = Kovarianzfunktion (Kap. 5.2.)

Nachteil aller dieser unparametrischen Verfahren ist, daß die Geländeform nur sehr umständlich, nur näherungsweise oder überhaupt nicht berücksichtigt werden kann. Das heißt aber auch, daß die Geländeform bereits durch die Auswahl der Paßpunkte ausreichend genug erfaßt werden muß. In der Praxis zeigt sich jedoch, daß dafür nicht genügend Paßpunkte angegeben werden können. Daher sind unparametrische Lösungsansätze nur im flachen oder wenig bewegtem Gelände mit befriedigender Genauigkeit einsetzbar. Ein großer Vorteil jedoch ist der relativ geringe Rechenaufwand bei großen Bildmosaiken.

4.2. Art der Umbildemethode

4.2.1 Optische Umbildung (Abb. 4-3)

In vielen Situationen liegen die MSS-Bilder nur auf photographischem Film vor. Gerade die Bilder der LANDSAT-Satelliten haben in dieser Form große Verbreitung gefunden. Für die Entzerrung kommt also in diesem Fall ein Verfahren in Frage, welches durch optische Umbildung aus dem Original-MSS-Bild wieder ein auf Film belichtetes entzerrtes Ergebnis erzeugt. Mit Hilfe der digital gesteuerten Differentialentzerrungsgeräte, welche in der Orthophotoproduktion eingesetzt sind, wird es möglich, diese Umbildemethode durchzuführen. In dem später erwähnten praktischen Beispiel wurde für diese Entzerrungsart das Differentialentzerrungsgerät AVIOPLAN OR1 eingesetzt. (Satellitenbildkarte von Österreich)/Jansa, Zierhut, 1981/

Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, daß das Endergebnis nur in Form eines Filmes vorliegt und daher auch wieder nur für optische Verarbeitungsprozesse weiter verwendet werden kann. Zu beachten ist, daß durch den optischen Umbildeprozeß die Bildqualität negativ beeinflußt wird. Es ist daher Belichtung und Entwicklung des Filmmaterials sorgfältig durchzuführen. Ein Nachteil ist auch, daß bei Herstellung eines Filmmosaiks das eigentliche Mosaik erst durch manuelle Montage der einzelnen entzerrten Mosaikteile entsteht.

4.2.2. Digitale Umbildung (Abb. 4-4)

Liegen die MSS-Bilder in digitaler Form gespeichert vor (Grauwerte der Bildelemente auf Magnetband), so ist ein Umbildeverfahren sinnvoll, daß diese Form des Bildes beibehält und die Entzerrung lediglich durch Umsortieren der Bildelemente herstellt. Eine optische Darstellung des Bildes ist zwar unumgänglich, wird jedoch nur mehr als Hilfsmittel benötigt. Die optische Dar-

stellung des Original-MSS-Bildes dient zur Auswahl der Paßpunkte, die optische Darstellung des rektifizierten Endproduktes zur Genauigkeitskontrolle. Die filmische Ausgabe ist jedenfalls nicht das eigentliche Endprodukt.

Der große Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die Originalgrauwerte erhalten bleiben und damit aus dieser Sicht keine Qualitätsminderung des Ergebnisses gegenüber dem Original eintritt. Die entzerrten Daten können jedem beliebigen Bildverarbeitungsprozeß zugeführt werden. Als Nachteil gegenüber der optischen Umbildung ist der wesentlich umfangreichere Rechenaufwand und Speicherplatzbedarf zu erwähnen. Auch darf nicht vergessen werden, daß die Herstellung der Bilder auf Film einen zusätzlichen Arbeits- und Rechenaufwand darstellt. /Konecny, Schuhr, 1975; Jansa, 1980/

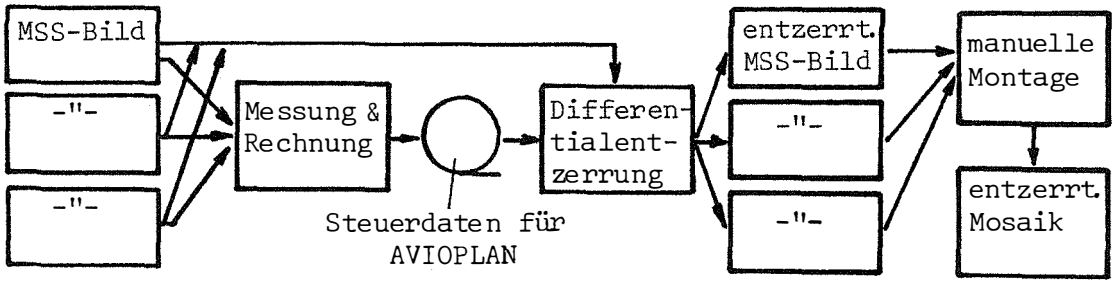


Abb. 4-3: Prinzip der optischen Entzerrung

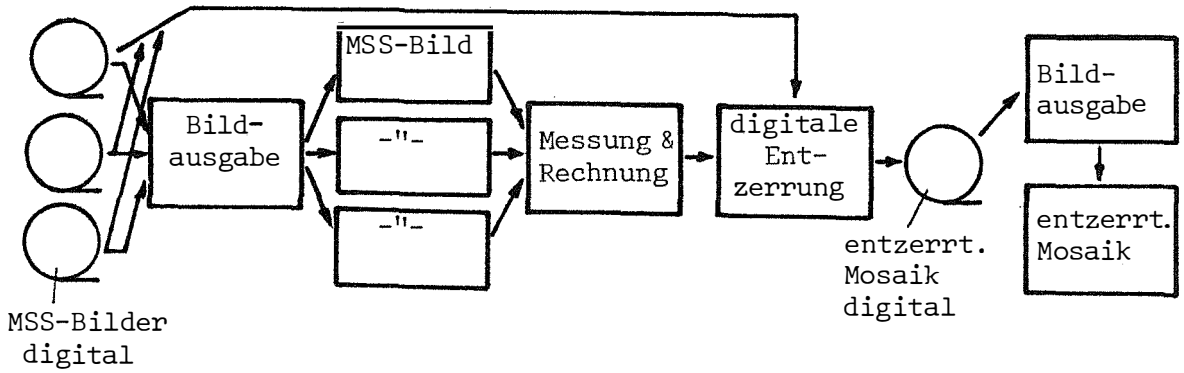


Abb. 4-4: Prinzip der digitalen Entzerrung

4.3. Art der Umbilderichtung

Die Betrachtung der Umbilderichtung ist nur bei digitaler Umbildung anschaulich erklärbar, daher soll im folgenden diese Unterscheidung anhand des digitalen Umbildeverfahrens erläutert werden.

4.3.1. Direktes Umbildeverfahren

Dieses Verfahren geht vom MSS-Bild aus. Die Bildelemente des MSS-Bildes werden Element für Element behandelt und an ihre geometrisch richtige Position gestellt.

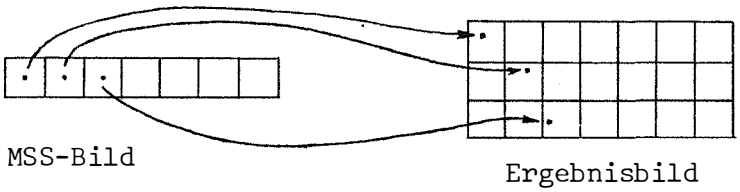


Abb. 4-5: Direkte Umbildemethode

Es wird jedes Element im Original-MSS-Bild angesprochen; es kann jedoch vorkommen, daß Elemente im Ergebnisbild nicht adressiert werden und somit keinen Grauwert erhalten. Das Ergebnisbild würde Lücken aufweisen, für die ein geeigneter Grauwert aus den umgebenden Bildelementen interpoliert werden muß. Ebenso kann bei mehrfach adressierten Bildelementen eine Mittelung erfolgen oder der zuletzt zugewiesene Grauwert übernommen werden.

4.3.2. Indirektes Verfahren

Ausgangsbild ist der entzerrte Ergebnisbildbereich. Die Positionen der entzerrten Bildelemente werden in das Original-MSS-Bild Element für Element zurückgerechnet. Der dort angetroffene Grauwert wird in das entsprechende Bildelement im Ergebnis übernommen.

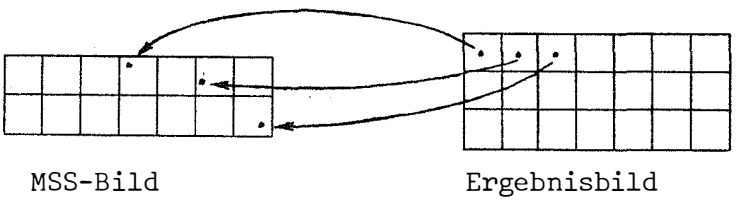


Abb. 4-6: Indirekte Umbildemethode

Im Ergebnisbild wird jedes Element angesprochen und kann daher auch mit einem eigenen Grauwert besetzt werden. Das Ergebnis weist keine Lücken auf, ein Interpolationsverfahren zum Füllen ist daher überflüssig. Aller-

dings wird sicherlich nicht jedes Bildelement im Original-MSS-Bild angesprochen, andere Elemente werden vielleicht mehrfach angesprochen.

Betrachtet man die optische Umbildung, wie sie auf dem AVIOPLAN durchgeführt wird, so läßt sich diese als indirektes Verfahren einordnen. Zuerst wird die geometrische Position im Ergebnisbild festgelegt, dann die entsprechende Position im Original-MSS-Bild eingestellt und der Bildinhalt umprojeziert.

4.4. Grauwertzuordnungen

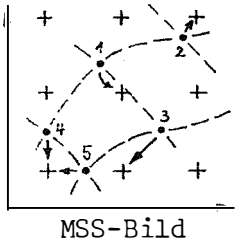
Die geometrischen Aspekte der Grauwertzuordnungen wurden bereits in 4.3.1. und 4.3.2. (direkte und indirekte Umbildeverfahren) und in 3.8. (Panoramakorrektur) besprochen. Es wurde auch bereits angedeutet, daß bei digitaler Umbildung die Zuordnungen der Grauwerte nicht umkehrbar eindeutig sind und daher die entstehenden Lücken gefüllt werden müssen. Auch stellt sich die Frage, welcher Grauwert übernommen werden soll, wenn der Adressierungspunkt nicht mit einem Bildelementmittelpunkt zusammenfällt. Im folgenden sollen drei der gebräuchlichsten Zuordnungsmöglichkeiten besprochen werden.

(4.4.1.) Methode der nächsten Nachbarschaft (nearest neighbourhood)
(4.4.2.) Methode der bilinearen Grauwertinterpolation
(4.4.3.) Methode der Grauwertinterpolation höherer Ordnung

Diese drei Methoden sollen ohne Beschränkung der Allgemeinheit anhand des indirekten Verfahrens erklärt werden.

4.4.1. Methode der nächsten Nachbarschaft

Dem Ergebnisbild wird der Grauwert jenes Bildelementes zugeordnet, dessen Bildelementmittelpunkt am nächsten der geometrischen Adressierungsstelle liegt. Für die geometrischen Orte gleicher Entfernung zu mehreren Mittelpunkten (= Grenzlinien zwischen den Bildelementen) ist a priori eine Vorentscheidung festzulegen. So kann an solchen mehrdeutigen Stellen entschieden werden, daß die Zuordnung immer zum positionsniedrigsten Bildelement erfolgt.



+ Bildelementmittelpunkte
• Adressierungsstellen (= Bildelementmittelpunkte des Ergebnisses)
↓ Zuordnung der Adressierungsstellen

Abb. 4-7

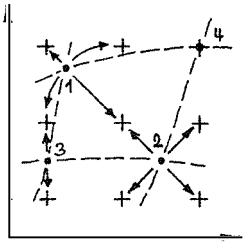
Bildelement	
1 und 2	Zuordnung ist eindeutig durchführbar.
3	Es gibt 4 gleich entfernte nächste Nachbarn. Die eindeutige Zuordnung erfolgt aufgrund der Vorentscheidung (= positionsniedrigster Nachbar).
4	Es gibt 2 gleich entfernte Nachbarn. Zuordnung erfolgt aufgrund der Vorentscheidung.
5	Siehe Bildelement Nr. 4.

Wird ein- und dasselbe Bildelement mehrmals angesprochen, so erscheint der Grauwert mehrmals jeweils im entsprechenden Bildelement des Ergebnisses. Werden Bildelemente nie angesprochen, so erscheint ihr Grauwert auch nie im Ergebnis.

Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt in der hohen Rechengeschwindigkeit. Als ein weiterer Vorteil ist noch zu erwähnen, daß das Ergebnisbild sicherlich nur solche Grauwerte enthält, die auch im Original bereits vorhanden waren. Dies ist besonders wichtig, wenn klassifizierte Bilder rektifiziert werden, da dort ein bestimmter Grauwert die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse kennzeichnet. Als Nachteil ist zu erwähnen, daß durch dieses Verfahren Lageverschiebungen bis zu einem halben Bildelement vorkommen können und dadurch das entzerrte Bild einen sehr unruhigen Eindruck erweckt. Ebenso nachteilig ist, daß einige Bildelemente nicht adressiert und daher nicht berücksichtigt werden, sodaß ein Informationsverlust gegenüber dem Originalbild gegeben ist. Dieser Nachteil kann aber dadurch umgangen werden, daß die Größe der Bildelemente im Ergebnisbild wesentlich kleiner definiert wird als sie im Original-MSS-Bild ist.

4.4.2. Methode der bilinearen Grauwertinterpolation

Fällt der Adressierungspunkt nicht mit einem Bildelementmittelpunkt exakt zusammen, so errechnet sich der in das Ergebnisbild übernommene Grauwert aus der bilinearen Interpolation der 4 nächsten Nachbarn.



MSS-Bild

+ Bildelementmittelpunkte
· Adressierungsstellen (= Bildelementmittelpunkte des Ergebnisses)
↑ Zuordnung der Adressierungsstellen

Abb. 4-8

Bildelement

1 und 2 Grauwert errechnet sich aus der bilinearen Interpolation von 4 Original-Grauwerten.

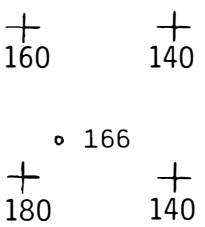
3 Da der Adressierungspunkt genau auf einer Mittelpunktverbindung liegt, beschränkt sich die bilineare auf eine lineare Interpolation.

4 Grauwert wird unverändert übernommen.

$g = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$

g ... interpolierter Grauwert
x,y ... Koordinaten, die die Exzentrizität der Adressierung bestimmen
a_i ... Interpolationskoeffizienten

Beispiel:



Für x = y = 0.25 ergeben sich die Koeffizienten:

$a_o = 180$; $a_1 = -40$;
$a_2 = -20$; $a_3 = 20$ → g = 166

Vorteil dieses Interpolationsverfahrens gegenüber der Methode der nächsten Nachbarschaft ist die Verminderung von Stufenbildungen im entzerrten Bild. Die Kontraste erscheinen aber verwischt. Durch das Mittelungsverfahren wird die Grauwertdynamik vermindert. Der minimale Grauwert eines Bildes wird erhöht und der maximale Grauwert verkleinert. Das Interpolationsverfahren wirkt wie ein Tiefpaßfilter. Außerdem ist der Rechenaufwand, wie die Praxis zeigt, gegenüber dem Verfahren der nächsten Nachbarschaft bis etwa 10-mal so hoch.

4.4.3. Grauwertinterpolation höherer Ordnung

Die in der Nachrichtentechnik verwendete Signalübertragungsfunktion $\bar{f}(x) = \sin x/x$ wird für die Interpolation der Grauwerte herangezogen. Der interpolierte Grauwert errechnet sich aus dem allgemeinen Mittel aller Grauwerte (Faltung der Interpolationsfunktion mit den Grauwerten). Die erwähnte Interpolationsfunktion wird in Abhängigkeit der Entfernung des Adressierungspunktes von den Bildelementmittelpunkten verwendet.

Da $\bar{f}(x) = \sin x/x$ eine unendliche gedämpfte Schwingung darstellt, so heißt dies, daß immer alle Bildelemente für die Interpolation eines Wertes herangezogen werden müssen. In der Praxis verwendet man daher nur eine Approximationsfunktion f(x), deren Funktionswert in der Entfernung einer Bildelementgröße eine Nullstelle besitzt und ab der Entfernung von zwei Bildelementgrößen konstant Ø wird. Diese Funktion kann durch eine Splinedarstellung beschrieben werden, wobei folgende Tangentenbedingungen gelten:

$$f'_{(s=Ø)} = f'_{(s=2)} = Ø$$

$$f'_{(s=1)} = \bar{f}'_{(s=1)} = -1$$

Ableitung von $\bar{f}'_{(s=1)}$:

$$\bar{f} = \sin x/x = \sin s\pi/s$$

$$\bar{f}' = (s\pi^2 \cos s\pi - \pi \sin s\pi)/s^2\pi^2 \quad \rightarrow \quad \bar{f}'_{(s=1)} = -1$$

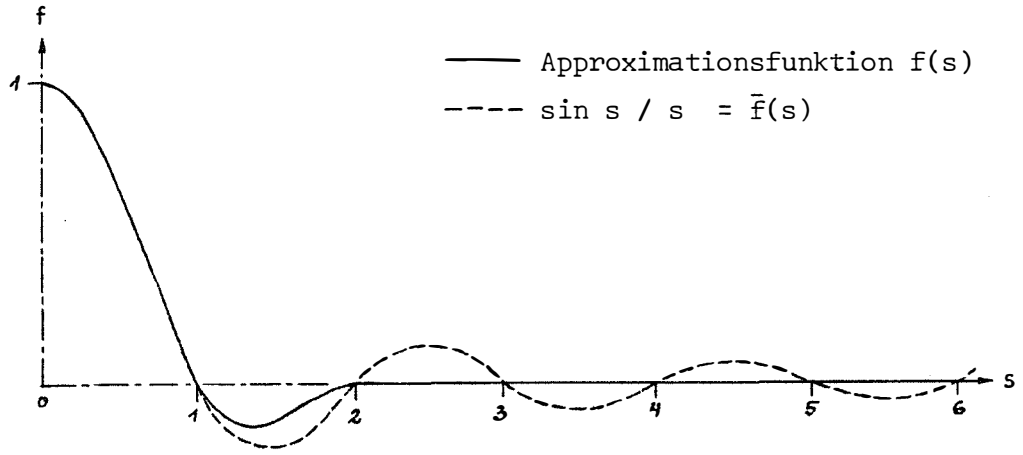


Abb. 4-9: Interpolationsfunktionen für die Grauwertzuordnung

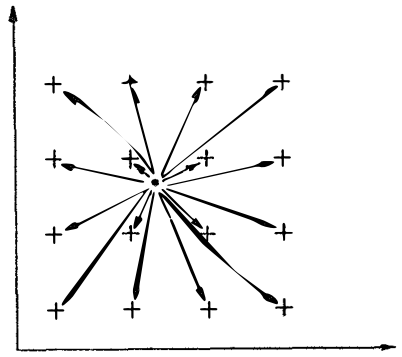
Die Splinefunktion besteht aus drei kubischen Polynomen, wobei sich für die einzelnen Intervalle auf Grund oben angeführter Bedingungen folgende Funktionen ergeben:

Intervall $[Ø,1[\quad f_{(s)} = 1-2s^2 + s^3$

$[1,2[\quad f_{(s)} = 4-8s + 5s^2 - s^3$

$[2,\infty] \quad f_{(s)} = Ø$

Mit dieser Approximation wird erreicht, daß nie mehr als 16 (= 4x4) Bildelemente für die Interpolation benötigt werden.



MSS-Bild

+ Bildelementmittelpunkte
· Adressierungsstellen (= Bildelement-mittelpunkte des Ergebnisses)
↑ Zuordnung der Adressierungsstellen

Abb. 4-10

140	140	120	120
160	160	140	120
180	180	140	120
180	200	160	140

g = 167

Gegenüber der bilinearen Interpolation zeigt dieses Verfahren wenig Tiefpaßfiltereffekt, der Bildkontrast bleibt erhalten, die Unstetigkeiten im Bild, wie sie bei der Methode der nächsten Nachbarschaft auftreten, werden vermieden. Jedoch benötigt dieses Verfahren etwa die 20-fache Rechenzeit gegenüber der Methode der nächsten Nachbarschaft.

Bei allen Interpolationsverfahren treten im Ergebnisbild Grauwerte auf, die im Originalbild nicht vorhanden sein müssen. Dies ist berechtigt, wenn man bedenkt daß durch die Digitalisierung die Kontinuität des empfangenen Signals gestört worden ist. Denkt man sich nämlich die Digitalisierungsschritte etwas verschoben, so erhält man andere Grauwerte. (Abb.4-11)

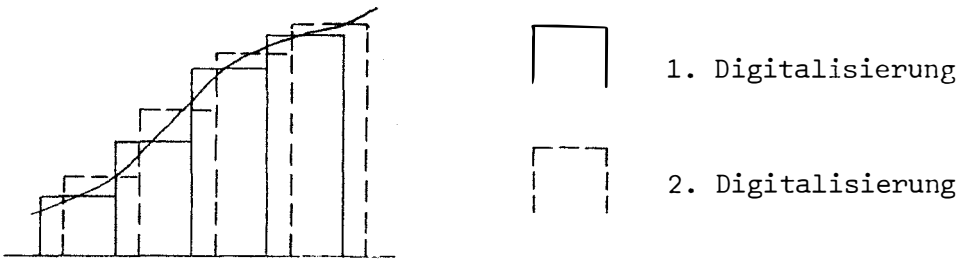


Abb. 4-11

4.4.4. Diskussion

Im folgenden sollen die Wirkungsweisen der verschiedenen Grauwertzuordnungen anhand eines eindimensionalen Signals demonstriert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse gelten aber auch für den zweidimensionalen Fall. Dabei soll die Digitalisierung eines vorgegebenen Ausgangssignals simuliert werden und aus den digitalisierten Werten das ursprüngliche Signal zu "rekonstruieren" versucht werden. Für diese Zwecke werden die Grauwertzuordnungsfunktionen

der linearen Interpolation,
der Faltung höherer Ordnung und
der nächsten Nachbarschaft

verwendet. Der rekonstruierte Signalwert an einer bestimmten Stelle ist eine Funktion der Entfernung zu den übrigen Digitalisierungsstellen, dessen Digitalisierungswerten und der gewählten Grauwertzuordnungsfunktion. Als Digitalisierungsstelle ist immer die Intervallmitte eines Digitalisierungsintervalles anzusehen.

Der Digitalisierungswert des ursprünglichen Signals ergibt sich durch den integralen Mittelwert des Signals innerhalb der jeweiligen Digitalisierungsbreite. Das heißt aber auch, daß der ursprüngliche Signalwert an der Digitalisierungsstelle (= Intervallmitte) nicht mit dem erhaltenen digitalisierten Wert übereinstimmen muß (Abb. 4-12). Alle hier besprochenen Rekonstruktionsmethoden gehen jedoch davon aus, daß diese beiden Werte gleich sind. Der so erhaltene Fehler ist aber verhältnismäßig klein.

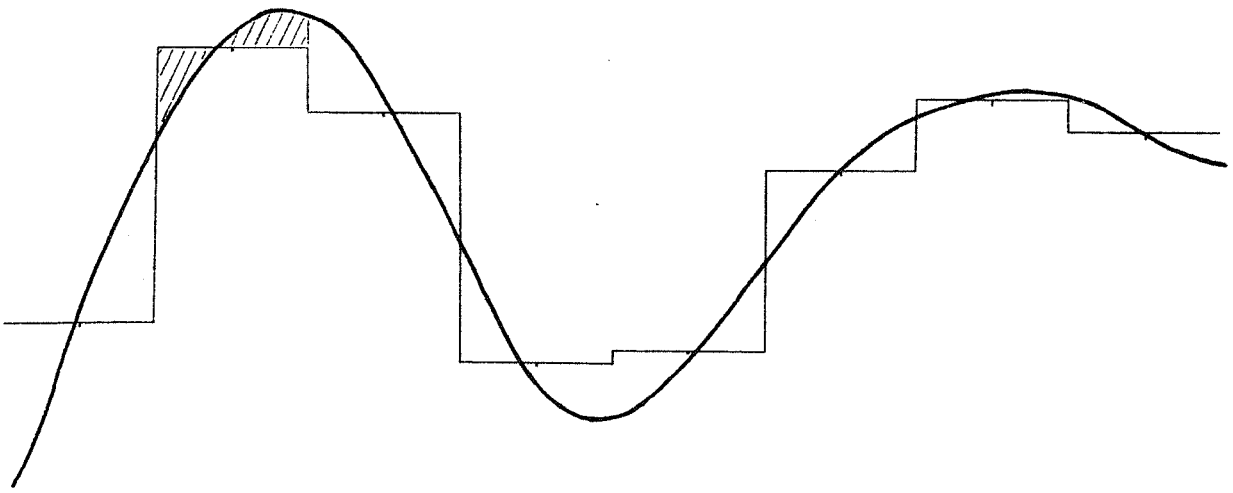


Abb. 4-12: Beispiel eines Signalverlaufes und dessen Digitalisierung

Von Interesse ist jedoch nicht so sehr der rekonstruierte Signalverlauf, sondern jenes digitale Signal, das auf Grund der Rekonstruktionsfunktionen erhalten wird. Es ist daher zu untersuchen, wie sich eine nochmalige Digitalisierung des rekonstruierten Signals auf die Signalqualität auswirkt, wobei angenommen wird, daß die alte und neue Digitalisierungsbreite gleich groß sind, die Digitalisierungsstellen gegeneinander aber um ein halbes Intervall versetzt sind.

Lineare Interpolation:
Der rekonstruierte Signalwert ergibt sich aus der allgemeinen Mittelung der Signalwerte der beiden benachbarten Digitalisierungsstellen. Die dazu verwendete Interpolationsfunktion ist in der Abbildung 4-13 skizziert. Dadurch ergibt sich ein linearer Signalverlauf von Digitalisierungsstelle zu Digitalisierungsstelle. Es ist leicht erkennbar, daß das Minimum und Maximum des rekonstruierten Signals mit dem Minimum und Maximum des digitalisierten Signals nicht übereinstimmen muß, das heißt daß die Dynamik des ursprünglichen Signals im allgemeinen nicht erreicht werden kann (Abb. 4-14). Bei nochmaliger Digitalisierung des rekonstruierten Signals ist dann mit einer merklichen Dynamikverminderung zu rechnen, die sich in der praktischen Anwendung bei der Grauwertzuordnung in den Bildern durch Kontrastminderung auswirkt.

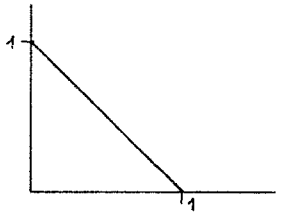


Abb. 4-13: Interpolationsfunktion für lineare Interpolation

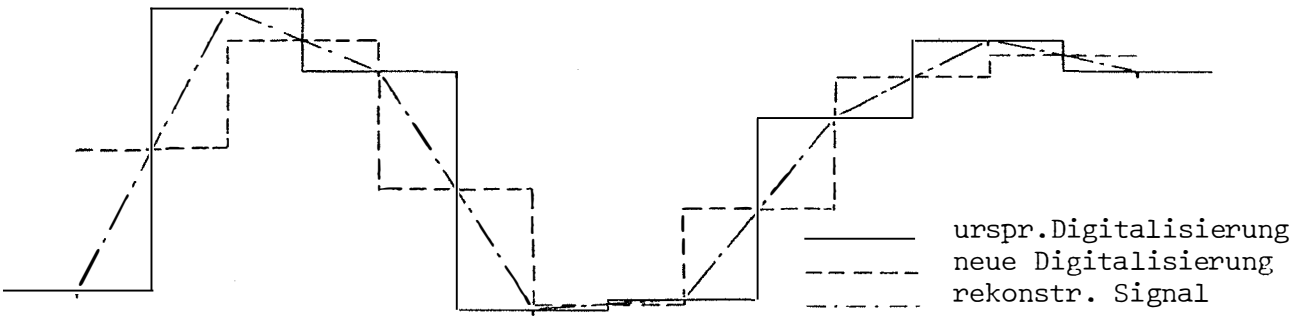


Abb. 4-14: Lineare Interpolation

Faltung höherer Ordnung:
Der rekonstruierte Signalwert wird ebenfalls als allgemeine Mittelung

der Signalwerte der umgebenden Digitalisierungsstellen betrachtet. Die Interpolationsfunktion die dafür verwendet wird ist in Abbildung 4-9 skizziert.

Das Gewicht für die Entfernung Ø ergibt sich als 1 und das Gewicht für Entfernungen vom ganzzahlig Vielfachen der Digitalisierungsbreite ist Ø. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, daß nur im 1-dimensionalen Fall der rekonstruierte Wert an einer Digitalisierungsstelle exakt dem Digitalisierungswert entspricht. Im 2-dimensionalen Fall tragen jedoch auch die diagonal liegenden Werte bei, die jedoch nicht in einer Entfernung liegen, die einem ganzzahlig Vielfachen der Digitalisierungsbreite entspricht. Man muß dann mit einer richtungsabhängigen Interpolationsfunktion arbeiten, sonst gäbe sich der Umstand, daß die rekonstruierten Signalwerte an den Digitalisierungsstellen mit den ursprünglich digitalisierten Werten nicht mehr übereinstimmten. Dieser Fehler würde im Falle der linearen Interpolation (= bilineare Interpolation) ebenfalls auftreten.

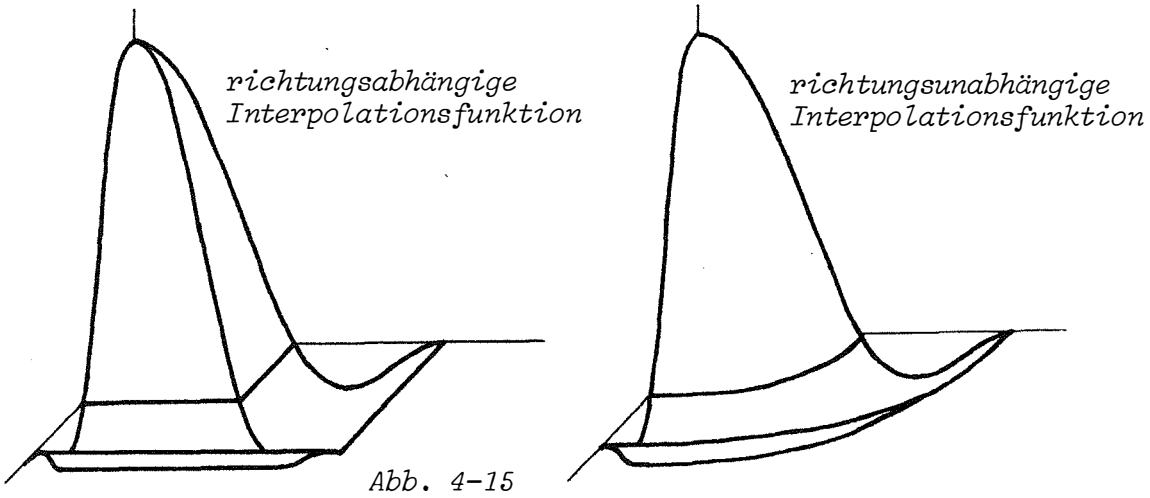


Abb. 4-15

Ob mit der sinx/x-Funktion oder mit ihrer Spline-Approximation gearbeitet wird, ist von der Qualität des rekonstruierten Signals her gesehen von untergeordneter Bedeutung. Es ist daher gerechtfertigt, in der Praxis mit der zeitgünstigeren Approximation zu rechnen.

Das rekonstruierte Signal zeigt eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit dem Originalsignal (Abb.4-12).Das heißt aber auch, daß die Digitalisierung des rekonstruierten Signals repräsentativ für den originalen Signalverlauf ist und auch die Dynamik des Signals nicht verloren geht (Abb. 4-16).

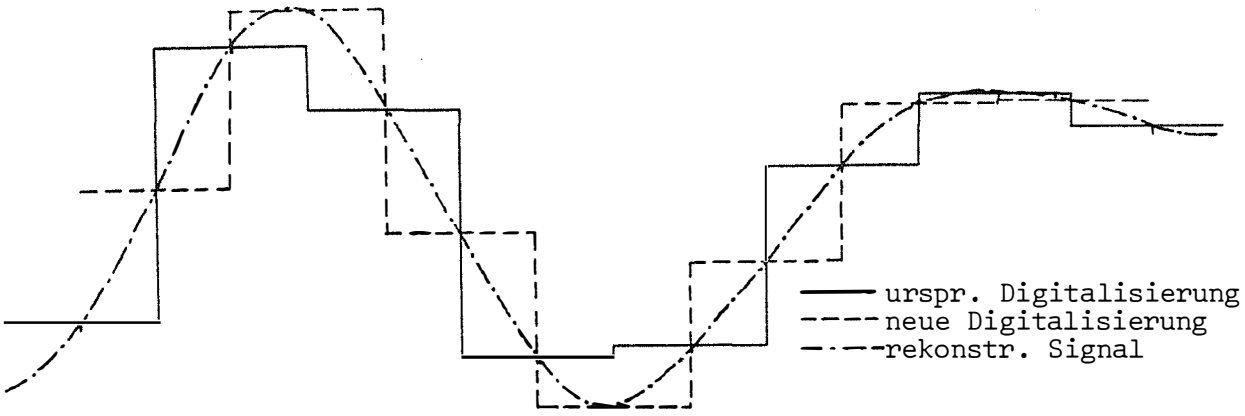


Abb. 4-16: Interpolation mit der Approximation von sinx/x

Die nächste Nachbarschaft:
Der rekonstruierte Signalwert entspricht dem Digitalisierungswert der am nächsten liegenden Digitalisierungsstelle. Das heißt aber, daß der rekonstruierte Signalverlauf exakt dem digitalisierten Signalverlauf entspricht.

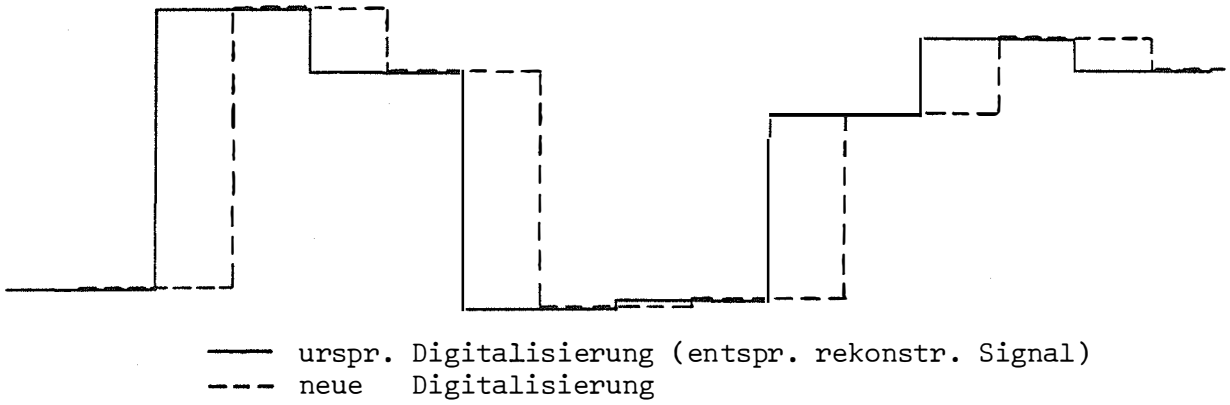


Abb. 4-17: Zuordnung nach "nächster Nachbarschaft"

Bei nochmaliger Digitalisierung bleibt die Form des Signals erhalten, die Signallage ist jedoch von der Digitalisierungsstelle abhängig. Im Extremfall kann diese Lageverschiebung eine halbe Digitalisierungsbreite betragen, wenn die neue Digitalisierung an der Grenze zwischen zwei alten Digitalisierungsstellen durchgeführt wird. Diese Grenze bildet eine Unstetigkeitsstelle. Bei geringfügiger Verschiebung der Digitalisierungsstelle kann eine merkliche Signalverschiebung stattfinden (Abb. 4-18).

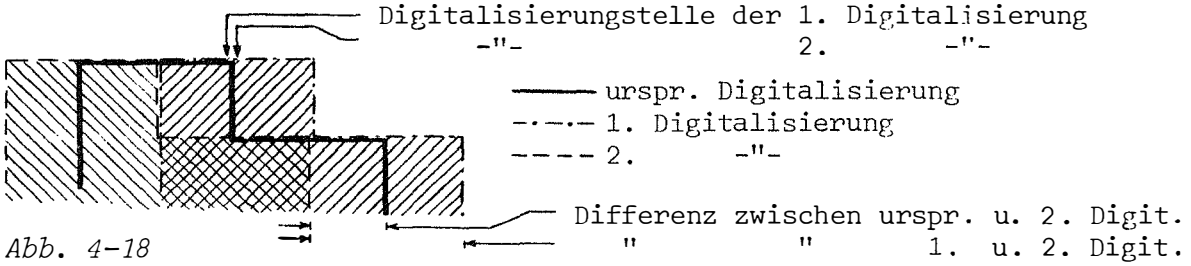


Abb. 4-18

5. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG EINER MSS-REKTIFIZIERUNG

5.1. Forderungen an das Rektifizierungsverfahren

Es wurden folgende Forderungen gestellt:

- Durchführung der Umbildung digital und
  optisch mit Hilfe des AVIOPLAN OR1
- Unparametrischer Lösungsansatz
- Zusammensetzen mehrerer nebeneinanderliegender MSS-Streifen zu einem Mosaik unter Einbeziehung von Verknüpfungspunkten zwischen den MSS-Streifen
- Praxisnähe und Übertragbarkeit des EDV-Programmes auch auf kleinere Rechenanlagen.

Alle diese Forderungen wurden in dem im folgenden beschriebenen EDV-Programm verwirklicht. Gerade die Forderung nach Praxisgerechtheit und damit nach Wirtschaftlichkeit hat bedingt, daß manche theoretisch elegantere und richtigere Lösung ersetzt werden mußte durch einen Näherungsansatz, der sehr günstige Rechenzeiten ermöglichte, der aber dennoch in der Genauigkeit der exakten Lösung kaum nachstand.

5.2. Unparametrischer Ansatz mit Hilfe der Interpolation nach kleinsten Quadraten

5.2.1. Vorbemerkung

Die Interpolation nach kleinsten Quadraten war bereits früher für Verzerrungen von MSS-Bildern mit Hilfe des AVIOPLAN OR1 eingesetzt worden /Kraus, 1975b /. In praktischen Beispielen konnte gezeigt werden, daß dieser Lösungsansatz sehr gute Ergebnisse liefert/Otepka, 1976 /. Da in diesen Beispielen nur relativ kleine MSS-Bilder entzerrt werden konnten und auch keine Berücksichtigung einer Mosaikbildung gegeben war, sollte mit der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ob es möglich wäre, diese Methode für beliebig große Bilder und zur Mosaikbildung heranzuziehen. Wie erwähnt (Kap.4.1.), eignet sich die unparametrische Lösung nur für ebenes oder leicht hügeliges Gelände. Betrachtet man die aus der

Praxis herangetragenen Fälle, so ist zu erkennen, daß ein überwiegender Teil die Voraussetzungen für ein unparametrisches Verfahren erfüllen und daß ein digitales Geländemodell ohnehin nicht vorhanden ist. Die Entwicklung für ein unparametrisches Verfahren für die praktische Anwendung ist daher gerechtfertigt.

5.2.2. Interpolation nach kleinsten Quadraten

Für die Anwendung dieses statistischen Prädiktionsverfahrens ist Voraussetzung, daß die Verzerrungswerte des MSS-Bildes (= in ausgewählten Paßpunkten gemessene Bildverzerrungen) über das gesamte Bild betrachtet Zufallsgrößen und bereichsweise betrachtet aber untereinander korreliert sind. Die gemessenen Verzerrungswerte sind auch im kleinen Bereich noch von zufälligen, mit diesen nicht korrelierten Größen überlagert, sodaß sie aus zwei Teilen bestehen, einem korrelierten (= MSS-Bildverzerrung) und einem unkorrelierten (= z.B. Meßungenauigkeit) Teil.

$l = s + r$

l ... gemessener Verzerrungswert
s ... korrelierter Anteil
r ... unkorrelierter Anteil

Nur die Größe s repräsentiert die Verzerrungsverhältnisse des MSS-Bildes und soll daher für die Interpolation einer Bildverzerrung zwischen den Paßpunkten herangezogen werden. Für das Aufstellen der Interpolationsfunktion werden die aus den Verzerrungswerten an den Paßpunkten abgeleiteten Korrelationen verwendet.

Betrachtet man die Varianz-Kovarianzmatrix der korrelierten Anteile s, so ergibt sich eine symmetrische Matrix mit der Varianz v der s-Werte auf der Diagonale und den Kovarianzen c_{ij} der s-Werte zwischen den einzelnen Paßpunkten außerhalb der Diagonale.

$$\mathbf{C}_{ss} = \begin{pmatrix} v & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ & & \cdots\cdots & \\ \% & & & c_{n-1,n} \\ & & & v \end{pmatrix} \qquad (c_{ij}=c_{ji}) \qquad (5\text{-}1)$$

Betrachtet man die Varianz-Kovarianz-Matrix der unkorrelierten Anteile r, so ergibt sich eine Diagonalmatrix mit den Varianzen v_{ri} der r-Werte. Alle übrigen Elemente sind Ø, da keine Korrelationen zwischen den r-Werten an den Paßpunkten bestehen.

$$\mathbf{C}_{rr} = \begin{pmatrix} v_{r1} & & \emptyset \\ & \ddots & \\ \emptyset & & v_{rn} \end{pmatrix} \qquad (c_{rij}=c_{rji}=\emptyset) \qquad (5\text{-}2)$$

Die Varianz-Kovarianzmatrix der Verzerrungswerte l ist demnach

$$\mathbf{C}_{ll} = \mathbf{C}_{ss} + \mathbf{C}_{rr} \qquad (5\text{-}3)$$

Schließlich sind für die Interpolation noch die Kovarianzverhältnisse eines beliebigen Neupunktes P zu den gegebenen Paßpunkten von Interesse, die allgemein in Form des Vektors

$$\mathbf{c}_p^T = (c_{1p}, c_{2p}, \ldots c_{np})$$

geschrieben werden kann.

Aus der Forderung, daß das Quadrat des mittleren Interpolationsfehlers ein Minimum werden soll, erhält man die Grundgleichung der Interpolation nach kleinsten Quadraten zur Bestimmung des interpolierten Wertes l_p:

$$l_p = \mathbf{c}_p^T \cdot \mathbf{C}_{ll}^{-1} \cdot \mathbf{l} \qquad (5\text{-}4)$$

Zur Ermittlung von $\mathbf{C}_{ll}$ und $\mathbf{c}_p$ ist es notwendig, allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten für die Kovarianzen abzuleiten.

Aus der zu Beginn gemachten Forderung, daß die Verzerrungswerte zwar in Teilbereichen korreliert, über das gesamte Interpolationsgebiet jedoch zufälligen Charakter zeigen, kann eine Abnahme der Kovarianzen mit der Entfernung unterstellt werden. Es wird weiters als Vereinfachung vorausgesetzt, daß die Kovarianzverhältnisse über das gesamte Interpolationsgebiet gleichbleiben und auch unabhängig von der Richtung der Verbindungsgeraden sind.

Geeignete Funktionen sind

$$f(d) = e^{-d^2c^2}$$

$$f(d) = \frac{1}{d^2c^2+1}$$

d ... Entfernung
c ... Konstante, durch die die Steilheit des Verlaufes beschrieben wird.

Beide Funktionen haben an der Stelle d = Ø (Kovarianz eines Punktes wird Varianz) den Wert 1.

Durch Normieren der Matrix $\mathbf{C}_{ll}$ und des Vektors $\mathbf{c}_p$ auf die Varianz V_{ll} erfolgt numerisch keine Änderung der Gleichung (5-4)

$$l_p = \frac{1}{V_{ll}} \mathbf{c}_p^T \left(\frac{1}{V_{ll}} \mathbf{C}_{ll}^{-1}\right) \mathbf{l} = \mathbf{c}_p^T \mathbf{C}_{ll}^{-1} \mathbf{l}, \qquad (5\text{-}5)$$

sodaß die oben erwähnten Funktionen allgemeingültig als Kovarianzfunktionen verwendet werden können.

Die reine Interpolation:

Die gemessenen Verzerrungen $\mathbf{l}$ sind die echten Verzerrungswerte s; es gilt

$$\mathbf{C}_{ll} = \mathbf{C}_{ss}.$$

Wird die $\mathbf{C}_{ll}$-Matrix in ihrer Diagonale (= Varianz) auf 1 normiert, so wird damit auch die $\mathbf{C}_{ss}$-Matrix in ihrer Diagonale 1. Die Kovarianzfunktion hat an ihrer Ø-Stelle den Funktionswert 1.

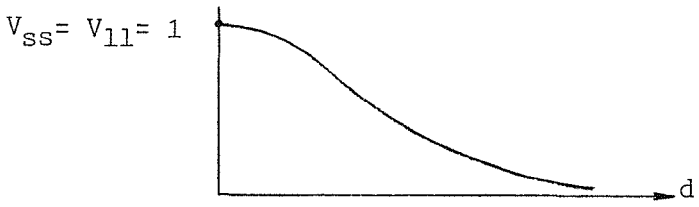


Abb. 5-1: Kovarianzfunktion

Die Interpolation eines Verzerrungswertes an einem Paßpunkt ergibt wieder exakt den gemessenen Verzerrungswert.

Die Interpolation mit Filterung:

Die gemessenen Verzerrungswerte sind von unregelmäßigen Meßfehlern überlagert; es gilt

$$\mathbf{C}_{ll} = \mathbf{C}_{ss} + \mathbf{C}_{rr}.$$

Für die Interpolation von Verzerrungen ist nur die $\mathbf{C}_{ss}$-Matrix von Interesse. Wird die $\mathbf{C}_{ll}$-Matrix in ihrer Diagonale auf 1 normiert, so ist die $\mathbf{C}_{ss}$-Matrix in ihrer Diagonale 1. Die Kovarianzfunktion hat daher an ihrer Ø-Stelle den Funktionswert 1.

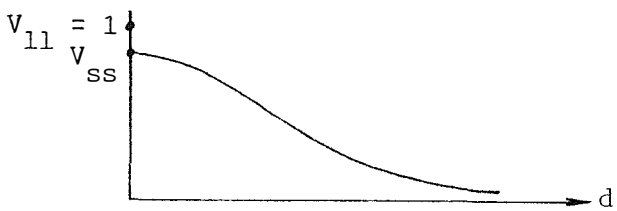


Abb. 5-2: Kovarianzfunktion für Filterung

Die Interpolation eines Verzerrungswertes an einem Paßpunkt ergibt einen vom gemessenen Verzerrungswert unterschiedlichen Wert. Die Differenz symbolisiert den unregelmäßigen Meßfehler.

Herstellen der Voraussetzungen für die Interpolation nach kleinsten Quadraten:

Bei der praktischen Anwendung ist vorerst sicherlich nicht die Voraussetzung erfüllt, daß die Verzerrungen über das gesamte Interpolationsgebiet zufälligen Charakter haben. Erst durch das "Zentrieren", das ist das Abspalten eines gemeinsamen deterministischen Anteils, kann diese Voraussetzung erfüllt werden. Im allgemeinen ist es ausreichend, durch eine ausgleichende Affintransformation die Paßpunktfelder der verzerrten und geometrisch richtigen Lage aufeinander einzupassen und die Transformationsrestfehler als Verzerrungswerte mit der Interpolation nach kleinsten Quadraten zu behandeln. An den interpolierten Wert muß anschließend der deterministische Anteil hinzugefügt werden, um den gewünschten Interpolationswert zu erhalten.

Vereinfachung durch getrennte Behandlung der Koordinaten:

Eine wesentliche Vereinfachung des Interpolationsverfahrens wird durch getrenntes Interpolieren in beiden Koordinatenrichtungen erreicht. Der Verzerrungsvektor wird in seine beiden Komponenten aufgespalten. Für jede Koordinatenrichtung wird eine unabhängige Inerpolation durchgeführt. Diese Vereinfachung hat auch praktisch erkennbare Auswirkungen. Das Interpolationsergebnis ist nicht mehr unabhängig von der Lage des Koordinatensystems, doch sind die Unterschiede im allgemeinen sehr klein und können daher in der praktischen Durchführung vernachlässigt werden.

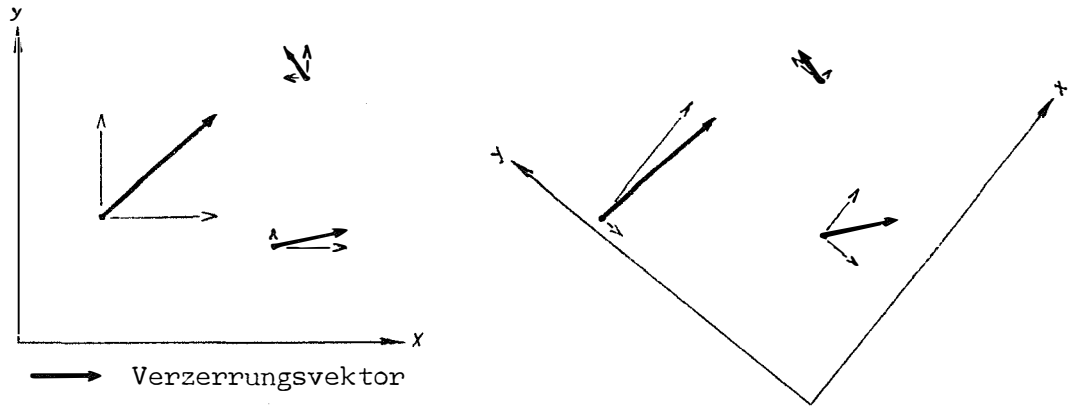


Abb. 5-3: Verzerrungskomponenten bei zwei verschiedenen Koordinatensystemen

5.3. Optisches und digitales Entzerrungsverfahren

Die bereits mit dem AVIOPLAN OR1/Kraus, 1975; Otepka, 1976/ durchgeführten Arbeiten zeigten die Brauchbarkeit der so gewonnenen Produkte. Daher sollte auch bei Aufbau dieses neuen Entzerrungssystems diese Methode weiterhin berücksichtigt werden. Andererseits liegen sehr oft digitale Bilddaten vor, die nach einer geometrischen Korrektur einem weiteren digitalen Bildverarbeitungsverfahren zugeführt werden sollen. In diesem Falle ist nur die digitale Umbildung durchführbar. Angesichts dieser Bedeutung sollte das Entzerrungssystem auch diese Methode beherrschen.

Bei genauerer Betrachtung sind die Unterschiede zwischen diesen beiden Verfahren sehr gering und liegen hauptsächlich im Bereich der eigentlichen Umbildung, sodaß in vielen Abschnitten des Rektifizierungsprogramms nicht darauf geachtet werden muß.

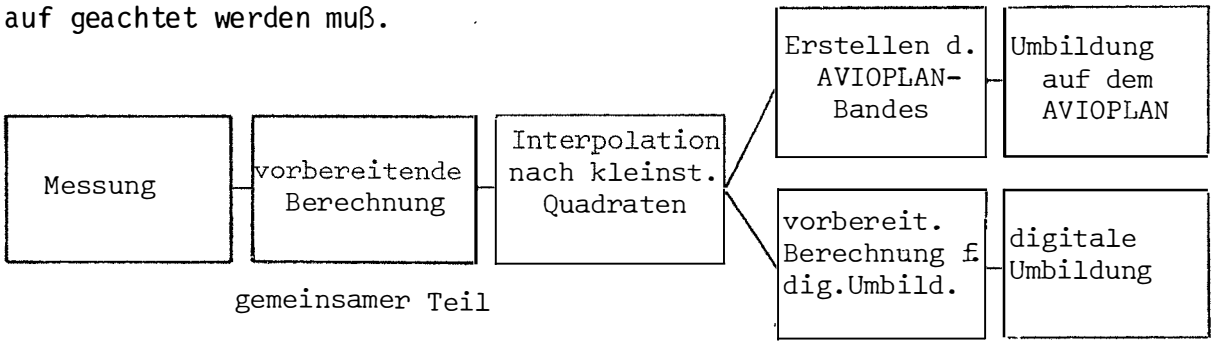


Abb. 5-4: Ablauf einer Rektifizierung

Aus Gründen der einfacheren und schnelleren Durchführbarkeit und aus Analogie zum optischen Verfahren wurde die indirekte Umbildemethode gewählt. Die Grauwertzuordnung erfolgt nach der Methode der nächsten Nachbarschaft.

5.4. Auswahl der Punkte für die Verzerrungsbestimmung

Man unterscheidet prinzipiell zwei Punktarten:

Paßpunkte und Verknüpfungspunkte.

Da unparametrische Lösungen auf der Basis des Vergleiches des verzerrten MSS-Bildes mit einer geometrisch richtigen Vorlage arbeiten, werden Paßpunkte dazu verwendet, die Verzerrungen des MSS-Bildes möglichst gut zu erfassen. Paßpunkte sind also Punkte, die im MSS-Bild eindeutig identifizierbar sind und von denen die geometrisch richtige Lage bekannt ist. Sie sollen über das gesamte MSS-Bild gleichmäßig verteilt und so dicht angeordnet sein, daß die Verzerrungen ausreichend erfaßt werden, d.h., daß die Verzerrung des MSS-Bildes über Interpolationsmethoden bestimmbar wird.

Die Paßpunkte beschreiben die Verzerrung des MSS-Bildes.

Wird ein Bildmosaik erstellt, an dem mehrere nebeneinander liegende, sich überlappende MSS-Streifen beteiligt sind, so müssen die Überlappungsbereiche der beteiligten Streifen nach der Entzerrung die selben geometrischen Verhältnisse zeigen. Durch eine ideale Paßpunktverteilung wird dieser Zustand im allgemeinen auch mit zufriedenstellender Genauigkeit erreicht werden können. Verknüpfungspunkte werden herangezogen, um diese geometrische Übereinstimmung auch in Bereichen mit schlechter Paßpunktverteilung zu sichern. Verknüpfungspunkte sind Details, die in den Überlappungsbereichen zweier MSS-Bilder identifiziert werden können. Ihre geometrisch richtige Lage muß nicht bekannt sein.

Verknüpfungspunkte dienen der geometrischen Anpassung des Überlappungsbereiches zweier benachbarter Streifen.

5.4.1 Ausgangsmaterial

Um eine Rektifizierung beginnen zu können, benötigt man
- Bildwiedergaben (auf Film) der zu entzerrenden MSS-Bilder und
- eine Rektifizierungsvorlage (i. a. eine Strichkarte, ein Orthophoto, Luftbild, MSS-Bild).

5.4.1.1. Bildwiedergabe des verzerrten MSS-Bildes

Soll die Entzerrung für mehrere Spektralbereiche desselben MSS-Bildes erfolgen, so genügt es, die Paß- und Verknüpfungspunktauswahl in der Bildwiedergabe eines Spektralbereiches durchzuführen.

Im Falle der digitalen Umbildung ist eine exakte Bildwiedergabe gefordert, sodaß anhand der koordinatenmäßigen Paßpunktlagen innerhalb des Bildes auf die Zuordnung zu den Bildelementen (= Reihen und Spalten der Bildmatrix) geschlossen werden kann.

Im Falle der optischen Umbildung ist darauf zu achten, daß die Bilder verschiedener Spektralbereiche deckungsgleich sind (Gefahr bei unterschiedlichen Filmverzug!). Sollte dies nicht zutreffen, dann ist die Paßpunktbestimmung für die Spektralbereiche getrennt durchzuführen. Auch Bilder, die mit Hilfe unexakt arbeitender Bildausgabegeräte erzeugt worden waren, können mit der optischen, nicht aber mit der digitalen Umbildung entzerrt werden.

Die Wahl des Spektralbereiches für die Paßpunktbestimmung ist entscheidend für die Qualität der Paßpunktgenauigkeit und für die Erleichterung der Paß-

punktsuche. Thermische Bereiche sind infolge ihrer schlechten Auflösung nicht gut geeignet, während sich die Spektralbereiche im Grün-Orange und auch im nahen Infrarot in der Praxis sehr gut bewährt haben. Die endgültige Entscheidung muß aber im Vergleich der Bildwiedergaben mit der Rektifizierungsvorlage getroffen werden.

Für die Ausgabe eines Bildes vom digitalen Speichermedium weg, ist zu beachten, daß mindestens 32 (5 bits), besser 64 (6 bits) Graustufen wiedergegeben werden. Um einen guten optischen Eindruck zu erhalten, sind etwa 4o Graustufen notwendig. Werden weniger Graustufen wiedergegeben, so entstehen im Bild Flächenbildungen, die die Erkennbarkeit kleiner Strukturen herabsetzen und damit die Paßpunktauswahl wesentlich erschweren. In kontrastschwachen Bildern wird es notwendig sein, zusätzlich den Kontrast zu erhöhen. Als nicht sehr gut geeignet haben sich Bildausgaben in farbcodierter Form erwiesen, da erstens die willkürliche Farbzuordnung die optischen Kontinuitäten innerhalb eines Bildes stört und so die Identifikation von Paßpunkten erschwert und zweitens der Farbkeil nur relativ wenige Farben umfaßt, sodaß Flächenbildungen begünstigt werden.

5.4.1.2. Rektifizierungsvorlage

Es ist zu bedenken, daß die MSS-Bilder auf die Rektifizierungsvorlage entzerrt werden, also anschließend mit ihr deckungsgleich werden. Daher sollte auf geometrische Güte und die Maßhaltigkeit der Rektifizierungsvorlage geachtet werden.

Topographische Strichkarten als Rektifizierungsvorlagen können, da sie selbst keine Bildinformation enthalten, mit der MSS-Information zur Deckung gebracht werden. Damit ist eine wesentliche Orientierungshilfe vor allem für thematische Interpretation gegeben.
Als Nachteil ist jedoch zu werten, daß durch die Strichauswertung und Generalisierung das Auffinden und das exakte Positionieren von Paßpunkten sehr erschwert wird. Besonders in land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebieten gehen bei der Kartenherstellung wesentliche Details verloren, die als Paßpunkte gut geeignet wären.

Das Orthophoto als geometrisch korrigiertes Luftbild hat einen Detailreichtum, der dem einer Scanneraufnahme sehr ähnlich ist. Es ist daher als Rektifizierungsvorlage bestens geeignet. Man hat lediglich darauf zu achten, daß nicht Veränderungen aufgrund des Aufnahmezeitunterschiedes (Scannerbild-

Luftbild) oder aufgrund des spektralen Informationsunterschiedes Paßpunktfehlzuordnungen getroffen werden (z.B. unterschiedliche Hell-dunkel-Sequenzen der Felder im landwirtschaftlich genutzem Gebiet). Die besten Ergebnisse werden erreicht, wenn gleichzeitig mit dem Scannerflug auch Luftaufnahmen hergestellt werden, aus denen man dann die Orthophotos für die Rektifizierung erzeugt. Nachteilig wirken sich die zusätzlichen Kosten aus, die für die Orthophotoherstellung aufgewendet werden müssen. Diese sind aber dann gerechtfertigt, wenn die Orthophotos ohnehin für andere Zwecke (z.B. als Planungsunterlagen, als Orthophotokartenwerk) verwendet werden können.

Luftbilder sind, nach ihrem Bildinhalt bewertet, dem Orthophoto gleichzusetzen. Man muß sich jedoch bewußt sein, daß das Luftbild eine perspektive Abbildung des Geländes ist und damit geometrische Unzulänglichkeiten enthält. Eine Rektifizierung auf ein Luftbild kann immer nur in Verbindung mit genau diesem Luftbild verwendet werden.

MSS-Bilder als Rektifizierungsvorlage zu verwenden, sind nur dann zu empfehlen, wenn ein Vergleich zweier verschiedener Scannerflüge durchgeführt werden sollen, die absolute geometrische Lage der Bilddetails aber nicht interessiert. Ist die Flugbahn der beiden Aufnahmen etwa gleich, so sind auch die Verzerrungen die von der Geländeform herrühren, etwa gleich. Auch vom Bildinhalt her wird es nicht schwierig sein, Paßpunkte zu finden. Man kann sich damit bei multitemporaler Interpretation einen Rektifizierungsvorgang ersparen. Trotzdem ist eine Entzerrung aller MSS-Bilder auf eine gemeinsame absolut richtige Rektifizierungsvorlage vorzuziehen.

Eine wesentliche Erleichterung erreicht man, wenn die Rektifizierungsvorlage und MSS-Bild etwa den gleichen Maßstab haben. Bei der Bildausgabe kann man durch geeignete Wahl der Bildelementgröße eine Maßstabsanpassung erreichen. Auch die Rektifizierungsvorlage kann durch Vergrößern oder Verkleinern an die MSS-Bilder angeglichen werden, nur müssen dann auch im Falle der digitalen Umbildung die Bildelemente des Ergebnisbildes ebenfalls entsprechend vergrößert oder verkleinert gewählt werden.

5.4.2. Auswahl der Paßpunkte und Verknüpfungspunkte

Nachdem in der Rektifizierungsvorlage das Interessensgebiet bestimmt worden ist, die dafür benötigten MSS-Bilder zur Verfügung stehen und anhand dieser die Schnittlinien für die Mosaikbildung festgelegt worden sind, kann mit der Auswahl der Paß- und Verknüpfungspunkte begonnen werden (Abb. 5-5).

Die Paßpunkte für einen Mosaikteil müssen mindestens die Mosaikteilfläche erfassen. Sie sollten jedoch über die Mosaikteilgrenzen hinaus gewählt werden, um Extrapolationen für die Entzerrung zu vermeiden. (Abb.5-6)

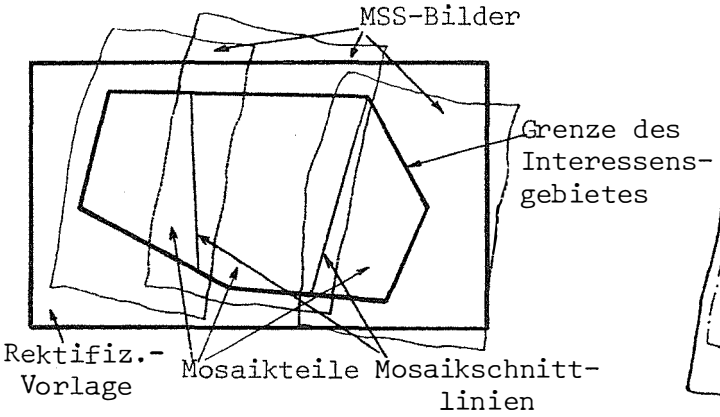


Abb. 5-5

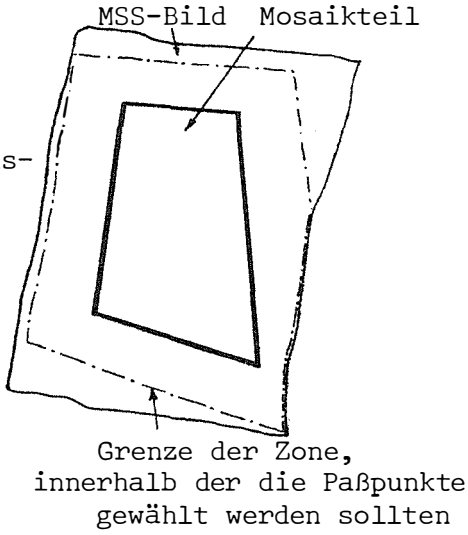


Abb. 5-6

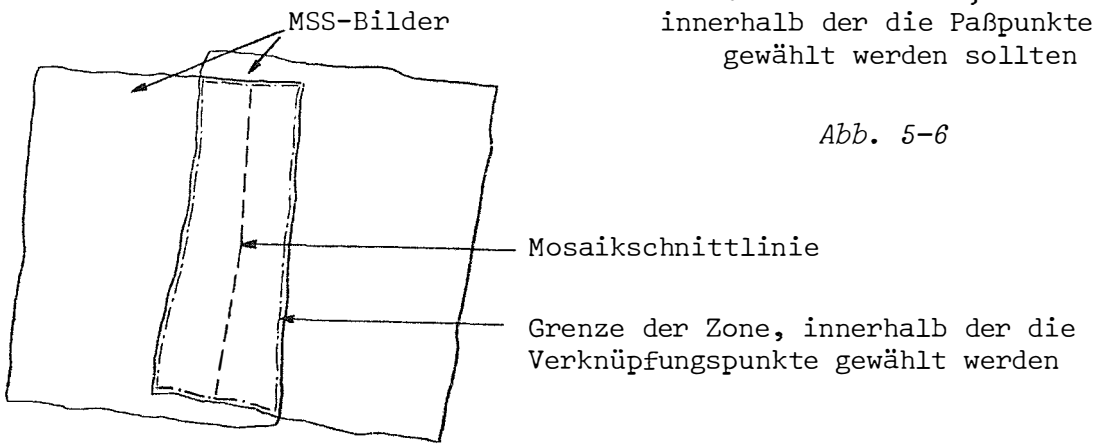


Abb. 5-7

Die Verknüpfungspunkte werden im Überlappungsbereich der MSS-Bilder ausgewählt, vor allem in der Umgebung der Mosaikschnittlinien, damit dort im fertigen Mosaik Bilddetailversetzungen vermieden werden.(Abb.5-7)

5.4.2.1. Für Paßpunkte geeignete Bilddetails

Bei der Auswahl der Bilddetails ist besonders bei Verwendung von kleinmaßstäblichen Strichkarten wegen der dort durchgeführten Generalisierung Vorsicht geboten. Man hat sich in die Arbeit des Kartographen einzufühlen, um zu erkennen, wo Lageversetzungen in der Karte zu erwarten sind. Da die Größen der darzustellenden Signaturen fest vorgeschrieben sind, müssen diese auch dann eingehalten werden, wenn dies vom Kartenmaßstab her gesehen nicht mehr möglich wäre.

In Tälern mit Fluß, Straße und Eisenbahn etwa ist damit zu rechnen, daß der Fluß in seiner Achse zwar lagerichtig dargestellt wird, die Straße und Eisenbahn aber entsprechend ihrer Signaturbreite verschoben werden. Ähnliches gilt auch für Häuser entlang von Straßen. Die Straßenachse ist richtig, das Haus entsprechend der Signaturbreite der Straße verschoben. Gut geeignet sind Flußmündungen, Straßenkreuzungen und Punkte in der Straßenmitte, alleinstehende Häuser und markante Formen der Seeufer.

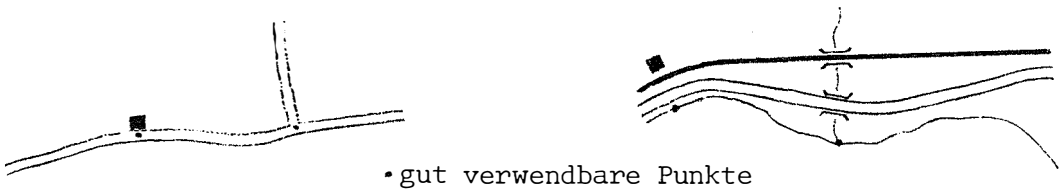


Abb. 5-8: Beispiel geeigneter Paßpunkte in einer topogr. Karte

Je großmaßstäbiger die verwendeten Karten sind, desto weniger spielen derartige Effekte eine Rolle. Allerdings wächst dann die Gefahr, daß über große Bereiche gar keine Details für Paßpunkte gefunden werden. Je großmaßstäbiger (d.h. je niedriger die Flughöhe) die MSS-Bilder werden, desto mehr müssen Bildsturzfehler im MSS-Bild beachtet werden. Diese Fehler treten bei einzelnen sich über die Geländeoberfläche erhebenden Objekte auf. Der Bildsturz nimmt von der Streifenmitte zum Streifenrand hin zu und ist abhängig von der Höhe des Objektes (Abb.5-9)

Gegenstand der Entzerrung ist die Geländeoberfläche. Die Paßpunkte müssen auf der Geländeoberfläche liegen. Daher dürfen nur Gebäudegrundrißpunkte als Paßpunkte verwendet werden. (Abb. 5-10).

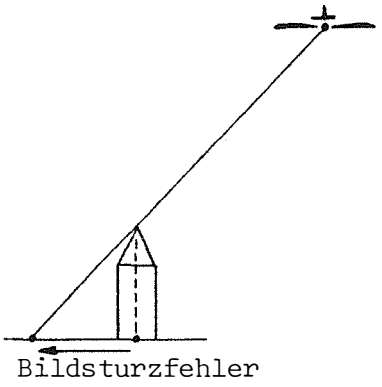


Abb. 5-9: Bildsturzfehler bei Paßpunkten

× falsche Paßpunktwahl
• richtige Paßpunktwahl (=Grundrißpunkt)

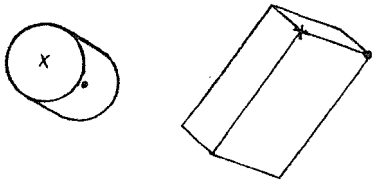


Abb. 5-10: Berücksichtigung des Bildsturzes

Vorsicht ist geboten bei der Auswahl von Straßen- oder Kreuzungsmittelpunkten. Infolge des Bildsturzes der angrenzenden Häuser ist es oft nur sehr schwer möglich, den echten Mittelpunkt zu erfassen. In solchen Fällen ist es wesentlich sicherer, sich für einen Punkt an einem Gebäudegrundriß zu entscheiden (Abb. 5-11). Auch Schlagschatten erschweren oft die Wahl des richtigen Punktes. Die Straßen erscheinen schmäler.

Ähnliche Probleme treten auch bei der Auswahl von Verknüpfungspunkten auf. Da sich Verknüpfungspunkte immer am Streifenrand befinden, liegen sie somit in Bereichen des maximalen Bildsturzes, der sich in den benachbarten Bildern noch in entgegengesetzter Richtung auswirkt. Der Fehler in den Verknüpfungspunkten zueinander ist damit die Summe der einzelnen Bildsturzfehler (Abb. 5-12).

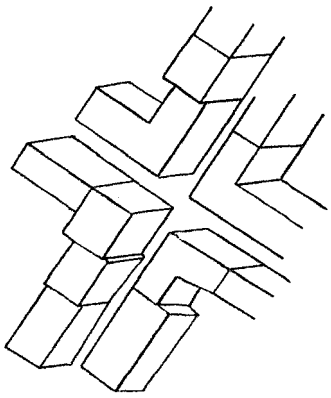


Abb. 5-11

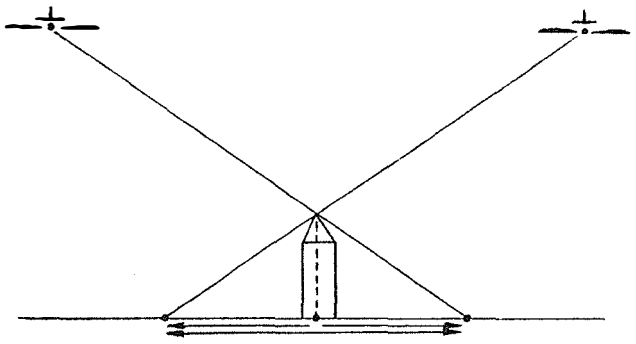


Abb. 5-12: Bildsturzfehler bei Verknüpfungspunkten

Auch in der Rektifizierungsvorlage sind Bildstürze zu beachten, wenn Orthophotos oder Luftbilder dazu herangezogen werden.

Sehr häufig treten in der Praxis Identifizierungsfehler bei Paßpunkten an zeitlich veränderten Objekten auf. Dazu gehören Waldgrenzen, Feldgrenzen, einzelstehende Bäume, Sandbänke und Inseln in Flüssen (deren Größe auch vom jeweiligen Wasserstand abhängt), Flachuferlinien, aber auch im Zuge von Straßenneubauten, Ortsumfahrungen und Grundstückszusammenlegungen geringfügig verlegte oder neu angelegte Wege und Kreuzungen. Auch Flußregulierungen und Kraftwerksbauten führen zu teilweise schwer erkennbaren Lageveränderungen. Die Rektifizierungsvorlage sollte daher zeitlich mit dem MSS-Flug möglichst übereinstimmen.

Künstliche Paßpunkte:
Um die Entzerrung ordentlich durchführen zu können, ist eine über den gesamten Interpolationsbereich gleichmäßige Paßpunktverteilung notwendig. Sind in großen Bereichen keine geeigneten Paßpunkte auffindbar, jedoch flächenhafte Strukturen erkennbar, so kann oft durch partielles Einpassen des MSS-Bildes auf die Rektifizierungsvorlage ein auf dem Bild beliebig angenommener Punkt in die Vorlage übertragen und als Paßpunkt festgelegt werden. Für einen solchen Arbeitsvorgang sollte das MSS-Bild etwa den Maßstab der Rektifizierungsvorlage haben. Dieses Verfahren ist nur in Notfällen anzuwenden. Ein nicht exakt definierter künstlicher Paßpunkt kann in einem paßpunktleeren Raum die Güte der Entzerrung erheblich verbessern.

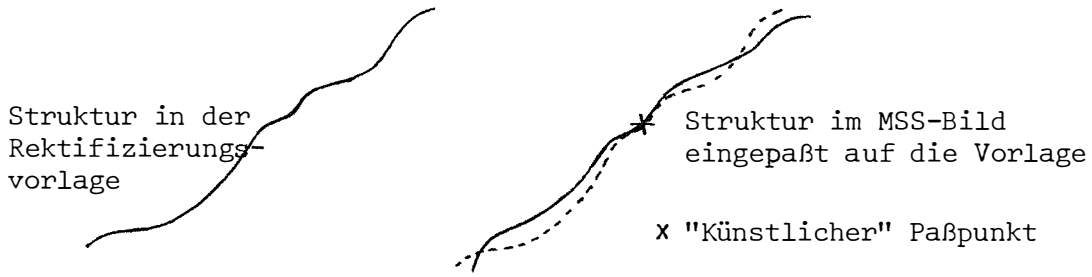


Abb. 5-13: "Künstliche" Paßpunkte

5.4.2.2. Die Messung der Paß- und Verknüpfungspunkte

Die Punktmessungen sind in einer für die Rektifizierungsvorlage einheitlichen Koordinatensystem und in das für das jeweils betroffene MSS-Bild einheitlichem Koordinatensystem durchzuführen. (Abb.5-14)

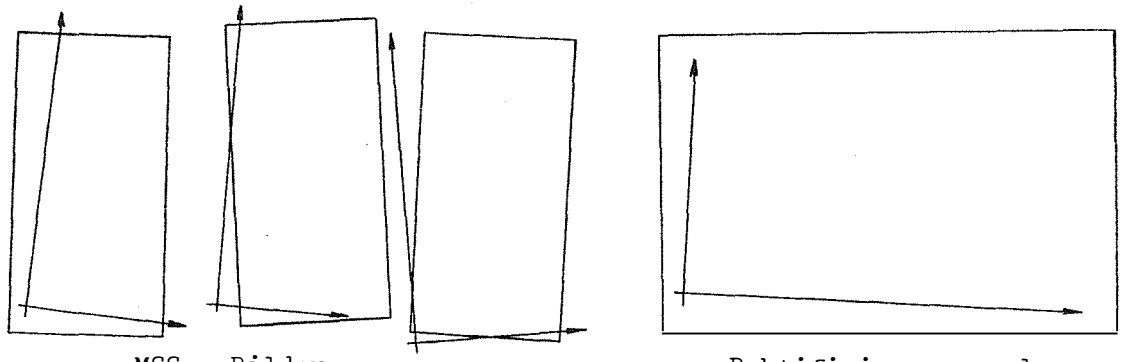


Abb. 5-14: Koordinatensysteme in MSS-Bilder u. Rektifizierungsvorlage

Gemessen werden die Koordinaten der Paßpunkte in der Rektifizierungsvorlage und im betroffenen MSS-Bild und die Koordinaten der Verknüpfungspunkte im jeweiligen MSS-Bild. Eine Punktnummernzuordnung ist für Paßpunkte bei gleichzeitiger Messung von Vorlage und MSS-Bild nicht unbedingt notwendig, erleichtert jedoch eine spätere Fehlersuche. Für Verknüpfungspunkte ist eine eindeutige Punktnummernvergabe unbedingt erforderlich, da über die Nummer die Zusammengehörigkeit von Messungen erkannt wird. Die für die Paßpunktmessung verwendeten Meßmittel müssen daher eine Punktnummernvergabe ermöglichen.

Als Meßmethoden eignen sich:
- Messung mit einem Digitizer
- Messung mit einem Stereo- bzw. Monokomparator
- automatische Bildkorrelation.

5.4.2.2.1. Messung mit dem Digitizer

Digitizer sind in großformatigen Ausführungen erhältlich und damit sehr gut geeignet für die Punktmessung großer Rektifizierungsvorlagen und langer MSS-Bilder. Durch einen Freihandcursor ist ein rascher Meßablauf gewährleistet. Man hat während der Messung den Überblick über das gesamte Interessensgebiet. Es ist daher auch möglich, die Paßpunktauswahl gleichzeitig mit der Messung vorzunehmen. Trotzdem ist es vorteilhaft, die Auswahl unabhängig davon vorher durchzuführen und die Punkte eventuell auf Deckfolien zu markieren (Kap. 5.4.2.3.). Eine gleichzeitige Ausmessung von Vorlage und MSS-Bild ist im Digitizer nicht immer möglich.

5.4.2.2.2. Messung mit einem Stereokomparator

Die in der Photogrammetrie verwendeten Stereokomparatoren haben eine Meßfläche von 23 x 23 cm. Dies ist im allgemeinen nur ein Bruchteil der Rektifizierungsvorlagenfläche bzw. der MSS-Bildfläche. Die Messung muß daher in Teilbereichen (= Meßeinheiten) erfolgen, die über Meßeinheitenverknüpfungspunkte später rechnerisch wieder zu einem einheitlichen Ganzen zusammengefügt werden können.

Ein Vorteil des Stereokomparators liegt in der Möglichkeit, Rektifizierungsvorlage und MSS-Bild gleichzeitig zu messen. Da das Gesichtsfeld der Komparatoroptik sehr klein ist, geht der Überblick über das zu entzerrende Bild verloren. Die Paßpunktauswahl während der Messung wird langsam und unsicher. Ein praxisgerechtes Arbeiten ist daher nur bei vorangegangener Punktauswahl und -kennzeichnung möglich. Steht nur ein Monokomparator zur Verfügung, so ist die Messung auch nur in Meßeinheiten durchführbar. Sie muß für Rektifizierungsvorlage und MSS-Bild getrennt erfolgen. Grundsätzlich gilt, daß die Meßgenauigkeit der Komparatoren für die MSS-Entzerrungsmessung weitaus höher als erforderlich ist.

5.4.2.2.3. Automatische Korrelation

Die Auswahl und Messung der Paß- und Verknüpfungspunkte erfordert vom Bearbeiter hohe Konzentration auf lange Zeit. Die meisten Identifikationsfehler geschehen mit nachlassender Konzentration. Es ist daher zu überlegen, ob es nicht möglich wäre, ein automatisch arbeitendes Verfahren der Bildkorrelation für diese Zwecke einzusetzen.

Dazu müssen nicht nur die MSS-Bilder, sondern auch die Rektifizierungsvorlage in digitaler Form vorliegen. Die beiden Bildmatrizen werden stückweise miteinander verglichen bis über die Grauwertkorrelation ein übereinstimmender Bildbereich gefunden ist. Über die Bildzeilen- und -spaltenposition des Korrelationsmaximums ist ein Paßpunkt lagemäßig festgelegt.

Abgesehen vom für solche Prozesse großen Rechenaufwand liegen die größten Schwierigkeiten in der Unsicherheit der gefundenen Paßpunkte. Ist bei grauwertmäßig dem MSS-Bild ähnlichen Rektifizierungsvorlagen (z.B. Orthophoto, Luftbild, MSS-Bild) noch mit brauchbaren Resultaten zu rechnen, so sind die Erfolgschancen einer richtigen Korrelation zwischen MSS-Bild und Strichkarte sehr gering. Große Probleme macht auch der Bildsturz und die weiteren im Abschnitt 5.4.2.1. angesprochenen Besonderheiten.

Erfahrungsgemäß benötigt das Korrigieren von Paßpunktfehlern einen nicht zu vernachlässigenden Zeitaufwand. Außerdem können kleinere Fehler erst durch einen unmittelbaren Vergleich des Rektifizierungsergebnisses mit der Vorlage erkannt werden, zu einem Zeitpunkt also, wenn bereits ein vollständiger Rektifizierungslauf durchgeführt worden war. Um diesen zusätzlichen Zeit- und Rechenaufwand in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten, ist bei der Paßpunktauswahl größte Sorgfalt anzuwenden. Wie die Praxis zeigt, sind die heutigen Möglichkeiten der digitalen automatischen Bildkorrelation noch nicht in der Lage, gegenüber der herkömmlichen visuellen Methode einen wirtschaftlichen Vorteil zu bringen /Göpfert, 1977/.

5.4.2.3. Genauigkeit der Punktmessung

Die Einstellgenauigkeit setzt sich zusammen aus der Definitionsgenauigkeit des Punktes und aus der Genauigkeit der Messung.

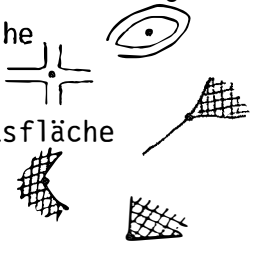
Für die Definitionsgenauigkeit können keine verbindlichen Angaben gemacht werden, da sie erstens sehr von der Qualität der Vorlagen und zweitens vom jeweils gewählten Bilddetail abhängt. Auf jeden Fall besteht für die Definitionsgenauigkeit ein Zusammenhang mit der Bodenauflösung des Scanners und mit der Bildelementgröße /Hofmann, 1975/.

Die Definitionsgenauigkeit eines Paßpunktes ist in einer Strichkarte etwa mit der Zeichengenauigkeit von 0,1 bis 0,2 mm gleichzusetzen. Im MSS-Bild soll die erreichbare Genauigkeit anhand eines praktischen Beispieles angegeben werden. Es wurde die Einstellgenauigkeit einiger typischer Paßpunkte im Stereokomparator STK1 und im Stereoorthophotoauswertegerät Stereograph /Kraus, 1981/ überprüft.

Die Bildelementgröße des gemessenen MSS-Bildes betrug 200 µm, die Bodenauflösung etwa 3 m.

Als Paßpunkte wurden folgende 5 Bilddetails ausgewählt:

1. Mitte einer symmetrischen Grasfläche
2. Straßenkreuzung Mitte
3. spitz in einen Weg auslaufende Grasfläche
4. bogenförmiger Grasflächenrand
5. Hausecke.



Die im Stereokomparator (Ablesegenauigkeit = 0,001 mm) erreichbaren mittleren Einstellfehler waren für:

1. (6-fache Vergrößerung der Betrachtungsoptik)	0,04 mm
1. (20-fache Vergrößerung der Betrachtungsoptik)	0,06 mm
2. (6-fache Vergrößerung der Betrachtunsoptik)	0,01 mm
3. - " -	0,09 mm
4. - " -	0,07 mm
5. - " -	0,04 mm

Im Stereograph (Ablesegenauigkeit = 0,04 mm) wurden folgende mittlere Einstellfehler erreicht:

1. (direkte Betrachtung ohne Vergrößerung)	0,05 mm
2. - " -	0,04 mm
3. - " -	0,04 mm
4. - " -	0,07 mm
5. - " -	0,10 mm

Die schlechteren Ergebnisse bei 20-facher Vergrößerung gegenüber 6-facher sind einerseits darauf zurückzuführen, daß der angemessene Punkt nur durch symmetrisches Einstellen definierbar war und dieses bei großer Vergrößerung nicht mehr so einfach durchzuführen ist, andererseits aber auch durch die starke Verminderung des Bildkontrastes bei zunehmender Vergrößerung.

Man sieht auch, daß die Genauigkeit des Komparators bei weitem nicht ausgenützt wird und die des Stereographen ausreichend ist. Erstaunlich sind die geringen Einstellfehler im bezug auf die Bildelementgröße von 200 µm, obwohl die Bildelemente im Bild (außer bei 20-facher Vergrößerung) nicht einzeln unterscheidbar waren und die Einstellung nach dem Bildinhalt erfolgte.

In der Praxis hat sich die direkte Messung der MSS-Bilder als ungünstig erwiesen (Kontrastminderung, kleiner Bildausschnitt, lange Belegungszeiten des Meßmittels). Es wurde daher darauf übergegangen, die Punkte auf über MSS-Bilder und Rektifizierungsvorlage gelegte maßhältige Filmfolien mit Pikiernadel zu markieren. Diese gestochenen Punkte können mit einer Punktnummer versehen und eventuell auch der Meßweg eingezeichnet werden. Nachdem alle Punkte auf diese Weise ausgesucht worden sind, wird nur mehr die Folie ausgemessen. Der angegebene Meßweg beschleunigt den Meßvorgang und

verhindert das Übersehen eines Punktes; die markierten Punkte sind rasch und sehr gut einstellbar (mittlerer Einstellfehler ± 0,01 mm). Es bleibt nur zu untersuchen, wie genau die Punktdefinitionsgenauigkeit nach diesem Verfahren ist.

Als Ausgangsmaterial zu diesem Test diente eine Gittergravur, die auf dem Zeichenautomaten Contraves CORAGRAPH DC1 ausgeführt wurde. Der Gitterabstand betrug in beiden Ausbreitungsrichtungen 2 cm. Auf dem Stereokomparator STK1 wurden 6 x 6 Gitterschnittpunkte koordinatenmäßig registriert. Anschließend wurde über dem Raster eine Folie fixiert und dieselben Rasterpunkte auf ihr pikiert. Auch die Ausmessung der Folie mit den pikierten Punkten erfolgte auf dem STK1.

Damit standen folgende 3 Datensätze zur Verfügung:

1. Idealkoordinaten des Rasters, berechnet aus dem bekannten Rasterintervall von 2 cm
2. gemessene Rasterpunkte in der Gravurfolie
3. gemessene Rasterpunkte auf der Pikierfolie

Die Genauigkeitsprüfung selbst erfolgte durch Transformieren der verschiedenen Datensätze aufeinander. Als Transformation standen zur Verfügung:
3-Parameter-Transformation (nur Drehung und Verschiebung, aber keine Maßstabsanpassung)
4-Parameter-Transformation (auch Maßstabsanpassung).

Nach einer 3-Parameter-Transformation ergab sich der mittlere Fehler eines Punktes mit 0,015 mm. Dieser Wert scheint im Vergleich zur Komparatormeßgenauigkeit und zu der guten Einstellgenauigkeit sehr schlecht zu sein. Es liegt daher der Schluß nahe, daß die Gitterfolie eine maßstäbliche Veränderung erfahren hatte. Der Maßstabsfaktor wurde mit einer 4-Parameter-Transformation festgestellt. Das Ergebnis war ein Maßstab von 1,000256 und ein mittlerer Fehler eines Punktes von 0,008 mm.

Der nächste Schritt soll die Genauigkeit der Pikierfolie durch Aufeinandertransformieren des Datensatzes 3) auf den Datensatz 1) liefern. Da bereits ein Maßstab von 1,000256, der für den Rasterfolieneingang charakteristisch ist, gefunden wurde, erfolgte diese Berechnung mit einer 3-Parameter-Transformation mit vorgegebenem Maßstab. Der mittlere Punktfehler ergab 0,058 mm.

Der Unterschied zu den eigentlichen Gittermessungen ist deutlich zu sehen. Vergleicht man diese Größe mit der Einstellgenauigkeit der Punkte im MSS-Bild, so fällt auf, daß die Pikiermethode im allgemeinen für die Zwecke der MSS-Bildentzerrung ausreichend ist. Nur bei Bildern, die mit sehr kleinen Bildelementen hergestellt wurden (< 100 µm) wird man mit Genauigkeitsverlusten zu rechnen haben. Um trotzdem in den Genuß der bequemeren Paßpunktidentifizierung und Messung zu gelangen, ist die Ausgabe der digitalen Bilder mit größeren Bildelementen zu empfehlen. Da auch die Genauigkeiten der gewöhnlich verwendeten Rektifizierungsvorlagen (Strichkarte und Orthophoto) etwa bei 0,1 bis 0,2 mm liegen, heißt dies, daß hier die Pikiermethode mit ausreichender Genauigkeit angewandt werden kann.

5.4.2.4. Meßeinheiten

Sowohl MSS-Bild als auch Rektifizierungsvorlage haben im Vergleich zu den gewöhnlich in der Photogrammetrie verwendeten Bildmaterialien oft wesentlich größere Ausdehnung. Durch den kontinuierlichen Abtastvorgang bei der MSS-Aufnahme entstehen Bildstreifen, deren Länge im allgemeinen nur durch die Ausdehnung des Interessensgebietes beschränkt ist. Auch die Größe der Rektifizierungsvorlage ist von der Größe des Interessensgebietes abhängig. Es tritt daher nicht selten der Fall auf, daß die Fläche des für die Punktmessung zur Verfügung stehenden Gerätes nicht ausreicht, um MSS-Bild bzw. Rektifizierungsvorlage in einem zu messen. Dieses Problem ist besonders groß, wenn nur ein konventioneller Komparator mit einer Bildfläche von 23 x 23 cm zur Verfügung steht.

Die Messung der Paßpunkte und Verknüpfungspunkte darf daher auch in kleineren Teilbereichen (= Meßeinheiten) erfolgen, die später durch geeignete zusätzlich gemessene Punkte (= Meßeinheitenverknüpfungspunkte) wieder zu einer Einheit rechnerisch zusammengesetzt werden können.

5.5. Der erste Programmteil

Dieser Teil dient der Vorverarbeitung der Messungen. Es erfolgt das Zusammenfügen der Meßeinheiten zu einheitlichen MSS-Streifen und einer einheitlichen Rektifizierungsvorlage. Sämtliche Punkte werden außerdem in ein Koordinatensystem transformiert, welches eine einfache Beziehung zwischen den Koordinatenwerten und der Bildelementmatrix ermöglicht. Falls notwendig, können auch in den Koordinaten vorhandene systematische Anteile, die von einer Panoramaverzerrung herrühren, beseitigt werden.

5.5.1. Aneinandertransformieren der Meßeinheiten

Das Aneinanderfügen der Meßeinheiten erfolgt mit Hilfe von 3-Parameter-Transformationen anhand der Meßeinheitenverknüpfungspunkte. Die Abfolge der Transformationen ist sequentiell Meßeinheit für Meßeinheit. Eine Transformation in einem Guß (= verkettete ebene Ähnlichkeitstransformation) wäre die theoretisch bessere Lösung. Da jedoch Meßeinheitenverknüpfungspunkte immer in ausreichendem Maße vorhanden sind und eine sehr geringe Definitionsungenauigkeit haben, bringt die Verkettung keinen nennenswerten Gewinn. Sie wurde aus Gründen der einfacheren praktischen Berechnung nicht angewandt. Die 3-Parameter-Transformation, die keine Maßstabsanpassung zuläßt, soll sicherstellen, daß bei den hintereinander abfolgenden Transformationen kein Maßstabsfortpflanzungsfehler entsteht.

Als Ergebnis dieser Berechnungen erhält man die Koordinaten der Paß- und Verknüpfungspunkte in auf die einzelnen MSS-Streifen bezogenen Koordinatensystemen und die Koordinaten der Paßpunkte in einem auf die Rektifizierungsvorlage bezogenen System. Für die digitale Rektifizierung ist noch ein Bezug der geometrischen Angaben zu der digitalen Bilddatenmatrix der MSS-Streifen und des Ergebnisbildes notwendig. Es ist daher sinnvoll, die Koordinatensysteme so zu legen, daß ihre Achsen mit der Scan- bzw. der Streifenrichtung zusammenfallen. Da die Größe der Bildelemente bekannt ist, kann später auf einfache Weise jedem Koordinatenwert ein entsprechendes Bildelement zugeordnet werden. (Abb.5-15)

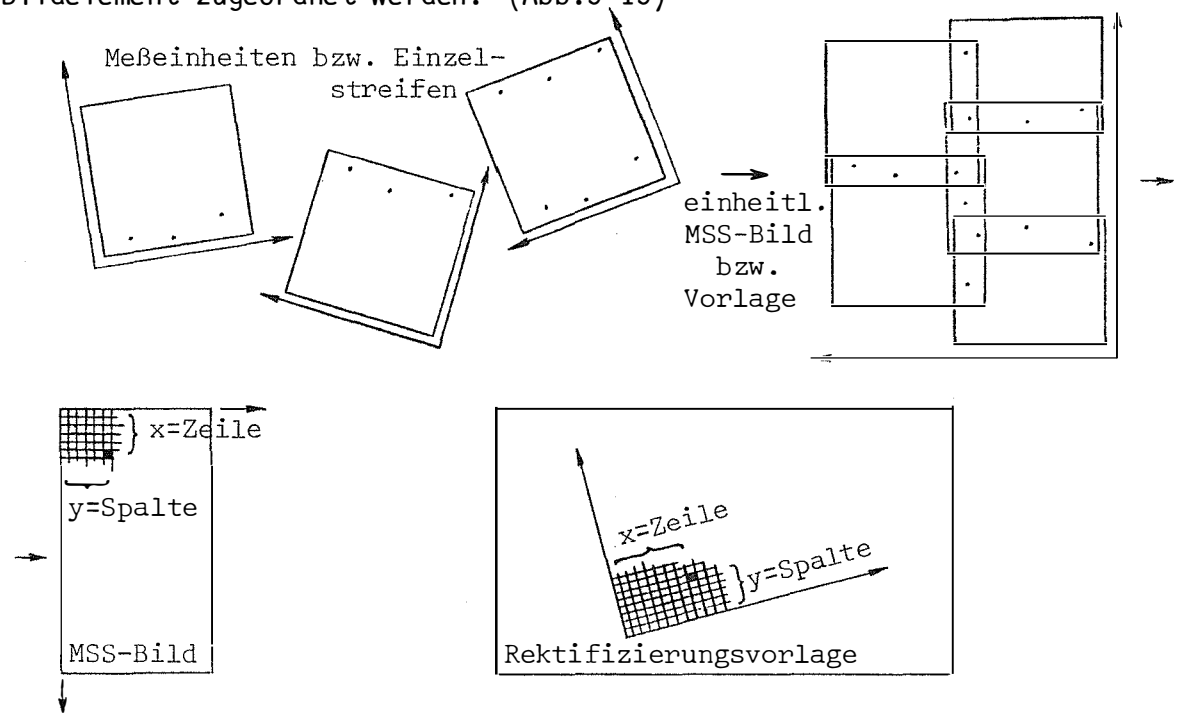


Abb. 5-15: Transformation der Koordinatensysteme der Messung in die Koordinatensysteme der digitalen Umbildung

5.5.2. Anpassen an eine Rektifizierungsvorlage

Die als Rektifizierungsvorlage verwendeten Landkarten oder Orthophotos weisen oft geometrische Veränderungen auf, die auf Papiereingang zurückzuführen sind. Das rektifizierte Ergebnis hätte dann die gleichen Fehler aufzuweisen.

Um dies auszuschließen, besteht die Möglichkeit, die gemessenen Koordinaten in Bezug mit idealen Kartenprojektionskoordinaten zu bringen. Dafür stehen die 3-, die 4-Parameter- und die Affintransformation zur Verfügung.

5.5.3. Beseitigen der Systematik der Panoramaverzerrung

Es ist sinnvoll, die Paß- und Streifenverknüpfungspunkte in bereits panoramakorrigierten MSS-Bildern zu suchen, da die Identifizierbarkeit der Details am Streifenrand stark verbessert wird. Ist es nicht möglich, panoramaentzerrte Bilder zu erhalten, so muß die Punktsuche in den verzerrten Bildern durchgeführt werden. Die gemessenen MSS-Verzerrungen enthalten daher systematische Fehleranteile.

Ist der maximale Abtastwinkel des Scanners bekannt, so können diese Verzerrungsanteile beseitigt werden, also die gemessenen Koordinaten so korrigiert werden, als wäre die Punktmessung in panoramaentzerrten Bildern erfolgt. Da die MSS-Bildkoordinaten durch vorangegangene Transformation auf ein Koordinatensystem, dessen eine Achse in Flugrichtung und dessen andere Achse in Scanrichtung verläuft, umgerechnet worden waren, ergibt sich die Panoramaentzerrung lediglich als Verbesserung der Scanrichtungskoordinate.

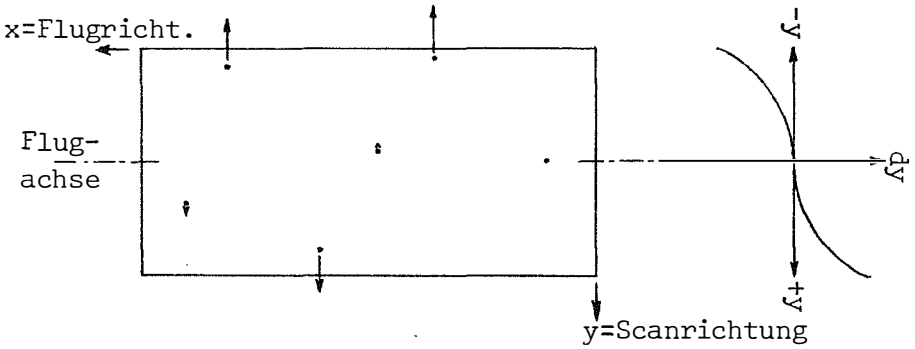


Abb. 5-16: Panoramakorrektur der Koordinaten

Die Beseitigung dieser Panoramasystematik bewirkt eine höher Entzerrungsgenauigkeit, da dieser Effekt nicht mehr durch den Interpolationsansatz korrigiert werden muß.

5.6. Der zweite Programmteil

Die Aufgabe dieses Programmteiles besteht darin, die Verzerrungen durch eine Funktion zu erfassen, mit welcher letztlich die Entzerrung durchgeführt werden wird. Konkret geht es in diesem Programmteil um die Aufstellung der Kovarianzfunktion und um die Berechnung des Produktes $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$ der Gleichung (5-4).

Der Bestimmungsprozeß läuft in zwei Schritten ab:

(1) Für jeden Streifen getrennt nur anhand der Paßpunkte in jedem Streifen (Kapitel 5.6.1)

(2) Verbesserung anhand der Verknüpfungspunkte (Kapitel 5.6.2)

5.6.1. Berücksichtigung der Paßpunkte in einem Streifen

Da die Interpolation nach kleinsten Quadraten nur dann berechtigt ist, wenn die Verzerrungswerte über das gesamte Interpolationsgebiet als Zufallsgrößen betrachtet werden können, muß vorher der deterministische Anteil abgespalten werden. Um dafür geeignete Methoden zu finden, soll überlegt werden, mit welchen systematischen Fehlern ein MSS-Bild behaftet ist.

Ein typischer systematischer Effekt ist die Panoramaverzerrung, die jedoch bereits bei der Herstellung der MSS-Bildfilme bzw. rechnerisch im ersten Programmteil berücksichtigt werden kann. Für die Abspaltung des übrigen deterministischen Anteils ist eine Affintransformation günstig, da in den Scanneraufnahmen ein deutlicher Unterschied des Bildmaßstabes zwischen Scan- und Flugrichtung auftreten kann (Overscan, Kapitel 3.1.1.).

5.6.1.1. Recheneinheiten

Die Interpolation nach kleinsten Quadraten benötigt die Varianz-Kovarianz-Matrix der Paßpunkte. Die Anzahl der Matrixelemente nimmt mit steigender Paßpunktanzahl rasch zu, obwohl die Matrix symmetrisch ist (Abb. 5-17).

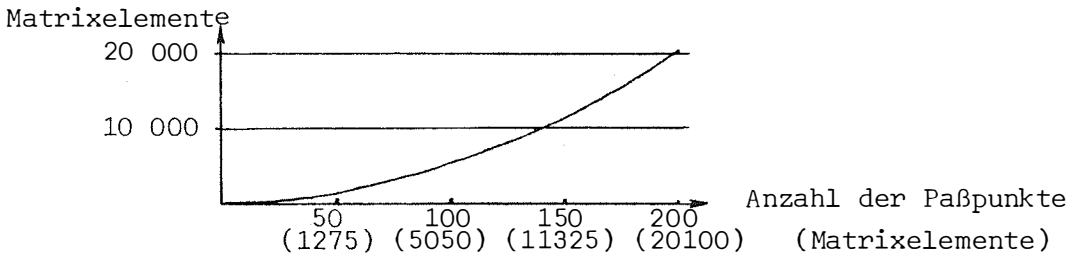


Abb. 5-17: Größe der Kovarianzmatrix

Es wird daher notwendig, ein Interpolationsgebiet in mehrere kleine Teilinterpolationsgebiete (= Recheneinheiten) zu zerlegen. Auch theoretischen Überlegungen kommt diese Maßnahme entgegen. Der hier verwendete Ansatz für die Interpolation nach kleinsten Quadraten setzt voraus, daß die Kovarianzverhältnisse über das gesamte Interpolationsgebiet gleich sind und daß der deterministische Anteil durch eine Affintransformation genau genug erfaßt werden kann. Je größer das Interpolationsgebiet wird, desto weniger sind diese Voraussetzungen im allgemeinen gegeben. Durch die Einteilung in Recheneinheiten kann eine Anpassung an geänderte Kovarianzverhältnisse und Systematik erfolgen.

Die "Kovarianzfunktion" für einen MSS-Streifen besteht also aus mehreren Kovarianzfunktionen, die für die einzelnen Recheneinheiten eines Streifens repräsentativ sind.

Der Übergang von einer Recheneinheit zur nächsten muß stetig sein. Um dies zu gewährleisten, wird eine Recheneinheitenüberlappung angenommen. Die Größe einer Recheneinheit inkl. Überlappungsbereich ist die Bruttogröße. Die Nettorecheneinheit ist jener Bereich, innerhalb dessen eine Kovarianzfunktion angewandt wird. Nettorecheneinheiten haben keine gegenseitige Überlappung.

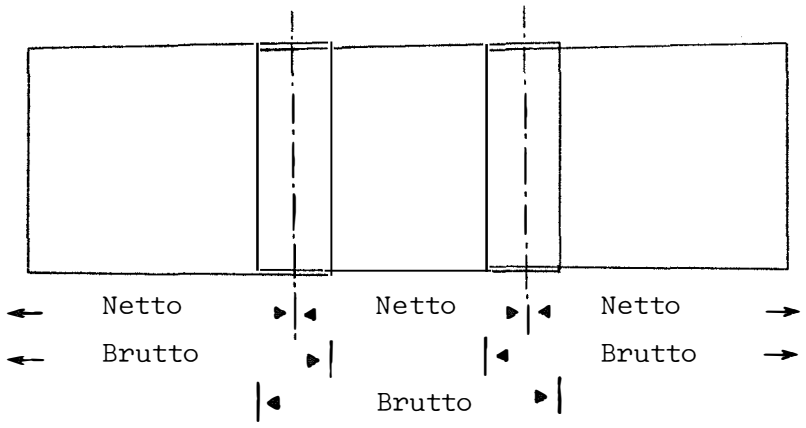


Abb. 5-18: Recheneinheiten

Die Recheneinheiteneinteilung besorgt das Programm selbständig und kann vom Anwender nur beschränkt beeinflußt werden. Vorgegeben werden kann die maximal zulässige Größe einer Bruttorecheneinheit (= Anzahl der Paßpunkte pro Recheneinheit) und die minimale Recheneinheitenüberlappung (= Anzahl

der Paßpunkte im Überlappungsbereich und prozentuelle Flächenüberdeckung). Auch die Nettogrenze wird selbständig bestimmt und etwa in die Mitte des Überlappungsbereiches gelegt.

Der stetige Übergang von einer Recheneinheit zur nächsten kann durch die Interpolation eines Verzerrungswerteprofils entlang der Nettogrenze überprüft werden (Abb. 5-19).

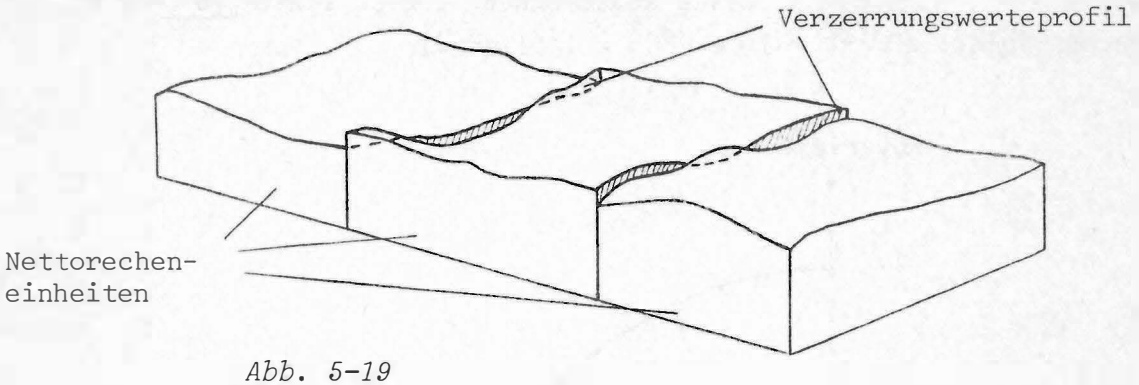


Abb. 5-19

Es sei darauf hingewiesen, daß der Recheneinheitenbereich nicht am Bildrand abschließt sondern ins Unendliche sich fortsetzt. Es ist somit auch eine Interpolation (= Extrapolation) außerhalb des Bildes möglich. Mit zunehmender Entfernung vom Bildrand nähert sich der Interpolationswert dem deterministischen Anteil. Ein unkontrolliertes Ausschwingen, wie dies etwa bei Polynomansätzen vorkommen kann, ist mit dieser Methode nicht zu befürchten.

5.6.1.2. Bestimmung der Kovarianzfunktion

Für die Bestimmung der Koeffizienten der Kovarianzfunktion sind die Kovarianzverhältnisse im Interpolationsgebiet zu untersuchen und eine entsprechende Kovarianzfunktion aufzustellen. Da beide Koordinaten getrennt behandelt werden, müssen für beide Koordinaten auch entsprechende Kovarianzfunktionen bestimmt werden.

Um die Kovarianzen in Abhängigkeit der Entfernung zu beschreiben, stehen zwei Funktionen zur Verfügung:

$$f = e^{-d^2c^2} \qquad (5\text{-}6)$$

$$f = 1/(d^2c^2 + 1) \qquad (5\text{-}7)$$

Beide Funktionen zeigen eine ähnliche Charakteristik. Sie haben einen Scheitelwert an der Stelle d = Ø und haben im negativen Bereich von d einen symmetrischen Verlauf zum positiven Bereich. In den hier behandelten Fällen ist nur der positive Bereich von Interesse, da d als Entfernungen immer größer Ø sind (Abb. 5-20). Die Funktion $1/(d^2c^2 + 1)$ kann aus $e^{-d^2c^2}$ durch Reihenentwicklung abgeleitet werden. Die Taylorreihe von $e^{d^2c^2}$, nach dem 2. Glied abgebrochen, ergibt $1+d^2c^2+d^4c^4/2 + \ldots$ Daraus folgt: $e^{-d^2c^2} = 1 / e^{d^2c^2} \doteq 1/(1+d^2c^2)$.

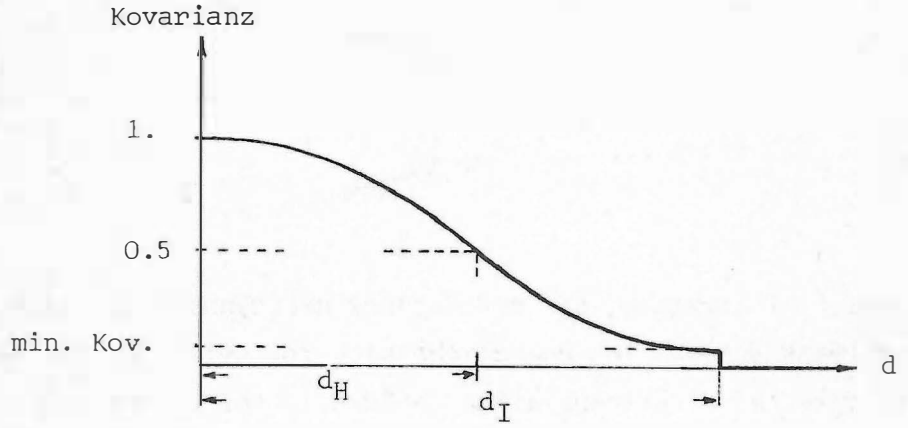


Abb. 5-20: Halbwertsbreite und Interpolationsradius

Die Halbwertsbreite d_H ist jene Entfernung, für welche der Funktionswert den halben Scheitelwert erreicht. Die Halbwertsbreite ist für die Berechnung selbst ohne Bedeutung. Sie dient nur dazu, sich die Vorstellung über die Kovarianzverhältnisse zu erleichtern.

Der Interpolationsradius d_I ist jene Entfernung zwischen zwei Punkten, ab der die Kovarianz Ø wird. Punkte, die weiter als der Interpolationsradius voneinander entfernt sind, beeinflussen einander bei der Interpolation nicht mehr. Da beide erwähnten Funktionen sich mit zunehmenden Entfernungen d assymptotisch dem Funktionswert Ø nähern, wäre der Interpolationsradius immer ∞. Es ist daher üblich, die Kovarianz bis zu einer Minimalkovarianz über die Funktion zu gewinnen und alle darunterliegenden Kovarianzen Ø zu setzen. Die Entfernung, bei welcher der Funktionswert die vorgegebene Minimalkovarianz erreicht, heißt Interpolationsradius.

Diese Unstetigkeitsstelle darf jedoch nicht beliebig gesetzt werden. Für die Festlegung der Mindestkovarianz sind auch noch numerische Überlegungen notwendig. Ein zu großer Wert vermindert die Genauigkeit der Inter-

polation und kann überhaupt zu einer negativ definiten Gleichungsmatrix führen. Zweck der Einführung des Interpolationsradius ist es, die Anzahl der an der Interpolation beteiligten Paßpunkte etwas einzuschränken und damit den numerischen Aufwand zu reduzieren.

Charakteristische Unterschiede zwischen beiden Funktionen:

Die Abbildung der Graphen veranschaulicht deutlich das Verhalten (Abb. 5-21). In diesem Beispiel wurde für beide Funktionen dieselbe Halbwertsbreite angenommen und der c-Wert für $e^{-d^2c^2}$ mit 0,01 vorgegeben.

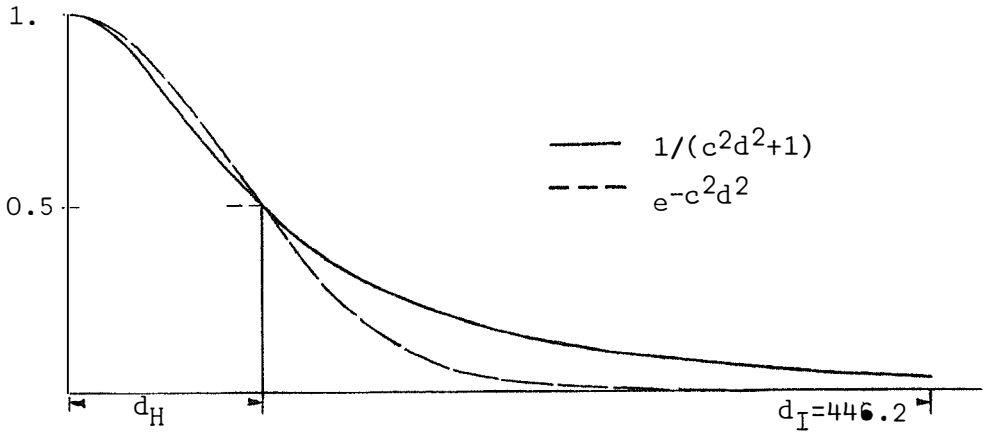


Abb. 5-21: Vergleich der beiden Kovarianzfunktionen

Es zeigt sich, daß bei Interpolation der Einfluß der Punkte, die innerhalb der Halbwertsbreite liegen, bei beiden Funktionen etwa gleich ist. Der Einfluß entfernterer Punkte ist bei $1/(d^2c^2+1)$ wesentlich größer. Wegen des etwas steileren Abfalls der Funktion $1/(d^2c^2+1)$ in der Nähe des Scheitels neigt das Interpolationsergebnis eher dazu, sich in kritischen Bereichen an die Paßpunkte anzupassen. Dies bewirkt unter Umständen, daß fehlerhafte Punkte weniger gut als mit der Funktion $e^{-d^2c^2}$ erkannt werden können. (Kap. 5.9)

Errechnet man den Interpolationsradius (wobei in diesem Beispiel die Minimalkovarianz mit 10^{-6} angenommen wurde), so ergibt sich für die Funktion $e^{-d^2c^2}$ d_I = 446.2, für $1/(d^2c^2+1)$ d_I = 99999.9. Stellt man die Frage nach dem c-Wert der Funktion $1/(d^2c^2+1)$, wenn der Interpolationsradius auch hier 446.2 betragen soll, so ergibt sich c = 2.241. Der Graph dieser Funktion wäre von dem Koordinaten-Achsenkreuz nicht mehr zu unterscheiden. Die Halbwertsbreite läge bei 0.44, für d = 10 wäre der Funktionswert bereits 0.001.

Die Funktion $e^{-d^2c^2}$, die für die Beschreibung einer Normalverteilung verwendet wird, erscheint als Kovarianzfunktion geeigneter. Ihr Nachteil liegt

in der relativ langen Rechenzeit, die eine Rechenanlage für die Bestimmung eines Funktionswertes benötigt. Eine "schnellere" und trotzdem ähnliche Funktion ist $1/(d^2c^2+1)$. Wie jedoch aus obigen Überlegungen zu sehen ist, führt der wesentlich größere Interpolationsradius dazu, daß bei der Interpolation mehr Paßpunkte berücksichtigt werden müssen und damit der Rechenzeitgewinn nicht im gewünschten Maße gegeben ist.

Die empirische Bestimmung der Kovarianzfunktion:

Um den Verlauf der Kovarianzfunktion festlegen zu können, sind zunächst die Kovarianzen der Verzerrungen in Abhängigkeit der Entfernung zu berechnen.

Die Varianz V_{ll} mit $\frac{\Sigma ll}{n}$ ist sofort erhältlich. Da die Varianz V_{rr} (=Meßgenauigkeit) gut geschätzt werden kann, ist auch der Scheitelwert V_{ss} der endgültigen Kovarianzfunktion mit $V_{ss} = V_{ll} - V_{rr}$ bekannt (Abb. 5-2). Komplizierter und auch störanfälliger gestaltet sich die Bestimmung der entfernungsabhängigen Kovarianzen. Man ist gezwungen, Entfernungsintervalle zu definieren und innerhalb dieser die Kovarianzen der betroffenen Verzerrungswerte auszurechnen.

Da $l_i = s_i+r_i$ ist (Verzerrungseigenschaften am Paßpunkt i), ergibt sich als Kovarianz für die n_{ik} Punkte innerhalb eines Entfernungsintervalls

$$\frac{\Sigma\ (s_i+r_i)\ (s_k+r_k)}{n_{ik}} =$$

$$\frac{\Sigma\ (s_i s_k)+(s_i r_k)+(s_k r_i)+(r_i r_k)}{n_{ik}}$$

Wegen des unregelmäßigen Charakters der r_i (d.h. positive und negative Größen auch bei kleinsten Entfernungen zwischen den beiden Punkten) nähert sich die $\Sigma r_i r_k$, $\Sigma s_i r_k$ und $\Sigma r_i s_k$ mit $n_{ik} \to \infty$ dem Werte Ø. Die $\Sigma s_i s_k$ stellt die Kovarianz der Verzerrungen innerhalb eines Entfernungsintervalles dar.

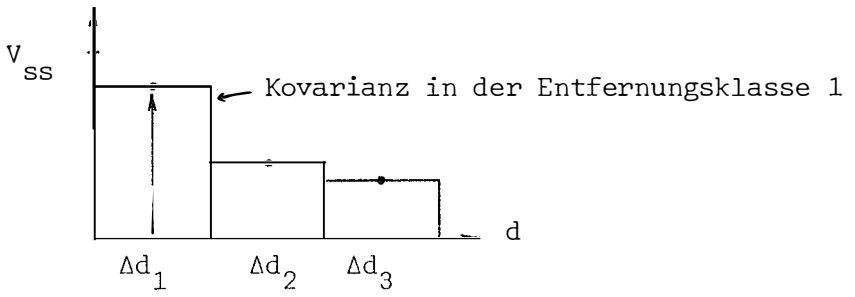


Abb. 5-22: Empirische Kovarianzen

Nimmt man die Mitte eines Entfernungsintervalles als repräsentativ für die dort auftretende Kovarianz, so erhält man punktweise die Kovarianzfunktion, deren Scheitel durch V_{ss} festgelegt worden ist. Es ist nur mehr notwendig, die analytisch geschlossen vorgegebene Funktion ausgleichend durch die so erhaltenen Kovarianzwerte durchzulegen, wobei jedoch der Scheitelwert erhalten bleiben soll.

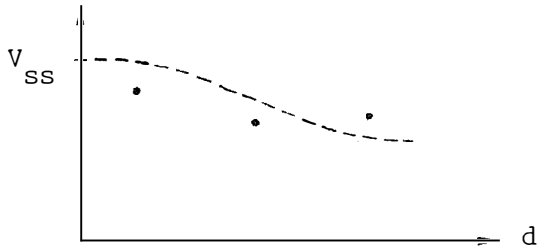


Abb. 5-23: Ausgeglichene Kovarianzfunktion

Aus den vorangegangenen Überlegungen ist auch ersichtlich, daß grundsätzlich der Scheitelwert nicht durch Vorgabe der Varianz V_{rr} der unregelmäßigen Fehleranteile festgelegt werden muß. Die gerechneten Kovarianzen konvergieren mit d gegen Ø zu der Varianz V_{ss} der systematischen Anteile und bestimmen somit den Scheitelwert. Die Praxis jedoch zeigt, daß diese Methode nicht sehr sicher ist. Der Grund dafür liegt in der endlichen Anzahl der Paßpunkte. Die Entfernungsintervalle können nicht beliebig klein gewählt werden. Um gute Kovarianzergebnisse zu erhalten, müssen diese aus ausreichend vielen Paßpunktpaaren errechnet werden. Es ist nicht möglich, die empirische Kovarianz in nächster Nähe des Scheitels mit einer guten Genauigkeit zu bestimmen. Die Möglichkeit der Selbstbestimmung des Scheitels wurde daher nicht verwirklicht.

Eine gute Beschreibung der Kovarianzverhältnisse durch empirische Bestimmung ist von der Wahl einer geeigneten Größe der Entfernungsintervallbreite abhängig. Diese darf nicht zu klein (führt zu zu wenigen Punktepaaren und damit schlechter Kovarianzbestimmung) aber auch nicht zu groß sein (führt zum Verwischen der Kovarianzen und damit schlechte Bestimmung des Kovarianzverlaufes). Zur Überprüfung, ob die gewählte Entfernungsintervallbreite geeignet ist, kann die Anzahl der Punktepaare im ersten Entferungsintervall herangezogen werden.

Die geeignete Intervallbreite soll so gewählt werden, daß im ersten Entfernungsintervall möglichst alle in unmittelbarer Umgebung eines Punktes liegende Nachbarpunkte berücksichtigt werden. Wählt man den mittleren mini-

malen Punktabstand, so liegt etwa die Hälfte der nächsten Punkte innerhalb, die andere Hälfte aber bereits außerhalb des ersten Entfernungsintervalls. Der doppelte mittlere minimale Punktabstand erscheint daher am besten als Intervallbreite geeignet. Er wird bei der programminternen automatischen Intervallbreitenbestimmung errechnet.

Für die Ableitung eines Prüfkriteriums wird eine ideale regelmäßige Punktverteilung angenommen, sodaß die Punkte ein regelmäßiges quadratisches Raster aufbauen (Abb. 5-24).

Der Punktabstand sei s, die Anzahl der Punkte sei n x m. Wird die Intervallbreite mit s angenommen (=mittlerer minimaler Punktabstand), so liegen im ersten Entfernungsintervall

$$2\,(n-1)(m-1) + (n-1)(m-1)$$

Punkte. Für $n \simeq m$ und $n \to \infty$ gilt

$$2n^2 + 2n \simeq 2n^2 \qquad (5\text{-}8)$$

Wird die Intervallbreite mit 2s angenommen (= doppelter mittlerer minimaler Punktabstand), so liegen im ersten Entfernungsintervall

$$\begin{aligned} &2\,(n-1)(m-1) + (n-1) + (m-1) + \\ &+ 2\,(n-2)(m-2) + 2(n-2) + 2(m-2) + \\ &+ 2\,(n-1)(m-1) \end{aligned}$$

Punkte. Für $n \simeq m$ und $n \to \infty$

$$6n^2 + 6n \simeq 6n^2 \qquad (n^2 = \text{Anzahl der Paßpunkte}) \qquad (5\text{-}9)$$

Auf Grund obiger Überlegungen gilt daher, daß die Intervallbreite brauchbar gewählt ist, wenn die Anzahl der Punktepaare im ersten Entfernungsintervall größer als die 2-fache und kleiner als die 6-fache Paßpunktanzahl ist. (Abb. 5-25)

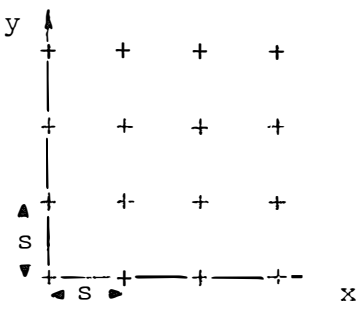
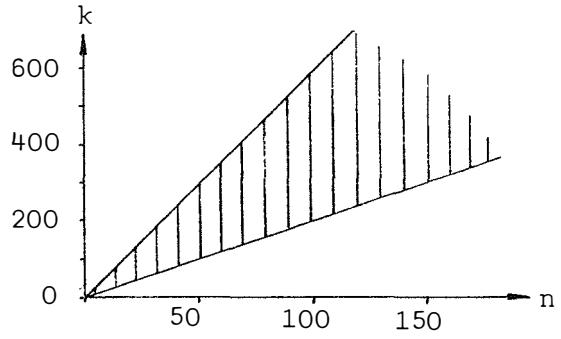


Abb. 5-24



k ... Punktepaare im 1. Entfernungsinterv.
n ... Anzahl der Paßpunkte
IIIII Bereich geeigneter Intervallbreite

Abb. 5-25

Bestimmung der Parameter für die analytisch geschlossene Form der Kovarianzfunktion:

Durch die empirische Bestimmung der Kovarianzen werden für einzelne Entfernungen die Kovarianzwerte erhalten. Es müssen nun die Koeffizienten für die Kovarianzfunktion so gewählt werden, daß sie sich möglichst gut den empirischen Werten anpaßt.

Da der Scheitelwert fest vorgegeben ist (auf Grund der unregelmäßigen Fehleranteile), ist nur mehr der c-Wert zu bestimmen. Der ausgeglichene Wert kann approximativ sehr einfach dadurch bestimmt werden, daß durch jeden empirischen Kovarianzwert die Kovarianzfunktion gelegt wird und somit eine Reihe von c-Werten erhalten wird. Das Mittel aller auf die Art gerechneten c-Werte soll der ausgeglichene c-Wert sein.

für $f = e^{-d^2c^2}$ gilt $c = \frac{\sqrt{-\ln f}}{d}$ ausgeglichen: $c = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\sqrt{-\ln f_i}}{d_i}}{n}$

für $f = \frac{1}{d^2c^2+1}$ gilt $c = \frac{\sqrt{1/f-1}}{d}$ ausgeglichen: $c = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\sqrt{1/f_i-1}}{d_i}}{n}$

Die Ableitung $dc = -\frac{1}{2d} \frac{1}{\sqrt{-\ln f}\, f} df$

bzw. $dc = -\frac{1}{2d} \frac{1}{\sqrt{1/f-1}\, f^2} df$

zeigt deutlich, daß sich eine Ungenauigkeit in f (also in den empirisch bestimmten Kovarianzen) sich umso deutlicher im c-Wert äußert, je kleiner die Entfernung d ist. Das heißt aber, daß bei einem Ausgleich nach oben beschriebener Art, die nahen Kovarianzen gegenüber den entfernteren ein ungerechtfertigt hohes Gewicht haben. Man kann diesen Effekt durch gewichtetes Mitteln der c-Werte entgegenwirken, wobei die Gewichte gleich die Entfernungen sind.

Der ausgeglichene c-Wert = $c = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{-\ln f_i}}{\sum_{i=1}^{n} d_i}$ bzw. $\frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{1/f_i - 1}}{\sum_{i=1}^{n} d_i}$ (5-10)

Auch im folgenden praktischen Beispiel ist das deutlich bessere Ergebnis bei gewichteter Mittelung zu erkennen.

d	emp.best.Kov.
5	0.8
15	0.6
25	0.6
35	0.2
45	0.3

d	$e^{-d^2c^2}$	normal		gewichtet	
	c_i	f	v	f	v
5	0.094476	0.948	0.15	0.971	0.17
15	0.047648	0.618	0.02	0.769	0.17
25	0.028589	0.262	-0.34	0.483	-0.12
35	0.036247	0.073	-0.13	0.240	0.04
45	0.024383	0.013	-0.29	0.094	-0.21
		Σ	-0.59	Σ	0.05

c(normal) 0.046269
c(gew.) 0.034142

d	$1/(d^2c^2+1)$	normal		gewichtet	
	c_i	f	v	f	v
5	0.1	0.928	0.13	0.951	0.15
15	0.054433	0.589	-0.01	0.684	0.08
25	0.032660	0.341	-0.26	0.438	-0.16
35	0.057143	0.209	0.01	0.285	0.09
45	0.033945	0.138	-0.16	0.194	-0.11
		Σ	-0.29	Σ	0.05

c(normal) 0.055636
c(gew.) 0.045284

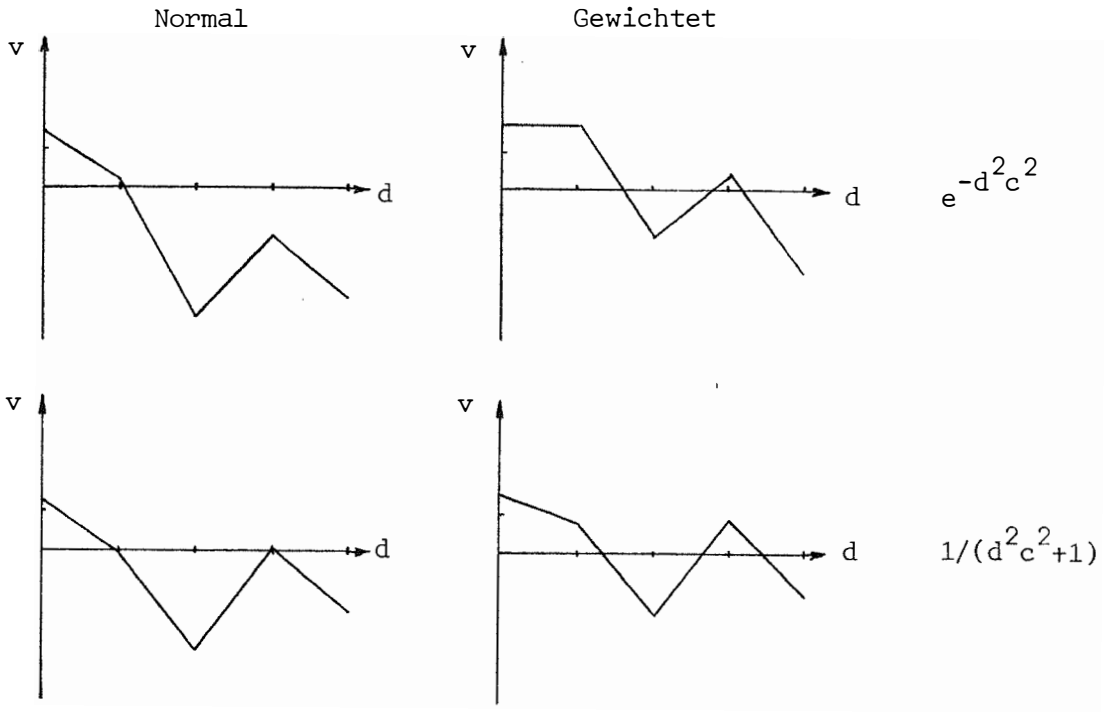


Abb. 5-26: v-Diagramme zu obiger Tabelle

5.6.1.3. Bestimmung des Produktes $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$

Aus der Grundgleichung für die Interpolation nach kleinsten Quadraten (5-4) ist zu ersehen, daß $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$ für das gesamte Interpolationsgebiet konstant ist. Daher kann auch beschrieben werden

$$\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l} = \mathbf{a}, \qquad (5\text{-}11)$$

wobei a der Lösungsvektor des Gleichungssystems $\mathbf{l} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{a}$ ist.

Der Vektor $\mathbf{c}^T$ ist der Kovarianzvektor von einem zu interpolierenden Punkt zu den Paßpunkten. Er ist daher eine Ortsfunktion und ist für jeden Neupunkt getrennt zu berechnen. Die Varianz-Kovarianzmatrix $\mathbf{C}$ kann, nachdem die Kovarianzfunktion bestimmt worden war, anhand der Paßpunktverteilung aufgestellt werden. Sie ist eine symmetrische Matrix mit n · n Spalten und Zeilen (n = Anzahl der Paßpunkte). $\mathbf{l}$ ist der Vektor mit den Verzerrungen in den Paßpunkten, die als Restfehler einer Affintransformation des MSS-Bildes auf die Rektifizierungsvorlage erhalten werden. Diese Affintransformation wurde angewandt, um den deterministischen Anteil der Verzerrungen abzuspalten.

Die eigentliche Interpolation setzt sich daher aus zwei Teilen zusammen

1.) Abspaltung des deterministischen Anteils
2.) Erfassung der restlichen Verzerrungen mittels der Interpolation nach kleinsten Quadraten.

Für die Interpolation eines Neupunktes benötigt man den Vektor $\mathbf{c}^T$, für dessen Bestimmung auch die Paßpunktverteilung bekannt sein muß. Man braucht daher für die Interpolation eines Verzerrungswertes also genau genommen

1.) die Koeffizienten der Affintransformation, welche zur Beseitigung des deterministischen Anteils verwendet worden war (6 Parameter)
2.) die Kovarianzfunktionen für die erste und für die zweite Koordinate (2 c-Werte, 2 Scheitelwerte)
3.) den Interpolationsradius für die erste und zweite Koordinate (2 Werte)
4.) die Paßpunkte mit ihren Koordinaten (n · 2 Werte)
5.) den Lösungsvektor $\mathbf{a}$ (n · 2 Werte).

Zur eindeutigen Festlegung sind daher 6 + 4 + 2 + 2 · 2 · n Koeffizienten notwendig, wobei n die Anzahl der Paßpunkte ist. Für 100 Paßpunkte werden also 412 Werte benötigt.

5.6.2. Berücksichtigung der Verknüpfungspunkte

Bei der Herstellung von Bildmosaiken soll durch die Verknüpfungspunkte erreicht werden, daß die Mosaikteile an den Schnittstellen möglichst gut geometrisch zusammenpassen. Diese Aufgabe besteht darin, zu jedem Verknüpfungspunkt, der nur im MSS-Bild bekannt ist, die wahrscheinlichste Lage in der Rektifizierungsvorlage zu finden. Ist dies geschehen, so kann ein Verknüpfungspunkt wie ein Paßpunkt verwendet werden und dadurch die Interpolation in kritischen Bereichen verbessert werden.

5.6.2.1. Die wahrscheinlichste Lage eines Verknüpfungspunktes in der Vorlage

Nachdem für die Recheneinheiten der einzelnen Streifen die am Schluß des Abschnittes 5.6.1.3. aufgezählten Koeffizienten bestimmt worden sind, kann für jeden beliebigen Punkt im MSS-Bild dessen Lage in der Rektifizierungsvorlage berechnet werden. Somit können auch alle Verknüpfungspunkte in die Rektifizierungsvorlage transformiert werden.

Ein Verknüpfungspunkt kann zweimal unabhängig in die Rektifizierungsvorlage transformiert werden, da er in zwei verschiedenen MSS-Bildern identifiziert worden war. Diese beiden Ergebnisse müßten im Idealfall übereinstimmen, wenn es möglich wäre, die Bildverzerrungen des MSS-Bildes mit der Interpolation exakt zu erfassen. Im allgemeinen werden sich jedoch Differenzen ergeben. Es besteht also die Aufgabe, die wahrscheinlichste richtige Lage des Verknüpfungspunktes in der Rektifizierungsvorlage durch Mittelung der beiden Koordinatenpaare zu finden. Das heißt also, daß der gesuchte Punkt auf der Verbindungsgeraden der beiden Punkte liegen wird.

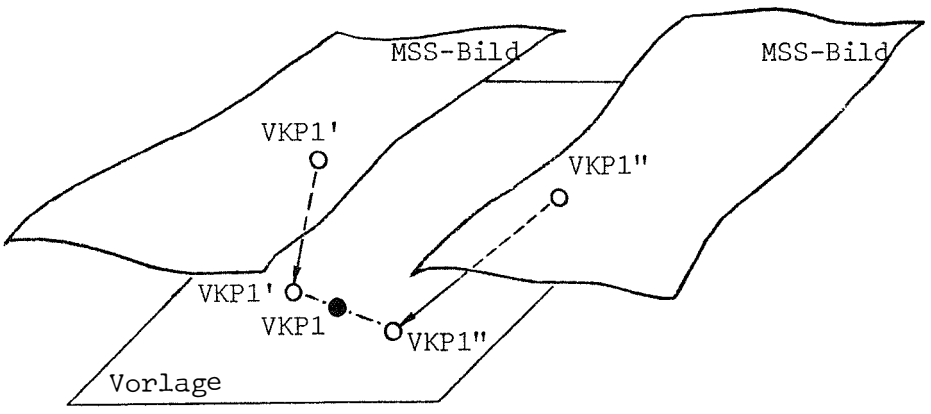


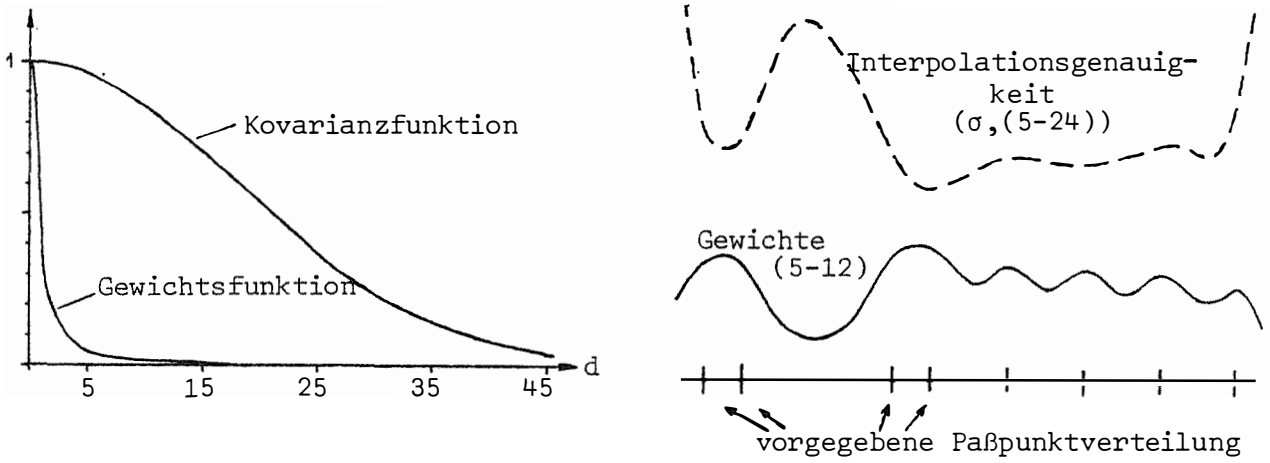
Abb. 5-27: Bestimmung der Lage des Verknüpfungspunktes in der Vorlage

Es erscheint jedoch sinnvoll, diese Mittelung mit Gewichten durchzuführen, in der die Genauigkeit der Punktbestimmung berücksichtigt werden kann. Die Genauigkeit des interpolierten Punktes ist umso größer, je näher er bei den Paßpunkten liegt, sie ist umso schlechter, je weiter entfernt er von den Paßpunkten bzw. je mehr er im Extrapolationsbereich liegt. Man kann diese Interpolationsgenauigkeit formelmäßig ableiten /Kraus, 1975/ und mit dem so erhaltenen mittleren Fehler der Interpolation die Gewichte für die Mittelung festsetzen. Diese Berechnung ist jedoch relativ aufwendig. Es wurde daher zu einer vereinfachten Gewichtsberechnung übergegangen.

$$G = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{g} \qquad (5\text{-}12)$$

$\mathbf{c}$ ist der Kovarianzvektor für den interpolierten Verknüpfungspunkt. Dieser muß für die Interpolation ohnehin gerechnet werden und steht somit ohne Mehraufwand auch für die Gewichtsberechnung zur Verfügung.

$\mathbf{g}$ ist ein Gewichtsvektor, erstellt mit Hilfe der Funktion $1/(1+d^2)$. Die d der einzelnen Vektorkomponenten sind die Entfernungen des Verknüpfungspunktes zu den beteiligten Paßpunkten. Da d^2 bei der Berechnung von $\mathbf{c}$ anfällt, ist $\mathbf{g}$ mit nur geringem Mehraufwand zu erhalten.



Berechnung der Gewichte nach (5-12)
Berechnung der Interpolationsgenauigkeit nach (5-24)

Abb. 5-28: Beispiel einer Gewichtsberechnung

Das Produkt $\mathbf{c}^T\mathbf{g}$ unterscheidet sich wenig von dem Produkt $\mathbf{e}^T\mathbf{g}$.[1] Durch Mitverwendung des Kovarianzvektors $\mathbf{c}$ wird jedoch erreicht, daß auch die Kovarianzverhältnisse bei der Gewichtsbestimmung berücksichtigt werden.

---

[1] $\mathbf{e} = (1,1, \ldots ,1)$

Nach diesem Mittelungsprozeß liegen von den Verknüpfungspunkten auch Koordinaten in der Rektifizierungsvorlage vor, sodaß es möglich wird, sie im folgenden wie Paßpunkte zu behandeln.

Die gesamte Interpolation, also auch die empirische Bestimmung der Kovarianzfunktion wird wiederholt, dieses Mal jedoch mit Paßpunkten und den als Paßpunkte geeigneten Verknüpfungspunkten. Mit der so erhaltenen Interpolation werden die Verknüpfungspunkte nochmals auf die Rektifizierungsvorlage transformiert. Die interpolierte Lage eines Verknüpfungspunktes von einem Streifen wird von der aus dem benachbarten Streifen nur mehr sehr wenig abweichen, da es sich ja jetzt um die Interpolation von "Paßpunkten" handelt. Der Mittelungsvorgang wird nochmals durchgeführt; man erhält eine verbesserte Lage des Punktes in der Rektifizierungsvorlage, der wieder als Paßpunkt eingeführt, eine verbesserte Interpolation ergibt. Dieser Vorgang wird so oft durchgeführt, bis

entweder: sich die Lage der Verknüpfungspunkte in der Rektifizierungsvorlage stabilisiert

oder: eine vorgegebene maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist

oder: eine vorgegebene maximale Lagedifferenz unterschritten wird.

Genau betrachtet müssen bei der Änderung der Anpassung zwischen zwei Streifen die Interpolationen aller Streifen geändert werden. Das heißt also, daß sich die Iterationen immer auf den gesamten Bildblock beziehen und immer so viele Iterationen durchgeführt werden müssen, als für die schlechterste Streifenverknüpfung notwendig sind.

Wenn im Iterationsprozeß die Verknüpfungspunkte mit ihren rechnerisch gewonnenen Rektifizierungsvorlagen-Koordinaten wie Paßpunkte weiter verwendet werden, stellt sich die Frage, welcher unregelmäßige Fehleranteil ihnen zugeschrieben ist. Er könnte nach den Genauigkeitsformeln der Interpolation nach kleinsten Quadraten mit Berücksichtigung der Mittelung berechnet werden. Es käme für jeden "Paßpunkt", der aus Verknüpfungspunkten hervorgeht, ein individueller unregelmäßiger Anteil heraus. Diese Verfeinerung wurde im Programm nicht verwirklicht. Jeder Paßpunkt, ob ein ursprünglicher Paßpunkt oder einer aus Verknüpfungspunkten hervorgegangener, hat den gleichen unregelmäßigen Fehleranteil.

5.6.2.2. Invertieren der Interpolation nach kleinsten Quadraten.

Das erläuterte Interpolationsverfahren gestattet, an in der Vorlage definierten Rasterpunkten die Verzerrungswerte zu interpolieren (=indirekte

Methode des Abschnittes 4.3). Es ermöglicht also die Transformation eines Vorlagenpunktes in das MSS-Bild. Bei der Verknüpfung der Streifen ist jedoch auch der umgekehrte Weg notwendig, wenn nämlich die Lage der im MSS-Bild gegebenen Verknüpfungspunkte in der Vorlage gesucht wird. Die Inversion des Interpolationsalgorithmus sollte möglich sein.

Da vorausgesetzt wird, daß ein MSS-Bild eine umkehrbar eindeutige Abbildung der Rektifizierungsvorlage darstellt, müßte die Interpolation (=Affintransformation + Interpolation nach kleinsten Quadraten), die eine Zuordnung zwischen MSS-Bild und Rektifizierungsvorlage beschreibt, eindeutig invertierbar sein.

Die Koordinaten eines Punktes (x_M,y_M) im MSS-Bild errechnen sich aus den Koordinaten des entsprechenden Punktes (x_V,y_V) in der Vorlage mit Hilfe der folgenden, vereinfacht angeschriebenen Gleichungen:

$$x_M = AT_x(x_V,y_V) + I_x(x_V,y_V)$$
$$y_M = AT_y(x_V,y_V) + I_y(x_V,y_V)$$

AT stellt die Affintransformation dar, deren Koeffizienten anhand der Paßpunkte bestimmt worden sind. Sie ist für die Abspaltung des deterministischen Anteils und für die Zuordnung zwischen den Koordinatensystemen der Vorlage und des MSS-Bildes verantwortlich. I stellt die Interpolation nach kleinsten Quadraten dar, die durch die Paßpunkte, die Verzerrungswerte und die Kovarianzfunktionen festgelegt ist. Sie liefert die interpolierten Verzerrungswerte, mit denen die aus der Affintransformation erhaltenen Koordinaten korrigiert werden.

Die Inversion ist:

$$(x_V,y_V) = AT^{-1}(x_M-I_x(x_V,y_V),y_M-I_y(x_V,y_V))$$

In einem Punkt (x_M,y_M) des MSS-Bildes ist der Anteil der Interpolation I (= die Verzerrung) im allgemeinen unbekannt. Es könnte erst anhand der gesuchten Koordinaten (x_V,y_V) errechnet werden, sodaß die Inversion deshalb nicht exakt durchführbar ist (Abb. 5-29).

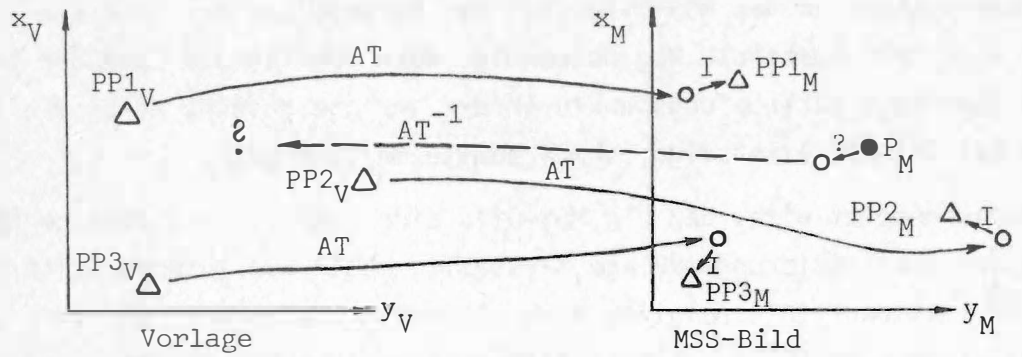


Abb. 5-29: Zuordnung zwischen Vorlage und MSS-Bild

Eine Inversion ist daher nur iterativ möglich. Ein brauchbares Verfahren soll im folgenden (Abb. 5-30) gezeigt werden. Voraussetzung ist das Vorhandensein mindestens dreier, nicht auf einer Geraden liegender Paßpunkte.

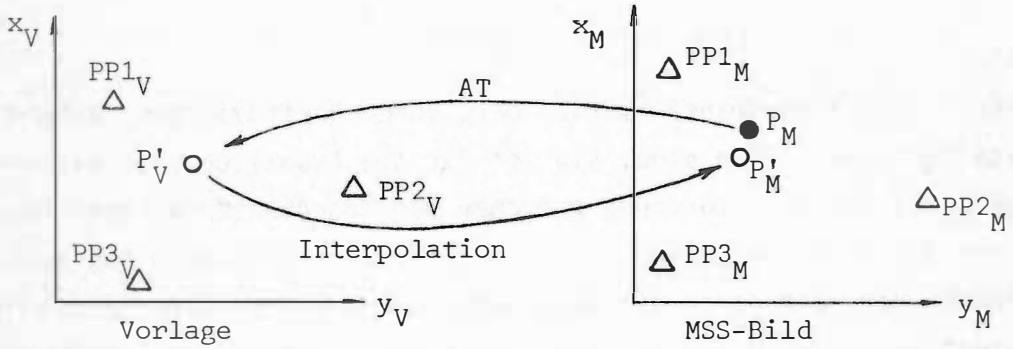


Abb. 5-30: Prinzip der Inversion der Interpolation nach kleinsten Quadraten

Die Interpolation nach kleinsten Quadraten sei so gegeben, daß ein in der Vorlage bekannter Punkt exakt im MSS-Bild bestimmt werden kann.

Der Punkt P_M sei im MSS-Bild gegeben, gesucht sei seine Lage P_V in der Vorlage. Mit Hilfe der nächsten drei Paßpunkte kann über eine Affintransformation die approximative Lage P'_V in der Vorlage berechnet werden. Da die Inversion sich auf die interpolierten Verzerrungen bezieht, müssen vor der Affintransformation an den Paßpunkten die ursprünglichen Verzerrungen durch Beseitigen der Filterbeträge in interpolierte Verzerrungen abgeändert werden. Die Lage von P'_V im MSS-Bild kann wieder mit den exakten Formeln bestimmt werden; man erhält den Punkt P'_M, welcher in der Nähe von P_M liegen wird. Der Punkt P' kann nun ebenfalls als Paßpunkt verwendet werden, da seine exakte Lage sowohl im MSS-Bild (P'_M) als auch in der Vorlage (P'_V) be-

kannt ist. Der nächste Iterationsschritt beginnt wieder mit einer Affintransformation von P_M in die Vorlage, wobei bereits der Punkt P' als nächster Paßpunkt herangezogen werden wird. In der Vorlage erhält man den Punkt P'_V, durch exakte Rückrechnung in das MSS-Bild den Punkt P'_M. Die Iteration wird solange fortgesetzt, bis nach dem i-ten Durchgang in der Vorlage der Punkt P^{i-1}_V mit dem Punkt P^i_V übereinstimmt. Der gesuchte Punkt ist P^i_V.

Dieses Verfahren für eine große Punktanzahl zu verwenden, ist nicht sehr vorteilhaft. Es ist jedoch sicherlich für die Transformation der Verknüpfungspunkte in die Rektifizierungsvorlage geeignet.

5.7. Der dritte Programmteil

Unter der Voraussetzung, daß das Produkt $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$ der Grundgleichung (5-4) eine exakte Beschreibung der MSS-Verzerrungen liefert, kann für jedes beliebige Bilddetail die geometrisch exakte Position berechnet werden.

Im Falle der digitalen Rektifizierung würde dies heißen, daß die Berechnung der Vorlagenposition für jedes einzelne Bildelement gesucht werden müßte. Diese Vorgangsweise läßt jedoch einen hohen Rechenaufwand erwarten. Es ist daher sinnvoller, die Interpolation nicht für jedes einzelne Bildelement anzuwenden. Nur für Bildelemente, die rasterknotenförmig über den gesamten Bildbereich verteilt sind, wird der exakte Interpolationsalgorithmus verwendet, während die dazwischenliegenden Bildelemente ihre Verzerrungswerte durch eine einfache und schnellere lineare Interpolation erhalten.

Betrachtet man das Prinzip der AVIOPLAN-Rektifizierung, so erfolgt auch dort ein analoger Vorgang. Die exakten Verzerrungswerte werden nur an Rasterknoten berechnet. Der Bildinhalt dazwischen wird über eine bilineare Interpolation umgebildet /Kraus u. Waldhäusl, 1982; Vozikis, 1979/.

Die Hauptaufgabe dieses Programmteiles liegt daher in der Aufstellung eines regelmäßigen Rasters, der im Bereich des Ergebnisbildes ausgebreitet wird, und der Interpolation der MSS-Verzerrungswerte in den Rasterknoten. Das Ergebnis ist ein AVIOPLAN-Steuerband bzw. im Falle der digitalen Umbildung der Datensatz mit der Entzerrungsinformation für den 4. Programmteil.

Details bei der Rektifizierung mit dem AVIOPLAN sollen hier nicht besprochen werden. Der Aufbau des Rasters erfolgt im Prinzip genauso wie bei der konventionellen Orthophotoproduktion. Der Berechnung der Steuerwerte an den Rastermaschenpunkten liegt aber nicht das Geländemodell und die Zentralperspektive zugrunde sondern die aus dem zweiten Programmteil erhaltenen

Produkte $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{l}$. Für die AVIOPLAN-Rektifizierung ist mit diesem Programmteil die Arbeit an der Rechenanlage abgeschlossen /Otepka, 1976/.

Etwas umfangreicher sind die Aufgaben, die dieses Programm im Falle der digitalen Rektifizierung erfüllen muß. In den ersten beiden Programmteilen wurden keine wesentlichen Eingaben für die digitale Rektifizierung verlangt. Man hat daher jetzt noch alle Möglichkeiten, die Lage und Größe (=Scan- und Streifenrichtung und Ausdehnung) und die Struktur (= Bildelementgröße) des Ergebnisbildes festzulegen. Diese Entscheidungsfreiheit ist besonders dann von Vorteil, wenn große Bildmosaike erzeugt werden sollen, die jedoch aus Speicher- und Rechenzeitgründen in mehrere Teilmosaike zerlegt werden müssen. Eine ebenfalls wichtige Aufgabe übernimmt dieser Programmteil bei der Angabe der Mosaikzusammensetzung. Es sind die Mosaikschnittlinien, die Mosaikbegrenzungslinien anzuführen und auch die Zuordnung der MSS-Bilder zu den einzelnen Mosaikteilen zu treffen (Abb. 5-31).

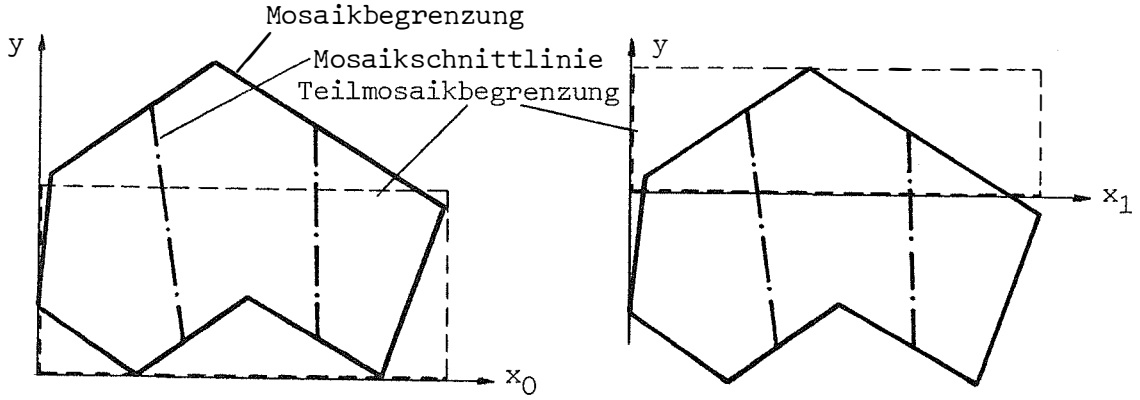


Abb. 5-31: Zerlegen eines Mosaiks in Teilmosaike

5.7.1. Wahl der Bildelementgröße im Ergebnisbild

Ein Bildelement ist eine Position innerhalb der digitalen Bildmatrix und hat keine vorgegebene Ausdehnung. Der Begriff der Größe eines Bildelementes ist nur in Verbindung mit einer optischen Darstellung der Bildmatrix sinnvoll, wobei damit der Abstand der Matrixpositionen in Zeilen(=Scan)- und Spalten(=Streifen)richtung zu verstehen ist.

Die Bildelementgröße (=dp) steht dadurch in direktem Zusammenhang mit dem Bildmaßstab (M=1:m). Sind Maßstab und Größe bekannt, so läßt sich jene Fläche im dargestellten Objekt berechnen, die durch ein Bildelement gedeckt wird. Die Ausdehnung dieser Fläche bezeichnet man als Bodenauflösung (=ds) des digitalen Bildes.

Bei der Rektifizierung ist der Maßstab des Ergebnisses vorgegeben. Denkt man sich das digitale Bild rektifiziert mit Hilfe des AVIOPLAN (auf optischem Wege), so entstünde aus der regelmäßigen Bildelementrasterstruktur des ursprünglichen Bildes eine verzerrte Darstellung im gewünschten Maßstab (Abb. 5-32).

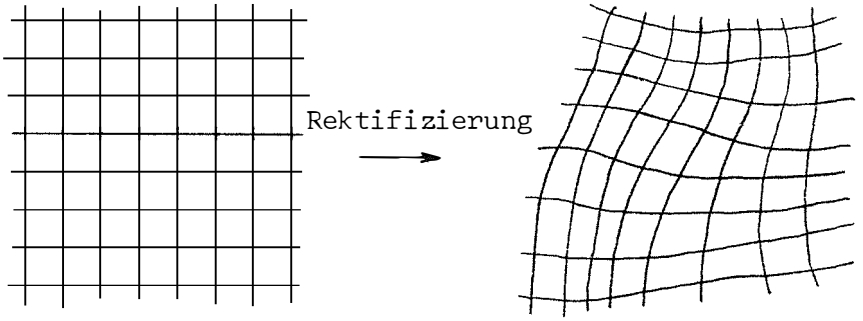


Abb. 5-32

Durch Digitalisieren dieses AVIOPLAN-Ergebnisses erhielte man eine digitale Darstellung des rektifizierten Bildes. Beim Digitalisieren wäre das Digitalisierungsintervall in Scan- und Streifenrichtung vorzugeben (= entspräche der Bildelementgröße im Ergebnisbild). Es ist zu sehen, daß das Digitalisierungsintervall vollkommen frei gewählt werden könnte.

Analog dazu funktioniert die digitale Rektifizierung. Vorgegeben wird die digitale Bildelementrasterstruktur im gewünschten Maßstab des Ergebnisbildes (= entspricht oben erwähntem Digitalisierungsraster). Durch die Rektifizierung wird dieses Raster mit Bildinhalt (= Grauwerten) gefüllt. Die Bildelementrasterweite (= Bildelementgröße im Maßstab des Ergebnisses) wäre prinzipiell beliebig wählbar.

Werden die Bildelemente sehr groß gewählt, so geht Information verloren. Einem einzigen Bildelement des Ergebnisses würden mehrere verschiedene Bildelemente des Originalbildes zugeordnet (Abb. 5-33).

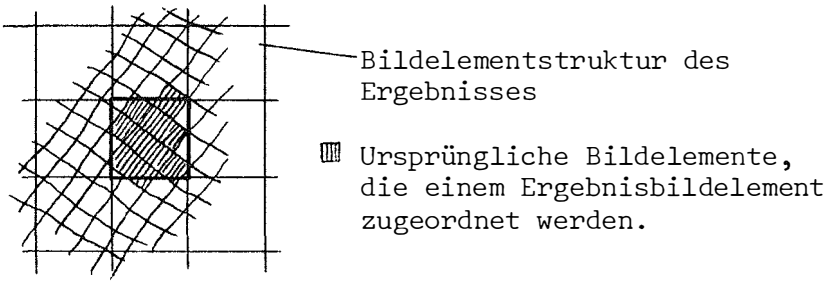


Abb. 5-33: Im Ergebnis zu groß gewählte Bildelemente

Werden die Bildelemente zu klein gewählt, so geht zwar keine Information verloren, jedoch ist auch kein Informationsgewinn gegenüber dem Original gegeben. Allerdings nimmt die Bildelementanzahl sehr rasch zu (umgekehrt quadratisch proportional zur Verkleinerung). Mehrere neue Bildelemente erhalten dann den Grauwert eines einzigen ursprünglichen Bildelementes (Abb. 5-34).

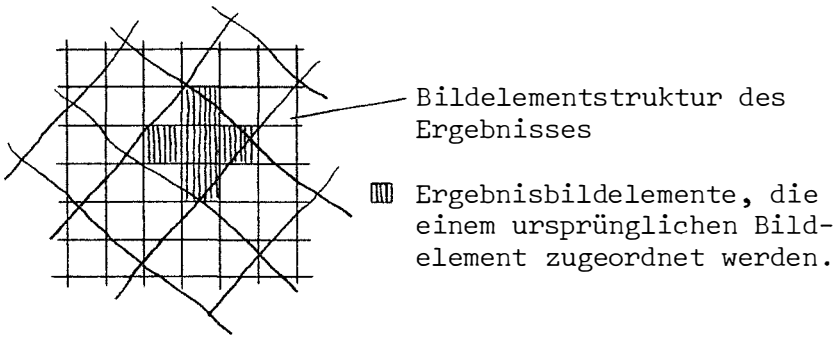


Abb. 5-34: Im Ergebnis zu klein gewählte Bildelemente

Eine optimale Größe (= kein Informationsverlust bei einer möglichst geringen Bildelementanzahl im Ergebnis) erhält man durch Vergleich der Bodenauflösung des Ergebnisbildes mit der der Scanneraufnahme. Beide Bodenauflösungen sollen etwa gleich groß werden.

Die Bodenauflösung ds des Ergebnisses ist errechenbar aus der Maßstabszahl m des Ergebnisbildes (entspricht im allgemeinen dem Maßstab der Rektifizierungsvorlage) und der Bildelementgröße dp des Ergebnisbildes

$$ds_{(Ergebnis)} = dp_{(Ergebnis)} \cdot m_{(Ergebnis)} \qquad (5\text{-}13)$$

Die Bodenauflösung ds des Scanners errechnet sich aus Flughöhe H_{min} und Scanneraufösung $d\alpha$. Die beste Bodenauflösung - sie ist für diese Abschätzung von Bedeutung - ist in Streifenmitte bei der minimalen Flughöhe über Grund gegeben

$$ds_{(Scanner)} = H_{min} \cdot d\alpha \qquad (5\text{-}14)$$

Daraus folgt, unter der Voraussetzung, daß $ds_{(Ergebnis)} = ds_{(Scanner)}$

$$dp_{(Ergebnis)} = \frac{H_{min} \cdot d\alpha}{m_{(Ergebnis)}} \qquad (5\text{-}15)$$

Diese Bildelementgröße dp ist jene, ab welcher bei weiterer Verkleinerung kein Informationsgewinn mehr zu erwarten ist, bei deren Vergrößerung jedoch mit Informationsverlust zu rechnen ist. Die letztlich verwendete Bildelementgröße sollte daher ≤ dp sein.

5.7.2. Wahl der Rasterweite

Wie erwähnt, erfolgt die Interpolation nach kleinsten Quadraten nicht für jedes einzelne Bildelement, sondern nur für jene Bildelemente, die in den Knotenpunkten eines im Ergebnisbild ausgebreiteten Rasters liegen. Die Berechnung für die Verzerrungen für die dazwischenliegenden Bildelemente erfolgt mit bilinearer Interpolation.

Äquivalent ist der Sachverhalt bei der optischen Umbildung mittels AVIOPLAN. Auch da erfolgt die Berechnung eines Rasters. Der Bildinhalt zwischen den Rasterpunkten wird ebenfalls über eine bilineare Interpolation umgebildet.

Die durch die Interpolation nach kleinsten Quadraten erhaltenen zweidimensionalen Verzerrungsfunktionen (eine für die x-, die andere für die y-Koordinate) können als stetige Verzerrungsflächen dargestellt werden, die infolge der Anwendung der bilinearen Interpolation zwischen den Rasterpunkten durch eine "Polyederfläche" approximiert wird, dessen Einzelflächen parabolische Hyperpoloide sind. Die Differenzen zwischen Polyederfläche und Interpolationsfläche sind die Fehler, die durch diese Vereinfachung erhalten werden (Abb. 5-36). Je kleiner die Rasterintervalle sind und je geringer die Krümmungsverhältnisse der Interpolationsfläche sind, desto geringer werden die zusätzlichen Interpolationsfehler.

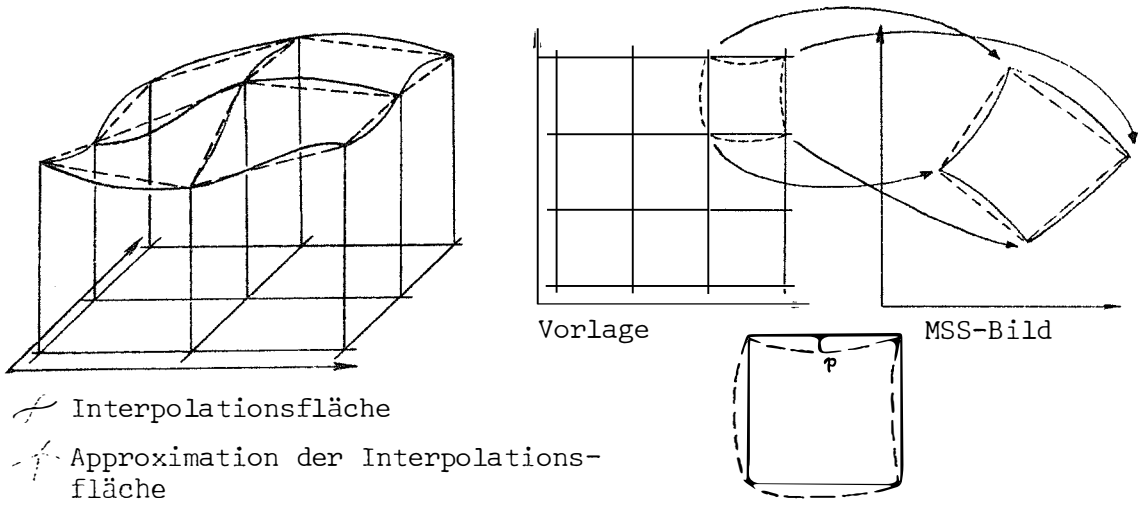


Abb. 5-36: Fehler durch Approximation der Interpolationsfläche

Die Rasterweite ist daher entsprechend den Verzerrungsverhältnissen zu wählen. Eine zu kleine Rasterweite hat zwar keinen Einfluß auf die Qualität des Ergebnisses, erhöht jedoch den Rechenaufwand bei der Interpolation der Verzerrungswerte und den Ein- Ausgabeaufwand bei der digitalen Umbildung bzw. die Gerätelaufzeit der AVIOPLAN-Umbildung. Eine zu große Rasterweite führt zu Geometriefehlern und erhöht den Arbeitsspeicherbedarf bei der digitalen Umbildung.

Zur Abschätzung des Approximationsfehlers dienen folgende Überlegungen:

Die interpolierte Fläche stellt eine stetige Funktion F dar.

$$F = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{a} \qquad (5\text{-}16)$$

$\mathbf{a}$ ist für einen Interpolationsbereich konstant, die Ortsvariablen x und y sind in $\mathbf{c}^T$ enthalten. Die Komponenten von $\mathbf{c}^T$ sind differenzierbar, sodaß die Ableitungen dF/dx und dF/dy als auch d^2F/dx^2 und d^2F/dy^2 gebildet werden können.

Die Funktion F hat die Form:

$$F = q \cdot \sum_{i=1}^{n} \mathrm{cov}\,(x,y,x_i,y_i)\, a_i$$

n = Anzahl der Paßpunkte
a_i = Elemente des Vektors $\mathbf{a}$
$\mathrm{cov}(x,y,x_i,y_i)$ = Kovarianzfunktion
x,y = Koordinaten des zu interpolierenden Punktes
x_i,y_i = Koordinaten der Paßpunkte
q = Scheitelwert der Kovarianzfunktion

Die Ableitungen von F sind:

$$F' = \mathbf{c}^T{}'\mathbf{a} \text{ (1.Abl.)} \quad \text{und} \quad F'' = \mathbf{c}^T{}''\mathbf{a} \text{ (2.Abl.)}$$

Für $\mathrm{cov}(x,y,x_i,y_i) = e^{-((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2)c^2}$ gilt:

$$\mathrm{cov}' = -2qc^2(x-x_i)\,\mathrm{cov} \qquad (5\text{-}17)$$

$$\mathrm{cov}'' = -2qc^2(1 - 2\,(x-x_i)^2c^2)\,\mathrm{cov} \qquad (5\text{-}18)$$

Für $\mathrm{cov}(x,y,x_i,y_i) = 1/(((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2)\,c^2 + 1)$ gilt:

$$\mathrm{cov}' = -2qc^2(x-x_i)\mathrm{cov}^2 \qquad (5\text{-}19)$$

$$\mathrm{cov}'' = -2qc^2(1 - 3\,(x-x_i)^2c^2\mathrm{cov})\mathrm{cov}^2 \qquad (5\text{-}20)$$

Äquivalente Formeln gelten für die Ableitungen nach y.

Die Krümmung in Koordinatenrichtung errechnet sich aus

$$K = F''/(1 + F'^2)^{3/2} \qquad (5\text{-}21)$$

Der Krümmungsradius $R = |1/K|$. Die Berechnung erfolgt für die x- und für die y-Koordinate. Sie ist ohne viel Mehraufwand gemeinsam mit der Ermittlung des Kovarianzvektors $\mathbf{c}^T$ durchführbar. Nach der Interpolation eines Rasterpunktes stehen daher nicht nur die interpolierten Werte F_x, F_y sondern auch die Ableitungen F'_x, F'_y und F''_x, F''_y zur Verfügung.

Da die Rasterpunkte relativ engmaschig über das gesamte Interpolationsgebiet verteilt sind, entspricht die so erhaltene maximale Krümmung mit hoher Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen maximalen Krümmung. Durch die Berechnung eines Mittels aller Krümmungen erhält man Auskunft über die mittleren Krümmungsverhältnisse.

Folgende Annahmen sollen dazu dienen, eine Abschätzung zu erhalten, welcher Fehler bei der maximalen Krümmung im Bereich eines Rastervierecke zu erwarten ist (Abb. 5-37).

- Die Rastereckpunkte haben gleiche Verzerrungswerte, d.h., die Polyederfläche liegt in einer "horizontalen" Ebene.
- Die maximale Krümmung tritt am Umfang des Rastervierecke auf.
- Die Interpolationsfläche kann über dem Rastervierecke als Kugelfläche angenähert werden.
- Der Krümmungsradius ist groß im Vergleich zur Rasterweite

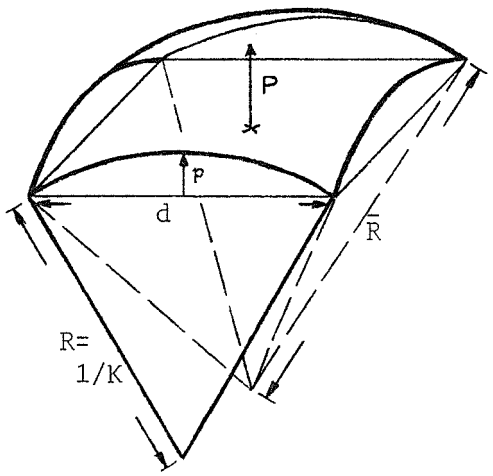


Abb. 5-37: Abschätzung des Approximationsfehlers

Unter diesen Annahmen läßt sich die Pfeilhöhe p (= ein Maß für die Abweichung der Interpolationsfläche von der Approximation) bei maximaler Krümmung in der Mitte einer Rasterseite nach

$$p \approx \frac{d^2}{8R} = K \cdot \frac{d^2}{8} \qquad \text{(d = Rasterweite)} \qquad (5\text{-}22)$$

errechnen. Daraus ergibt sich, daß bei Halbierung der Rasterweite sich die Pfeilhöhe auf ein Viertel verkleinert.

Bei den gleichen Krümmungsverhältnissen ist jedoch die Abweichung der Interpolationsfläche in der Rasterquadrat-Mitte (= Pfeilhöhe P) größer. Sie gibt daher den maximalen Approximationsfehler innerhalb eines Rastervierecks bei gegebener maximaler Krümmung an.

Der Kugelradius $\bar{R}$ ergibt sich aus den Krümmungsradien R an der Rasterseite aus

$$\bar{R} = \sqrt{R^2 + d^2}$$

Für die Pfeilhöhe P erhält man daher (da die Sehnenlänge $d\sqrt{2}$ ist)

$$P = \frac{2d^2}{8\sqrt{R^2+d^2}}; \text{ da } d \ll R: P = \frac{1}{4} \cdot \frac{d^2}{R} = 2p \qquad (5\text{-}23)$$

Beispiel: R = 50 mm, d = 3,2 mm → p = 0,026 mm, P = 0,051 mm.

Man erhält so einen Approximationsfehler für die x-Koordinate (P_x) und einen für die y-Koordinate (P_y). Der geschätzte Lagefehler ist daher $\sqrt{P_x^2 + P_y^2}$. Es gilt auch für diesen Lagefehler, wie früher für p, daß er durch Halbierung der Rasterweite auf ein Viertel seiner ursprünglichen Größe vermindert werden kann. Die Größe des Fehlers sollte ein halbes Bildelement nicht überschreiten. Da man vor Beginn der Rasterberechnung über die Krümmungsverhältnisse noch keine Aussage besitzt, ist es zuerst notwendig mit einer geschätzten Rasterweite zu rechnen. Auf Grund des daraus erhaltenen Approximationsfehlers kann eventuell eine Korrektur der Rasterweite erfolgen.

Im Falle der digitalen Rektifizierung muß bei der Wahl der Rasterweite auch auf die Größe der Bildeinheiten Rücksicht genommen werden (Kap. 5.8.1.1.). Die Rasterweite, angegeben in Anzahl der Bildelemente, entspricht der Seitenlänge der verwendeten Bildeinheiten.

Bei der AVIOPLAN-Rektifizierung muß man die zur Verfügung stehenden Schlitzblenden des AVIOPLANs beachten. Die Schlitzblendenlänge (= 3 bis 16 mm, in Abständen von 1 mm) entspricht der Rasterweite.

5.8. Die Rektifizierung

Die eigentliche Rektifizierung ist im Falle der digitalen Version ein 4. Programmteil, der von allen vorangegangenen Programmteilen den größten Massenspeicherplatz erfordert. Die Bilddaten müssen nämlich rechnerintern verspeichert und verarbeitet werden. Im Falle der optischen Variante erfolgt die Rektifizierung am AVIOPLAN. Es ist kein zusätzlicher Rechenaufwand notwendig.

5.8.1. Digitale Rektifizierung

Durch die digitale Rektifizierung erfolgt die Umbildung und gleichzeitig das Zusammensetzen der einzelnen Mosaikteile zu einem einheitlichen, geometrisch korrigierten Block in der Rechenanlage. Ebenso wird die Begrenzung des Interessensgebietes digital durchgeführt. Da alle Spektralbereiche gleichzeitig behandelt werden können, ist das Ergebnis ein digitales Multispektralmosaik.

5.8.1.1. Die Bildeinheiten

Die digitale Umbildung entspricht einem Umordnen der Bildelemente anhand der aus dem 3. Programmteil erhaltenen Verzerrungsinformation. Es ist dies also ein Prozeß, der mit umfangreichem Datenmaterial durchgeführt werden muß. Eine sehr wesentliche Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Rektifizierungsverfahrens ist daher eine günstige Speicherungsstruktur und Verarbeitungsfolge der Bilddaten.

Praktisch bewährt hat sich die Einteilung eines Bildes in Bildeinheiten, auf welcher in frei wählbarer Reihenfolge zugegriffen werden kann. Die Bildeinheiten entstehen durch rasterförmiges Aufteilen des Gesamtbildes in gleich große Teilbilder. Die Rasterweite (= Anzahl der Bildelemente pro Bildeinheiten-Seite) entspricht der im 3. Programmteil angegebenen. Im Original-MSS-Bild und im Ergebnisbild sind die Bildeinheiten gleich groß.

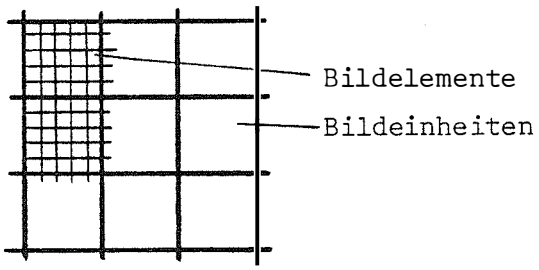


Abb. 5-38: Bildeinheitenstruktur

Gewöhnlich liegen die Bilddaten scanweise auf Magnetband vor. Die Datenformate der Magnetbänder sind jedoch sehr unterschiedlich (z.B. LANDSAT-Format, OPTRONICS-Format, FMP-Format[1)], etc.). Es ist daher notwendig, diese externen Formate in das interne Bildeinheitenformat umzuwandeln. Das Umgekehrte ist im Anschluß an die Rektifizierung durchzuführen, wenn das im internen Format vorliegende Ergebnisbild wieder in ein vom Benutzer gewünschtes externes Format zu ändern ist. Dieser Datenvorverarbeitungs- und -nachverarbeitungsschritt zählt jedoch nicht zum eigentlichen Bestandteil der Rektifizierung.

Die Rektifizierung erfolgt bildeinheitenweise nach der indirekten Methode im Arbeitsspeicherbereich der Rechenanlage. Bildeinheit für Bildeinheit des Ergebnisbildes wird mit den entsprechenden Grauwerten des Original-MSS-Bildes gefüllt. Bestimmt man jenen Bereich im Original-MSS-Bild, der für die Rektifizierung einer Ergebnisbildeinheit benötigt wird, so werden davon mehrere Bildeinheiten des Original-MSS-Bildes berührt. Das heißt aber, daß im Arbeitsspeicher die umzubildende Ergebnisbildeinheit und mehrere Originalbildeinheiten abgespeichert sein müssen (Abb. 5-39).

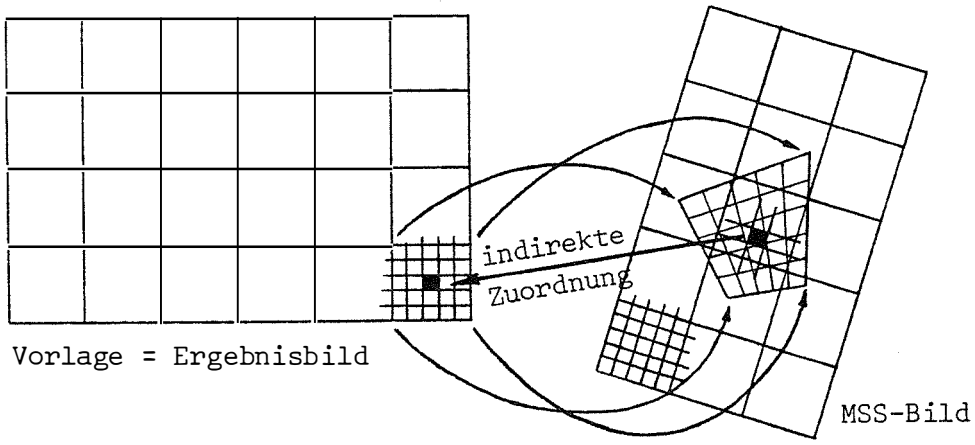


Abb. 5-39: Prinzip der digitalen Umbildung

[1)] FMP ist die Abkürzung für das Deutsche Flugzeugmeßprogramm

Wurde die Bildelementgröße des Ergebnisbildes nach der in Kap. 5.7.1. beschriebenen Methode bestimmt, so findet man mit einem 3 x 3 Bildeinheitenbereich im MSS-Bild das Auslangen. Je kleiner dp gewählt wird, desto kleiner, je größer dp gewählt wird, desto größer wird der benötigte Bereich. Ein zu groß angenommenes dp ist also in mehrfacher Hinsicht ungünstig:

- Informationsverlust gegenüber der Aufnahme (Kap. 5.7.1.)
- steigende Anzahl der für die Rektifizierung benötigten MSS-Bildeinheiten, die zu hohem Arbeitsspeicherbedarf führt,
- große längenmäßige Ausdehnung einer Bildeinheitenseite (= große Rasterweite), die eine schlechte lineare Approximation zur Folge hat (Kap. 5.7.2.).

Abschließend soll ein Beispiel den Speicherplatzbedarf demonstrieren.

Gegeben seien: 11 Spektralbereiche (Grauwerte à 8-bits)
16 Bildelemente Rasterweite (= 256 Bildelemente pro Bildeinheit)
max. 3 x 3 benötigte Bildeinheiten des MSS-Bildes pro Ergebnisbildeinheit.

Im Arbeitsspeicher befinden sich maximal 10 Bildeinheiten (3 x 3 Original + 1 Ergebnis)
= 10 x 256 Bildeinheiten = 10 x 256 x 11 Grauwerte = 28160 x 8-bits.

5.8.1.2. Der Bildhintergrund

Im Ergebnisbild muß zwischen Bildinhalt und Bildhintergrund unterschieden werden. Der Hintergrund ist jener Bereich,

- der entweder zwar bereits außerhalb der Mosaikgrenzen aber noch innerhalb der digitalen Bildstruktur liegt (Scanlänge x Streifenlänge-Bereich)
- oder dem bei der Rektifizierung keine Bildinformation zugewiesen werden konnte, da keine Scannerdaten für den Interessenbereich vorhanden waren.

Die Grauwerte des Bildhintergrundes entstammen ebenfalls dem Grauwert-Wertebereich. Eine Unterscheidung zwischen Bildinhalt und Hintergrund anhand des Grauwertes eines Bildelementes ist daher nicht möglich. Gewöhnlich wird als Hintergrundgrauwert Ø gewählt.

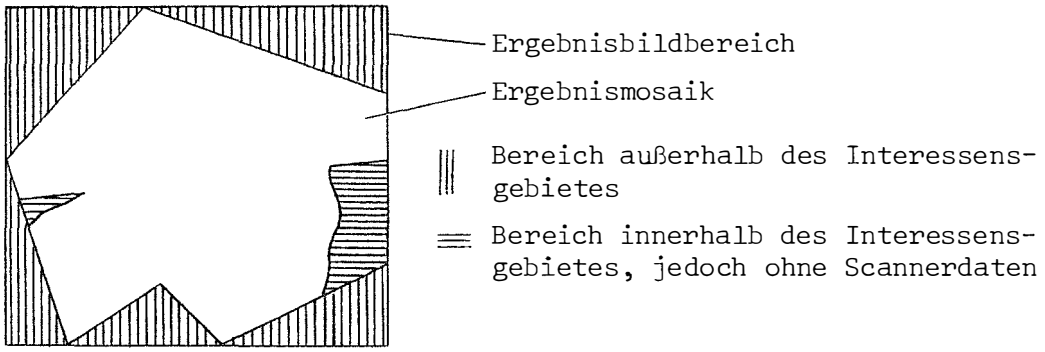


Abb. 5-40: Hintergrundgrauwerte

5.8.2. AVIOPLAN-Rektifizierung

Für die Rektifizierung werden die umzubildenden MSS-Bilder und die dazugehörenden Steuerdatensätze (= Ergebnis des 3. Programmteiles) benötigt. Ein Steuerdatensatz beinhaltet lediglich geometrische Information. Das heißt also, daß bei Vorliegen mehrerer Spektralbereiche desselben Scannerfluges derselbe Steuerdatensatz verwendet werden kann. Es ist jedoch zu beachten, ob die geometrischen Eigenschaften der Bilder aller Spektralbereiche gleich sind. Infolge unterschiedlichen Filmverzugs oder uneinheitlicher Bildherstellung muß dies nicht erfüllt sein. Sind diese Voraussetzungen also nicht gegeben, müssen die einzelnen Spektralbereiche wie eigene Mosaike behandelt werden, beginnend bei getrennter Paßpunktmessung.

Das Ergebnis der Umbildung sind die entzerrten Bilder. Das Bildmosaik muß erst durch manuelle Montage, streng für jeden Spektralbereich durchgeführt werden /Jansa u. Zierhut, 1981/.

5.9. Fehlersuche und Genauigkeiten

5.9.1. Fehlersuche

Im praktischen Einsatz ist es vor allem wichtig, Fehler der Punktidentifizierung und -messung und Fehler der Programmsteuerdaten rechtzeitig aufzudecken, sodaß diese noch vor dem aufwendigen Umbildeprozeß erkannt werden können.

Häufig gemachte Fehler sind:

(1) Fehler bei der Messung der Meßeinheitenverknüpfungspunkte
(2) Fehler bei der Identifizierung bzw. Messung der Punkte, die den Streifenanfang und das Streifenende definieren
(3) Fehler bei der Angabe der Scananzahl eines Streifens und der Bildelementanzahl eines Scans
(4) Fehler der Paß- und Verknüpfungspunktidentifizierung bzw. -messung
(5) Fehler bei der Angabe der Mosaikbegrenzung und der Mosaikschnittlinien
(6) Fehler der Bilddatenzuordnung

Zu (1)

Das Aneinandertransformieren der Meßeinheiten erfolgt mit Hilfe einer 3-Parameter-Transformation. Da im allgemeinen mehr als zwei Meßeinheitenverknüpfungspunkte gegeben sind, werden die Transformationselemente durch Ausgleich bestimmt. Die Verbesserungen der ausgeglichenen Koordinaten gegenüber den gegebenen sind bei der 3-Parametertransformation gut als Fehlerindikator geeignet /Kraus, 1975/.

Zu (2)

Bei der digitalen Rektifizierung ist die Beziehung zwischen Bilddaten und Koordinaten durch die Punkte "Streifenanfang, Scananfang", "Streifenanfang, Scanende" und "Streifenende, Scananfang" gegeben. Diese drei Punkte sollen einen rechten Winkel bilden. Die Schenkellängen des Winkels lassen sich aufgrund der Angaben über Bildelementgröße, Anzahl der Scans im Streifen und Anzahl der Bildelemente im Scan errechnen. Die Abweichungen der Messung gegenüber dem idealen rechten Winkel und den idealen Schenkellängen bilden eine Kontrollmöglichkeit.

Zu (3)

Anhand der Angaben "Scans pro Streifen" und "Bildelemente pro Scan" und der Messung der unter (zu (2)) erwähnten Streifenbegrenzungen wird die Bildelementgröße errechnet. Sie muß mit der gegebenen übereinstimmen.

Zu (4)

Der wichtigste Teil der Fehlersuche betrifft das Auffinden von Paßpunktidentifizierungs- und -meßfehlern. Da das Rektifizierungsverfahren auf dem Prinzip der Vergleichs einer "richtigen" Punktmenge

mit einer "falschen" arbeitet und keine strengen Abbildungsgesetze zwischen diesen beiden Mengen bekannt sind, ist es schwierig, einen fehlerhaften "falschen" Punkt herauszufinden. Man ist daher auf Angaben angewiesen, die nur einen Hinweis auf einen möglichen Fehler geben.

Abgeleitet werden diese Fehlersuchmethoden aus der Voraussetzung, daß die gemessenen Verzerrungen einen affinen deterministischen Fehleranteil enthalten und daß die trendfreien Verzerrungen im kleinen Bereich eine Systematik erkennen lassen. So können alle Punkte, deren trendfreie Verzerrung deutlich von den übrigen abweichen, als fehlerhaft angemerkt werden. (Abb. 5-41)

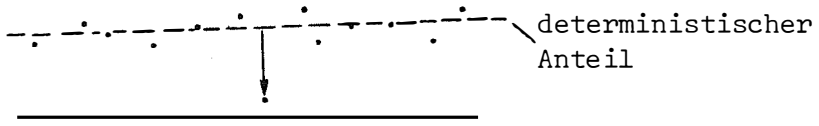


Abb. 5-41: Fehlerhafter Punkt, erkennbar an trendfreier Verzerrung

Wird die Entzerrung mit Filterung durchgeführt, so erhält man an den Paßpunkten nach der Interpolation Restklaffen, welche die Meßungenauigkeiten symbolisieren. Treten an Punkten Filterbeträge auf, die merklich größer als die übrigen sind, so deutet dies darauf hin, daß diese Punkte nicht in die lokale Verzerrungssystematik passen. Das heißt, der Verzerrungsvektor weicht gegenüber den umgebenden in Größe und/oder Richtung ab. (Abb. 5-42)

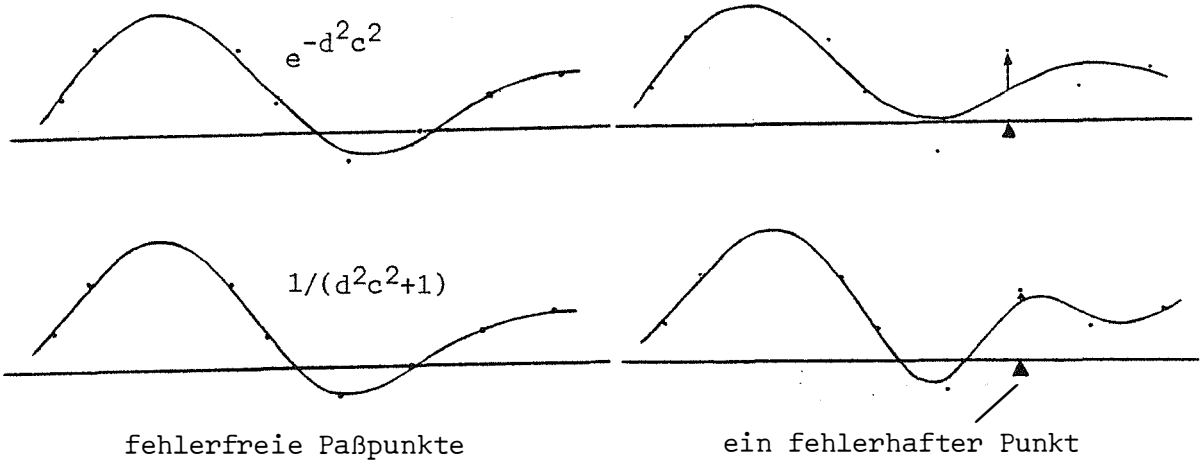


Abb. 5-42: Fehlerhafter Punkt, erkennbar an den Filterbeträgen
Schlechte Erkennbarkeit des Fehlers bei der Kovarianz-Funktion $1/(d^2c^2+1)$ (vgl. 5.6.1.2)

Solche Spannungen innerhalb der interpolierten Funktion treten am Streifenrand weniger stark auf. Die Erkennbarkeit von Fehlern wird daher dort beeinträchtigt.(Abb. 5-43)

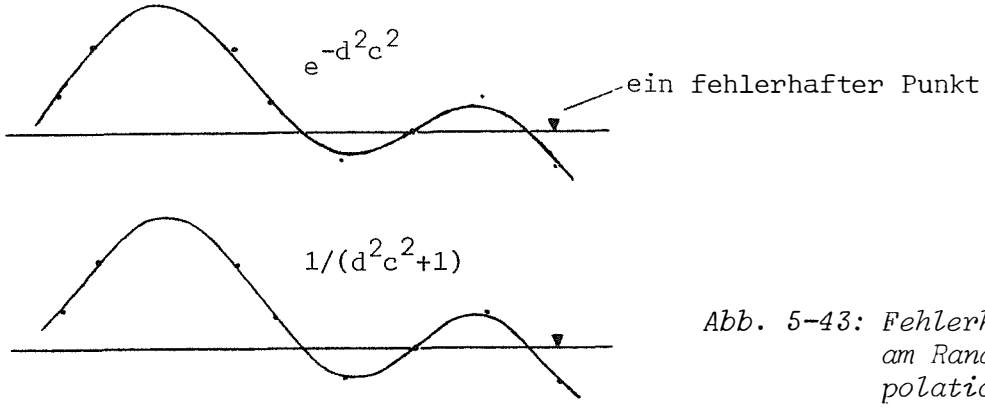


Abb. 5-43: Fehlerhafter Punkt am Rand des Interpolationsbereiches

Verknüpfungspunkte können anhand der Differenz ihrer aus zwei benachbarten Streifen berechneten Vorlagekoordinaten untersucht werden. Da jedoch Verknüpfungspunkte oft am Streifenrand und damit manchmal schon im Extrapolationsbereich liegen, ist auch bei richtigen Daten mit großen Differenzen zu rechnen. Zu bedenken ist auch, daß eventuell umgebende falsche Paßpunkte, die, da sie am Gebietsrand liegen, nicht als fehlerhaft erkannt wurden, einen Fehler in den Verknüpfungspunkten vermuten lassen. Falsche Verknüpfungspunkte können den Rechenaufwand stark erhöhen, da im iterativen Prozeß der Streifenanpassung (Kap. 5.6.2.1.) keine Konvergenz erreicht werden kann. Es ist daher sinnvoll, für eine erste Kontrolle den Iterationsvorgang zu unterbinden.

Oft erkennt man auch bereits an der Form der Kovarianzfunktion, daß grobe Punktfehler vorhanden sein müssen. Eine steile Kovarianzfunktion ist ein typisches Zeichen dafür, daß die Kovarianzbestimmung durch einen stark fehlerhaften Punkt gestört wurde.

Eine Regel, die eine hohe Sicherheit für die Erkennung aller Meß- und Identifizierungsfehler erlaubt, kann nicht angegeben werden. In der Praxis hat sich bewährt, einen Punkt dann als fehlerhaft anzumerken, wenn die Verzerrung oder der Filterbetrag bzw. die Lagedifferenz den entsprechenden Mittelwert um mehr als das 2.5-fache überschreitet. Doch kann auch dies nur als Hinweis auf eine Fehlermöglichkeit gelten. Auch nicht angemerkte Punkte können fehlerhaft, angemerkte Punkte können fehlerfrei sein. Solange sich ein Fehler innerhalb der Größenord-

nung der Verzerrungen bewegt, ist seine Erkennung nicht möglich. Erst der direkte Vergleich des rektifizierten Ergebnisses mit der Rektifizierungsvorlage liefert eine durchgreifende Kontrolle.

Zu (5)

Die gewünschten Mosaikbegrenzungen werden im 3. Programmteil koordinatenmäßig ausgegeben. Es ist nicht nur zu prüfen, ob die Mosaikbegrenzungslinien in der Rektifizierungsvorlage richtig definiert worden sind, auch ihre in das MSS-Bild gerechnete Lage muß kontrolliert werden. Daraus ist nämlich zu erkennen, ob die Zuordnung der MSS-Streifen zu den einzelnen Mosaikteilen richtig angegeben wurde.

Zu (6)

Ob die richtigen Bilddaten für die Rektifizierung verwendet werden, ist nicht kontrollierbar. Häufige Fehlerursachen liegen in der Bereitstellung eines falschen Magnetbandes oder eines falschen Teilbereiches innerhalb des richtigen Magnetbandes. Auch die Flug- und Scanrichtung ist entscheidend. Eine Verwechslung der Punkte, die im MSS-Bild Streifenanfang und -ende definieren (siehe zu (2)), führt zu einer um 180^{o} gedrehten Bildinformation im rektifizierten Ergebnis.

Für die Umbildung mit dem AVIOPLAN haben die Punkte (2), (3) und (6) keine Bedeutung.

5.9.2. Die Genauigkeit des Rektifizierungsergebnisses

Die geometrische Genauigkeit des Ergebnisses wird beeinflußt durch

(1) die Genauigkeit der Punktidentifizierung bzw. -messung,
(2) die Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten und
(3) die Genauigkeit der Approximation der interpolierten Funktion durch die Polyederfläche (Kap. 5.7.2.)

Zu (1)

Diese Genauigkeit hängt von der Qualität der MSS-Bilder, ihren Bildelementgrößen und von der Qualität der Rektifizierungsvorlagen ab. Auch die Meßmethode hat einen Einfluß auf die Genauigkeit (Kap. 5.4.2.3.). Schließlich ist aber auch noch die Sorgfalt und die Ermüdung der Person entscheidend, die mit der Punktidentifizierung und -messung betraut war.

Zu (2)

Spricht man von der Genauigkeit der Interpolation, so muß man unterscheiden zwischen

- der theoretischen inneren Genauigkeit und
- der tatsächlichen Lagegenauigkeit eines interpolierten Punktes gegenüber dem entsprechenden Punkt der Rektifizierungsvorlage, besser der Richtigkeit des Ergebnisbildes.

Die Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten wird durch den Schätzfehler im zu interpolierenden Punkt ausgedrückt /Kraus, 1972/:

$$\sigma_u^2 = V_{ss} - \mathbf{c}_{ul}^T \mathbf{C}_{ll}^{-1} \mathbf{c}_{ul} \qquad (5\text{-}24)$$

σ ist von der Punktverteilung und von der Lage des interpolierten Punktes innerhalb der Paßpunkte abhängig. Dieses Fehlermaß wäre gut geeignet, um an den Verknüpfungspunkten Gewichte zu bestimmen, mit deren Hilfe die Mittelung zur Berechnung der wahrscheinlichen Vorlagekoordinaten durchgeführt wird (Kap. 5.6.2.). Wendete man diese Berechnung für die Rasterpunkte an, so könnte man auch die Genauigkeit der gesamten Umbildung überwachen. Paßpunktfreie Räume und Extrapolationsgebiete würden sich in einer Vergrößerung des Schätzfehlers bemerkbar machen. Wegen des Aufwandes des Verfahrens in der praktischen Durchführung wurde aber auf die Berechnung der Interpolationsgenauigkeit durch das Rektifizierungsprogramm verzichtet.

Die geometrische Richtigkeit des Ergebnisses kann auf diese Art jedoch nicht überwacht werden. Diesem Zweck kann nur der direkte Vergleich zwischen Rektifizierungsergebnis und Rektifizierungsvorlage dienen.

Es gibt einige Vorschläge, wie die Lagerichtigkeit überwacht werden könnte.

- Durch Wegnehmen eines Paßpunktes bei der Aufstellung der Interpolation nach kleinsten Quadraten und anschließender Interpolation dieses fehlenden Paßpunktes erhält man eine Differenz zwischen seiner gerechneten und seiner Sollage. Dieser Vorgang läuft Paßpunkt für Paßpunkt ab. Aus den so erhaltenen Differenzen läßt sich ein Fehlermaß ableiten, welches eine Aussage über die Richtigkeit des Ergebnisses liefern soll /Larsson,198o/. Abgesehen vom großen Rechenaufwand erscheint diese Methode jedoch nicht repräsentativ

für die Richtigkeit des Ergebnisses, da in paßpunktlosen Räumen, die besonders fehleranfällig sind, keine Kontrolle erfolgt. Außerdem erscheint das Weglassen von Paßpunkten nur dann wenig problematisch, wenn genügend Punkte vorhanden sind und eine gute Punktverteilung gegeben ist. Normalerweise sind solch optimale Verhältnisse nur selten zu finden, sodaß diese Art der Kontrolle nicht zweckmäßig erscheint.

- Ein anderer Vorschlag verlangt eine wesentlich größere Anzahl von Paßpunkten als schließlich für die Interpolation verwendet wird. Die nicht beteiligten Punkte dienen der Genauigkeitskontrolle. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß der Genauigkeitsuntersuchung und der Umbildung dieselben Paßpunkte zugrunde liegen. Bei geringem Rechenaufwand und vielen, gleichmäßg verteilten Kontrollpunkten wird eine für das rektifizierte Bild repräsentative Paßgenauigkeitsangabe erhalten. In der Praxis ist die Paßpunktsuche aber sehr aufwendig. Daher wird es unmöglich, mit vertretbarem Aufwand eine ausreichende Anzahl zusätzlicher, nur für die Genauigkeitsuntersuchung gedachter Paßpunkte auszuwählen.

Aus obigen Überlegungen folgt, daß es im praktischen Einsatz normalerweise nicht möglich ist, ein Maß für die Richtigkeit des Ergebnisbildes zu erhalten, bevor noch die Umbildung durchgeführt worden ist. Die endgültige Prüfung und Genauigkeitsuntersuchung wird daher durch Vergleich des rektifizierten Ergebnisses mit der Rektifizierungsvorlage erfolgen. Eine Abschätzung der Ergebnisgenauigkeit sollte jedoch immer durchgeführt werden. Die Erfahrung zeigt nämlich, daß vom Benutzer der rektifizierten Bilder durch extreme Vergrößerung nicht selten Aussagen in geometrischen Größenbereichen getroffen werden, die jedoch durch die Rektifizierungsgenauigkeit nicht mehr garantiert sind. Für eine solche Angabe können die Filterbeträge verwendet werden. Sie symbolisieren die Ungenauigkeiten des MSS-Bildes, der Vorlage sowie der Messung, aber auch Einflüsse aus fehlerhaften Kovarianzfunktionen und stellen damit den mindestens zu erwartenden Fehler dar.

5.10. Ausgeführte Projekte

5.10.1. Projektliste

Die folgende Liste (Tab. 5-44) soll einen Überblick über die Projekte geben, bei denen das Rektifizierungsprogramm zur Anwendung gelangte. Es sind dies

keine theoretischen Untersuchungen sondern für die Praxis durchgeführte Arbeiten, bei denen neben dem geometrisch korrekten Ergebnis auch noch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens von Bedeutung war.

Zu sehen ist, wie wichtig die Möglichkeit der Mosaikherstellung aus mehreren Streifen ist. Denn oft konnte nur mit Mosaiken das Interessensgebiet in der gewünschten Bodenauflösung gedeckt werden. In vielen Fällen bildete die Rektifizierung den Vorverarbeitungsschritt für eine multitemporale Klassifizierung. Besonders bei Stadtklimauntersuchungen wurden die Interpretationsresultate aus zu unterschiedlichen Tageszeiten aufgenommenen Bilddaten gewonnen.

5.10.2. Projekt "OBERHAUSEN" (Abb. 5-45, 5-46)

Aus der Reihe der Arbeiten soll stellvertretend für die übrigen das Projekt "Oberhausen" herausgegriffen und die charakteristischen Daten kurz besprochen werden. Es entstand in Zusammenarbeit mit der Firma SPACETEC, Wien. Die Rechenarbeiten wurden am interuniversitären Rechenzentrum der Technischen Universität Wien ausgeführt. Die Rechenanlage war ein CDC-Cyber 74 Computer,der aufgrund seiner internen Struktur (60-bit-Worte) nicht besonders für die Bildverarbeitung (8-bit-Grauwerte) geeignet erscheint. Dieser Nachteil kam jedoch nur bei jenen Prozessen zum Tragen, bei denen auf die Bilddatenstruktur zugegriffen werden muß (=Vorverarbeitung und Nachverarbeitung der Bilddaten im Falle der digitalen Umbildung).

5.10.2.1. Aufgabenstellung und vorhandene Unterlagen

Rektifizierungsvorlage:
Karte 1:50 000 des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk (Essen) auf transparenter Filmfolie. Als Interessensgebiet war der Bereich der Gemeinde Oberhausen angeführt.

MSS-Bilder:
Drei Streifen, aufgenommen mit einem Thermal-Analog-Scanner Daedalus AADS 1250, 1 Kanal, Scannerauflösung 2.5 mrad. Die im Flugzeug analog aufgezeichneten Daten wurden im Labor mit 672 Bildelementen pro Scan und 256 Grauwertmöglichkeiten pro Bildelement digitalisiert. Die Streifen hatten 1096, 1088 und 1128 Scans. Die Bildausgabe erfolge auf dem Gerät GOBI (Kap. 2.3.3.) als Farbdiapositiv in farbcodierter Darstellung mit 16 verschiedenen Farbstufen. Die Bildelementgröße war 210 x 210 µm. Die Bilder waren nicht panoramakorrigiert und hatten einen Maßstab von ca. 1:50 000.

Tab. 5-44: Projektliste

PROJEKTNAME	Anzahl d. Streifen	Blockgröße (10^6Bld.el.)	Anzahl d. Paß-pkte	Anzahl d. Verkn.-p.	Anzahl d. Spektr.Ber.	Rektifizierungs-vorlage	Rechen-anlage +)
Digitale Rektifizierung:							
HAGEN TAG	1	0.6	60	0	1	Karte	CDC
HAGEN NACHT	1	0.6	110	0	1	1:50 000	Cyber 74
HAGEN TAG	4	2.9	350	80	1	-"-	UNIVAC
HAGEN NACHT	4	2.9	300	40	1		1180
GELSENKIRCHEN	3	1.7	160	30	1	-"-	CDC
OBERHAUSEN	3	1.3	170	40	1		Cyber 74
BIBLIS 1	1	2.3	90	0	1	Orthophoto-	UNIVAC
BIBLIS 2	1	2.5	90	0	1	karte 1:5 000	1180
BIBLIS 3	1	2.0	90	0	1		
BIBLIS 4	1	3.5	120	0	1		
BIBLIS 5	1	1.8	50	0	1		
RECKLINGHAUSEN TAG (gr.Block)	7	1.4	1 400	300	1	Karte	-"-
mit reduzierten Bilddaten:						1:50 000	
RECKLINGHAUSEN TAG	3	2.2	Verzerrungswerte		1		
GELSENKIRCHEN TAG	3	1.9	aus dem gr. Block		1		
RECKLINGHAUSEN NACHT	3	2.2	} 500	70	{ 1	-"-	-"-
GELSENKIRCHEN NACHT	3	1.9			1		
			f.Verzerrungsbestimmung als 1 Block, Rektifizierung in 2 Blöcken				
BRIXLEGG	1	1.3	100	0	11	Luftbild	PDP 1103
INNSBRUCK MORGEN	2	1.2	160	20	2	Karte	
INNSBRUCK MITTAG	2	1.2	160	20	11	1:25 000	-"-
INNSBRUCK NACHT	2	1.2	160	20	2		

STADT WIEN 1	8	16.6	950	290	11	Karte 1:10 000	CDC Cyber170/720
			f.Verzerrungsbestimmung als 1 Block, Rektifizierung in 54 Blöcken				
STADT WIEN 2	1	2.2	160	0	11	-"-	-"-
			f.Verzerrungsbestimmung als 1 Block, Rektifizierung in 7 Blöcken				
HAINBURG 1	4	~7.3	570	60	11	Orthophoto	
HAINBURG 2	3	~8.8	460	30	11	1:10 000	-"-
HAINBURG 3	3	~4.5	230	25	11		
WACHAU 600	1	0.2	40	0	1	Luftbild	UNIVAC 1180
WACHAU 610	1	0.3	40	0	1		
WACHAU 629	1	0.5	60	0	1		
WACHAU 631	1	0.3	50	0	1		
WACHAU 2620	1	0.3	40	0	1		
WACHAU 11305	1	0.2	30	0	1		
WACHAU 11355	1	0.6	70	0	1		
WACHAU 11367	1	1.0	110	0	1		
CASTROP RAUXEL TAG	2	1.2	350	20	1	Karte	-"-
CASTROP RAUXEL NACHT	2	1.2	190	30	1	1:25 000	
WACHAU NACHT	1	1.2	190	0	1	MSS-Bild	-"-
BERN	3	1.0	330	10	1	Karte 1:25 000	-"-
LANDSAT NÖ	2	5.4	130	10	1	Karte 1:200 000	-"-
Optische Rektifizierung:							
SATELLITENKARTE VON ÖSTERREICH 1:500 000 und 1:1 Mill.	20 LANDSAT-Szenen		ca.30-50 pro Szene	ca.5-10 pro Szene	4	Karte 1:500 000 (konisch.Proj.)	CDC Cyber 74

+) *Angegeben ist die Anlage, auf welcher die digitale Rektifizierung (=4. Programmteil) durchgeführt wurde. Die Berechnung der Programmteile 1 - 3 erfolgte bei allen Projekten auf einer CDC Cyber 74 bzw. Cyber 170/720.*

Tab. 5-44: Projektliste

Daraus errechnet sich anhand der Scanneraufl\u00f6sung eine Flugh\u00f6he von etwa 4 000 m.

Ergebnisbild:
Es sollte ein Mosaik, gebildet aus drei Streifen, hergestellt werden. Der Maßstab sollte 1:50 000 sein mit einer Bildelementgröße von 210 x 210 µm.

5.10.2.2. Eignung der vorhandenen Unterlagen und Angaben für eine Rektifizierung

Rektifizierungsvorlage:
Die Bodenauflösung der MSS-Bilder mit etwa 10 m entspricht damit der Genauigkeit der Karte (0.1 - 0.2 mm Zeichengenauigkeit ergibt bei einem Maßstab von 1:50 000 5-10 m Bodenauflösung). Die gewünschte Bildelementgröße von 210 µm im Ergebnis ist ebenfalls gerechtfertigt.

Geländehöhen:
Ein Blick auf die Höhenkoten im Gemeindegebiet zeigt, daß die Geländehöhe von SW bis NO auf einer Entfernung von cirka 5 km um etwa 30 m gleichmäßig ansteigt. Der Höhenunterschied innerhalb eines Scans beträgt max. 10 m. Daraus folgt (nach Kap. 3.7.):

$$\Delta y = \frac{-10 \cdot 336}{4000} \simeq 0.8 \text{ Bildelemente max.}$$

Der Einfluß der Geländehöhe auf die Verzerrung kann daher vernachlässigt werden.

Panoramaverzerrung:
Der Öffnungswinkel des Scanners ist ungefähr 77^{o}. Damit ergibt sich (nach Kap. 3.8.) am Streifenrand ein Fehler von 60 Bildelementen. Die Bodenauflösung am Rand des Streifens ist um etwa das 1.6-fache gegenüber der Streifenmitte schlechter. Es war daher zu empfehlen, den von der Panoramakorrektur herrührenden systematischen Anteil in den gemessenen Koordinaten im 1. Programmteil zu beseitigen (Kap. 5.5.3.).

Andere Einflüsse:
Beim Betrachten der Bilder viel auf, daß in einem der MSS-Streifen eine Unstetigkeitsstelle quer über das Bild verläuft, deren Ursache in einer plötzlichen Störung der Fluglängsneigung ϕ gelegen sein dürfte. Man mußte erwarten, daß in diesem Bereich die Rektifizierung nicht zufriedenstellend durchgeführt werden kann. Das übrige Bildmaterial wies keine auffälligen Störungen auf.

Qualität der Wiedergabe der verzerrten MSS-Bilder:
Die farbkodierte Darstellung mit nur 16 Stufen zeigte große Flächenbildungen einer Farbe. Besonders in Gebieten außerhalb der Stadt war daher mit Schwierigkeiten bei der Punktauswahl zu rechnen.

5.10.2.3. Punktmessung und Berechnung

Die Punkte wurden auf einem Leuchttisch ausgewählt, wobei sie auf einer über die Karte bzw. MSS-Bild gelegten Folie pikiert und numeriert wurden. Diese Methode war gegenüber der direkten Auswahl und Messung von Vorteil, da die Tendenz zur Flächenbildung mit gleicher Farbe viele wichtige Details verschluckte und einen Überblick über einen größeren Bereich notwendig war. In einem späteren Projekt wurde auf eine 32-stufige Farbdarstellung übergegangen, die für das Erkennen von Details bereits ausreichend war. Die Messung der Folien erfolgte für Vorlage und MSS-Bild gleichzeitig auf dem Stereokomparator Wild STK1.

Insgesamt wurden ausgewählt:

Paßpunkte:	im Streifen 1:	52
	" " 2:	85
	" " 3:	56
Verknüpfungspunkte:	zwischen Streifen 1 & 2:	17
	" " 2 & 3:	21

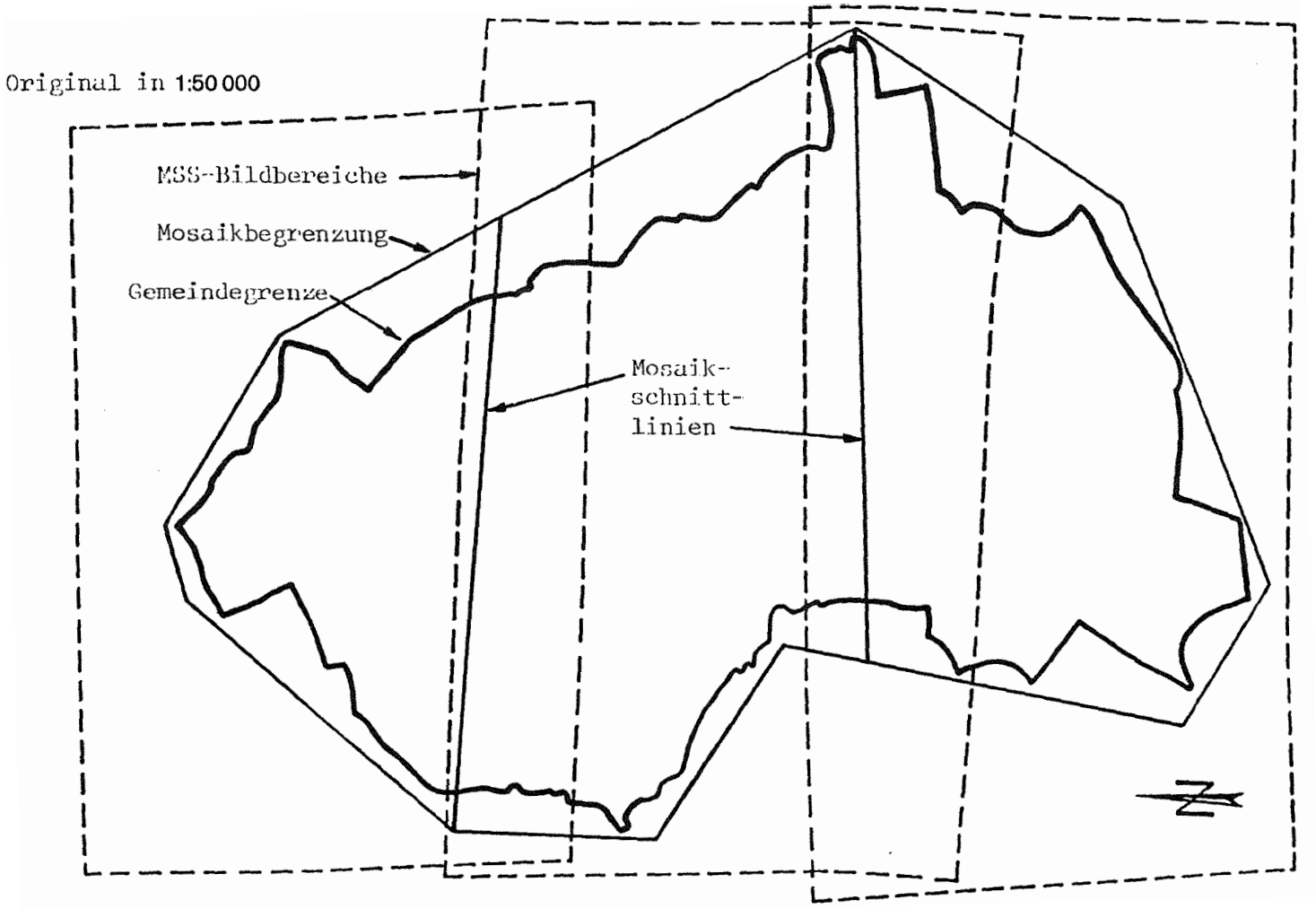
Berechnung:
Bei der Angabe des Rechenaufwandes wird nicht nur die reine Rechenzeit (Central-processor-time = CPT) angeführt, sondern auch die Ein-Ausgabe-Zeit (Input-Output-Time = IOT). Diese ist besonders bei jenen Programmen, die an der eigentlichen digitalen Umbildung beteiligt sind, von Interesse.

Der erste Programmteil benötigte 4 sec. CPT und 12 sec. IOT.

Der zweite Programmteil führte nur eine einzige Anpaßiteration pro Streifenüberlappungsbereich durch. Die Verknüpfungspunkte konnten einander damit im Mittel auf ca. 10 µm angepaßt werden. Dieser Programmteil benötigte 19 sec. CPT und 18 sec. IOT.

Für den dritten Programmteil wurde eine Rasterweite von 16 Bildelementen gewählt. Damit ergaben sich insgesamt 6586 Rasterpunkte, die in 50 sec. CPT und 8 sec. IOT mit der Interpolation nach kleinsten Quadraten berechnet werden konnten.

THERMAL SCANNERBILDMOSAIK DER STADT OBERHAUSEN (N.-W.)



Gemeindegebiet Oberhausen – Lage der Scannerstreifen und Bildbegrenzung des Mosaiks.

Abb. 5-45

REKTIFIZIERTES MOSAIK



Maßstab ca. 1 : 92 000

Originalmaßstab 1 : 50 000 ; deckungsgleich mit der Karte 1 : 50 000 des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk

Abb. 5-46

Die Bilddatenvorverarbeitung (Umwandlung von externem in internes Format) benötigte 27 CPT und 700 IOT sec., die digitale Umbildung 147 CPT und 432 IOT sec. und die Bilddatennachverarbeitung (Umwandlung von internem in externes Format) 26 CPT und 200 IOT sec.

Das Ergebnismosaik war 1380 x 948 Bildelemente groß. Der Vergleich mit der Rektifizierungsvorlage ergab sehr gute Paßgenauigkeit außer, wie zu erwarten war, im Bereich der Bildstörung. Auch die einzelnen Mosaikteile passen sehr gut aneinander, sodaß die Mosaikschnittlinien kaum bemerkt werden können (Abb. 5-46).

Wie die oben angeführten Rechenzeiten zeigen, sind vor allem der 2. und 3. Programmteil eher rechenaufwendig, besonders dann, wenn zur Streifenanpassung mehrere Iterationen notwendig sind. Den größten Anteil an der Gesamtrechnezeit haben jene Programmteile, die mit den Bilddatenoperationen befaßt sind. Die Ein-Ausgabezeiten der Bilddaten sind wesentlich größer als die Rechenzeiten.

6. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die Grundlagen der MSS-Aufzeichnungstechnik besprochen und auch die Ursachen der Geometriefehler in den MSS-Bildern zu erklären versucht. Es gibt keine Methode, mit der es möglich wäre, solche Bilder exakt zu entzerren. Sowohl parametrische als auch unparametrische Methoden beruhen letzlich auf dem Vergleich von geometrisch richtiger Vorlage und MSS-Bild.

Die MSS-Bild-Entzerrung ist daher nicht vergleichbar mit der Herstellung von Orthophotos aus konventionellen Kameraaufnahmen. Wegen der in der Photographie geltenden Abbildungsgesetze der Zentralprojektion kann unter Zuhilfenahme der Geländeinformation und einigen Paßpunkten das geometrisch richtige Produkt erzeugt werden. Photographische Meßaufnahmen dienen daher in erster Linie der geometrischen Auswertung (z.B. Herstellung von topographischen Karten, etc.). Um eine vernünftige Entzerrung eines MSS-Bildes erreichen zu können, muß eine sehr große Anzahl von Paßpunkten bekannt sein, die nur durch direkten Vergleich mit einer bereits vorhandenen, geometrisch richtigen Rektifizierungsvorlage erhalten werden kann. Deshalb sind Scanneraufnahmen für eine geometrische Auswertung nicht besonders geeignet. Ihr Anwendungsbereich liegt hauptsächlich auf dem Gebiete der Bildinterpretation.

Das in dieser Arbeit näher beschriebene Verfahren stellt nur eine Möglichkeit einer Rektifizierung dar. Es erfüllt den Zweck der in einem großen Teil in der Praxis auftretenden Fälle. Da der unparametrische Ansatz keine Berücksichtigung der Geländehöhe erlaubt, kann nur mit solchen Aufnahmen ein befriedigendes Ergebnis erreicht werden, bei denen der Einfluß des Geländes auf die Bildverzerrung von untergeordneter Bedeutung ist oder durch die Paßpunkte erfaßt werden kann. Es sind daher vor der Anwendung dieses Verfahrens die Verzerrungseinflüsse und ihre Erfaßbarkeit abzuschätzen (Kap. 3.).

Die Beschreibung des Entzerrungsverfahrens ist auf praktische Anwendung hin ausgerichtet. Daher wurden eine Reihe von Problemen besprochen, welche bei einer Rektifizierung auftreten und deren Berücksichtigung für eine erfolgreiche Lösung notwendig ist. Die angeführte Liste der mit den besprochenen Verfahren rektifizierten Projekte zeigt, daß diese Methode nicht nur aus theoretischer Sicht von Interesse ist. Es war vom Standpunkt des praktischen Anwenders her notwendig, sich mit diesem Problem näher zu beschäftigen. Auch in Zukunft wird dieses Verfahren für eine Reihe von Fällen seine Berechtigung haben, obschon es eine parametrische Lösung nicht immer ersetzen wird können, besonders wenn Rektifizierungen im schwierigen Gelände durchgeführt werden sollen und wenn es durch immer besser werdende Navigationssysteme möglich sein wird, Flugparameter zu berücksichtigen.

LITERATUR: [1)]

ALBERTZ,J./KREILING,W., Photogrammetrisches Taschenbuch, 3. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1980.

BÄHR,H.-P., Interpolation and Filtering of Erts-Imagery; BuL 43, S 261-266, 1975.

BÄHR,H.-P., Analyse der Geometrie auf Photodetektoren abgetasteter Aufnahmen von Erderkundungssatelliten; Wissenschaftl. Arbeiten der Lehrstühle f. Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie der Techn. Universität Hannover, Nr.71, Hannover, 1976a.

BÄHR,H.-P., Geometrische Modelle für Abtasteraufzeichnungen von Erderkundungssatelliten; BuL 44, S 198-202, 1976b.

BÄHR,H.-P., Wechselwirkung von Photogrammetrie und Fernerkundung durch Anwendung digitaler Bildverarbeitung; Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr.97, Hannover, 1979.

BERNSTEIN,R., Digital Image Processing of Earth Observation Sensor Data; IBM Journal Vol.20/1, S 40-57, 1976.

BERNSTEIN,R./FERNEYHOUGH,D.G., Digital Image Processing; PE 41, S 1465-1476, 1975.

BOSMAN,E.R./CLERICI,E./ECKHART,D./KUBIK,K., Projekt BEBLOKA, the Transformation of Points from Overlapping Images Obtained with Different Sensors; pres.paper, ISP-Kongress, Ottawa, 1972a.

BOSMAN,E.R./CLERICI,E./ECKHART,D./KUBIK,K., Projekt KAIRKA, the Transformation of Points from Infrared Line Scanner Images into the Map System; pres.paper, ISP-Kongress, Ottawa, 1972b.

BOSMAN,E.R./CLERICI,E./ECKHART,D./KUBIK,K., KARIN - A Programme System for the Mapping of Remote Sensing Information; pres.paper, ISP-Kongress, Ottawa, 1972c.

CLERICI,E./ECKHART,D./KUBIK,K., MARS - A Processing System for the Mapping of Remote Sensing Data; pres.paper, ISP-Kongress, Ottawa, 1972.

DERENYI,E.E., Planimetric Accuracy of Infrared Line Scan Imagery; Canadian Surveyor 3/28, 1974.

DERENYI,E.E./KONECNY,G., Geometry of Infrared Imagery; Canadian Surveyor 18/4, 1964.

DERENYI,E.E./KONECNY,G., Infrared Scan Geometry; PE 32, S 773-778, 1966.

[1)] Erklärung der Abkürzungen am Ende der Literaturliste

EBNER,H., A Mathematical Model for Digital Rectification of Remote Sensing Data; pres.paper, ISP-Kongress, Helsinki, 1976.

GÖPFERT,W., High-precision Scanner Imagery Rectification Using Dynamic Meshes of Digital Correlated Passpoints; pres.paper, Intern. Symposium on Image Processing, Graz, 1977.

HOFMANN,O., Geometrisches Auflösungsvermögen und Modulationsübertragungsfunktion von Photosensoren; BuL 43, S 174-181, 1975.

HOFMANN,O./HOFMANN,M./MEISSNER,D., Ein modulares, optoelektrisches, multispektrales Satellitenbild-Aufnahme-System (MOMS) von MBB; pres.paper, ISP-Kongress, Hamburg 1980.

HRUŠKA,H., Bildausgabegerät für digitale Daten - Entwicklung eines Prototyps für die Fernerkundung; Dissertation an der Techn. Universität Wien, 1980.

HRUŠKA,H./JANSA,J., GOBI - A Large Format Color Printer for Rectification and Image Mosaics; pres.paper, International Symposium on Image Processing, Graz, 1977.

JANSA,J., Geometric Rectification of Blocks of Multispectral Scanner Images; pres.paper, ISP-Kongress, Hamburg, 1980.

JANSA,J./ZIERHUT,H., Eine österreichische Satellitenbildkarte; ÖZfV 69, S 49-59, 1981.

KAGER,K., Numerische Aspekte der Interpolation nach kleinsten Quadraten; ZfV 101, S 377-384, 1976.

KONECNY,G., Metric Problems in Remote Sensing; ISP-Symposium Delft, ITC-Publications A/50, S 152-177, 1970.

KONECNY,G., Orientierungsfragen bei Streifenbildern und Aufnahmen der Infrarotabtastung; BuL 39, S 60, 1971.

KONECNY,G., Geometrical Aspects of Remote Sensing; inv.paper, ISP-Kongress, Ottawa, 1972a.

KONECNY,G., Geometrische Probleme der Fernerkundung; BuL 40, S 162-172, 1972b.

KONECNY,G., Approach and Status of Geometric Restitution for Remote Sensing Imagery; BuL 43, S 2-11, 1975.

KONECNY,G., Mathematische Modelle und Verfahren zur geometrischen Auswertung von Zeilenabtasteraufnahmen; BuL 44, S 188-197, 1976.

KONECNY,G., Methods and Possibilities of Digital Differential Rectification; PE 45, S 727-734, 1979.

KONECNY,G./SCHUHR,W., Digitale Entzerrung der Daten von Zeilenabtastern; BuL 43, S 135-143, 1975.

KRAUS,K., Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie; BuL 40, S 4-12, 1972.

KRAUS,K., Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützpunktgruppen; ZfV 98, S 146-153, 1973.

KRAUS,K., Untersuchungen zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten; ZfV 99, S 198-205, 1974.

KRAUS,K., Verschiedene Transformationen und Indikatoren zur Lokalisierung grober Datenfehler; AVN 82, S 23-34, 1975a.

KRAUS,K., Die Entzerrung von Multispektralbildern; BuL 43, s 129-134, 1975b.

KRAUS,K., Anwendungsmöglichkeiten eines digital gesteuerten Differentialumbildegerätes; pres.paper, ISP-Kongress, Helsinki, 1976.

KRAUS,K., Recent Trends in the Production of Orthophotos and Stereo-Orthophotos; Phia 36, S 1-10.

KRAUS,K./MIKHAIL,E.M., Linear Least Square Interpolation; PE 38, S 1016-1029, 1972.

KRAUS,K./WALDHÄUSL,P., Photogrammetrie; Band 1, Dümmler Verlag, Bonn, 1982.

LARSSON,J., Rectification of Digital Images for Remote Sensing Analysis; Fotogrammetriska Meddelanden, Stockholm, 1980.

LEBERL,F., Metric Properties of Imagery Produced by Side-Looking Airborne Radar and Infrared Line Scan Systems; ISP-Symposium Delft, ITC-Publications A/50, 1970.

LEBERL,F., Vorschläge zur instrumentellen Entzerrung von Abbildungen mit Seitwärtsradar (SLAR) und Infrarot-Linienabtastsystemen (IRLS); BuL 39, S 85-90, 1971.

LEBERL,F., On Line Formation with Remote Sensing Imagery; ÖZfV 60, S 43-61, 1972.

LEBERL,F., Photogrammetric Interpolation; PE 41, S 603-612, 1975.

LEBERL,F., Interpolation mittels Stützpunktgruppen unterschiedlicher statistischer Eigenschaften; ZfV 101, S 369-377, 1976.

MASRY,S.E., Rectification of IR Imagery; ISP-Kongress, Ottawa, 1972.

MASRY,S.E./GIBBONS,J.G., Distortions and Rectification of IR; PE 39, S 845-849, 1973.

MASRY,S.E./DERENYI,E.E./CRAWLEY,B.G., Photomaps from Non-Conventional Imagery; PE 42, S 497-501, 1976.

MIKHAIL,E.M./BAKER,J.R., Geometric Aspects in Digital Analysis of Multispectral Scanner Data; ASP-Meeting, March 1973.

MIKHAIL,E.M./BAKER,J.R./MARKO,G.W., Analysis of Digital Multispectral Scanner Data; BuL 43, S 22-27, 1975.

MORITZ,H., Eine allgemeine Theorie der Verarbeitung von Schweremessungen nach kleinsten Quadraten; DGK, Reihe A/67, 1970.

MORITZ,H., Neue Ausgleichs- und Prädiktionsverfahren; ZfV 98, S 137-146, 1973.

OTEPKA,G., Practical Experience in the Rectification of MSS-Images; pres.paper, ISP-Kongress, Helsinki, 1976.

SCHUHR,W., Digitale Entzerrung multispektraler Bilder; BuL 44, S 202-208, 1976.

SOLAR,D./GSANDTNER,A., Entzerrung von Multispektralbildern mit Hilfe des Hybridrechners; Arbeitsbericht des Hybridrechenzentrums der Techn. Universität Wien, 1975.

STEWARDSON,P.B., The Wild Avioplan OR1 Orthophoto System; pres.paper, ISP-Kongress, Helsinki, 1976.

STOLITZKA,G.,Rektifikation von multispektralen Scanneraufnahmen; Proceedings of IUFRO World Congress, Remote Sensing in Forestry, S 137-146, Oslo, 1976.

TAYLOR,J.I., Rectification Equations for Infrared Line Scan Imagery; ISP-Symposium Delft, ITC-Publications A/50, 1970.

THOMPSON,L.L., Remote Sensing Using Solid-State Array Technology; PE 45, S 47-55, 1979.

VOZIKIS,E., Differential Rectification of Oblique Photographs of Plane Objects; Phia 35, S 81-91, 1979.

WILLIAMSON,A.N., Corrected Landsat Images Using a Small Computer; PE 43, S 1153-1159, 1977.

Im Literaturverzeichnis verwendete Abkürzungen:

ASP	American Society of Photogrammetry
ISP	International Society of Photogrammetry
AVN	Allgemeine Vermessungsnachrichten; Wichmann Verlag, Karlsruhe.
BuL	Bildmessung und Luftbildwesen; Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
DGK	Deutsche geodätische Kommision bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.
PE	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing; Journal of the American Society of Photogrammetry.
Phia	Photogrammetria; Journal of the International Society of Photogrammetry, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
ÖZfV	Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie; Verlag Österreichischer Verein für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Wien.
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen; Deutscher Verein für Vermessungswesen, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.

Lebenslauf:

1950 04 13	geboren in Wien Eltern: Josef Jansa Katharina Jansa, geb. Karl
1956 - 1960	Besuch der Volksschule in Krems a.d. Donau (Langenloiserstraße)
1960 - 1968	Besuch des Bundesrealgymnasiums in Krems a.d. Donau (Piaristengasse) und
1968	Ablegung der Reifeprüfung
1968	Beginn des Studiums des Vermessungswesens an der Technischen Universität Wien
1973	I. Staatsprüfung
1975	II. Staatsprüfung
1976 04 01	Beginn der Tätigkeit als Vertragsassistent am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien
1980 06 01	Beginn der Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien

Bisher erschienen:

Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 197o - 1973, Dezember 1973.

Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendung im Vermessungswesen, 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English, Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.

Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1973 - 1974, September 1974.

Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.

Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.

Heft 6 F. REICHHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von + 30° bis + 60°, Oktober 1975.

Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.

Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.

Heft 9 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie und Reproduktionstechnik, W.PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.

Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC-100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik, Wien, Mai 1976.

Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1974 - 1976, November 1976.

Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1977.

Heft 13 Veröffentlichung des Instituts für Photogrammetrie anläßlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.

Heft 14 L.MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.

Heft 15 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung anläßlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Barvir, Wien, Januar 1979.

Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1976 - 1979, Wien, November 1979.

Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.

Heft 18 Veröffentlichung des Instituts für Allgemeine Geodäsie anläßlich des 75. Geburtstages von Prof. Dr. Friedrich Hauer: Die Höhe des Großglockners. Wien 1981.

Heft 19 H.KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.

Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980 (im Druck).

Heft 21 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie anläßlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie (im Druck).

Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. Wien, Mai 1982.

Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern - Kartierung von Vegetationsschäden in Brixlegg, Schilfkartierung Neusiedler See, Wien, November 1982.