

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C:

Dissertationen

Heft Nr. 239

Franz LEBERL

Satellitenradargrammetrie

München 1978

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

ISBN 3 7696 9294 2

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

Marstallplatz 8, D-8000 München 22

Habilitationsschrift

© 1978 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

Druck: Gebr. Brunner, 8151 Wangau

ISBN 3 7696 9294 2

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	EINLEITUNG	5
1.1.	Hintergrund	5
1.2.	Zielstellung	6
1.3.	Beschränkung der Zielstellung	7
1.4.	Strategie der Untersuchung	7
2.	SATELLITENRADAR - EINIGE BEGRIFFE	9
2.1.	Allgemeines	9
2.2.	Auflösung	9
2.3.	Wellenlänge	10
2.4.	Erhebungswinkel und Gesichtsfeld	11
2.5.	Umlaufbahn, Planetenumdrehung und Abbildungskegel	14
3.	GEOMETRIE DER EINZELNEN SATELLITENRADARSCHRÄGAUFNAHME	16
3.1.	Einleitung	16
3.2.	Radarbildkoordinaten und Größen im Objektsraum (innere Orientierung)	18
3.3.	Projektions- und Abbildungsgleichungen in Funktion der Sensorposition und des Geschwindigkeitsvektors	25
3.4.	Projektionsgleichungen in Funktion der Parameter der Satellitenumlaufbahn ...	28
3.5.	Algorithmus zur Radarprojektion auf eine Kugel	30
3.6.	Sonderfall der Radarprojektion auf eine Kugel - kreisförmige Umlaufbahn, Abbildung in einer Ebene	31
3.7.	Algorithmus zur Berechnung der Radarabtastlinie	33
3.8.	Unterschiede zwischen dem realen und synthetischen Radarstrahl	34
3.9.	Projektionseigenschaften von Satellitenradarbildern	36
3.10.	Beispiel zur Berechnung der Radarabtastlinie	42
3.11.	Verdrehung der Bildlinien in überlappenden Radaraufnahmen	43
3.12.	Übersicht über Verfahren der Einzelbildauswertung	44
3.13.	Zusammenfassung	47
4.	THEORETISCHE ANALYSE DES SATELLITENRADAR-STEREOMODELLS	48
4.1.	Einleitung	48
4.2.	Schnittpunkt zweier radargrammetrischer Projektionsstrahlen	48
4.3.	Stereoradargrammetrische Konfigurationen	51
4.4.	Relative Orientierung	52
4.5.	Formeln für die Verformungen des Stereomodelles	54
4.6.	Genauigkeit und Fehler der Modellkoordinaten	57
4.7.	Metrische versus physiologische Gesichtspunkte für Stereoradar	61
4.8.	Zusammenfassung	63
5.	RADARSTEREO- UND EXTERNE HÖHENDATEN	64
5.1.	Einleitung	64
5.2.	Statistisches Modell der Höhenmessungen	64
5.3.	Lineare Prädiktion	66
5.4.	Kovarianzbeziehungen	67

	Seite
5.5. Trend	69
5.6. Andere Methoden zur Verschmelzung von Höhen verschiedener statistischer Eigenschaften	70
5.7. Numerische Untersuchung - Computer-Generierung von Höhenmeßdaten	71
5.8. Numerische Untersuchung - Ergebnisse	72
5.9. Zusammenfassung	75
6. RADARGRAMMETRISCHE MONDKARTIERUNG MITTELS APOLLO-17-RADARSCHRÄGAUFNAHMEN	76
6.1. Einleitung	76
6.2. Beschreibung des Apollo 17 ALSE-Radaraufnahmesystems	76
6.3. Bildmaterial und Messungen	78
6.4. Vorverarbeitung der Messungen	80
6.5. Auswertung der Einzelaufnahmen	82
6.6. Stereoauswertung	86
6.7. Zusammenfassung	91
7. THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN ZUR RADARBLOCKAUSGLEICHUNG	92
7.1. Einleitung	92
7.2. Interne und externe Blockausgleichung	92
7.3. Simultane Ausgleichung unabhängiger Stereomodelle	101
7.4. Simultane Ausgleichung ursprünglicher Bildstreifen	105
7.5. Zusammenfassung	107
8. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR RADARBLOCKAUSGLEICHUNG	108
8.1. Einleitung	108
8.2. Simultane und sequentielle planimetrische Radarblockausgleichung	108
8.3. Planimetrische Ausgleichung des Radarblocks 'PRORADAM'	115
8.4. Planimetrische Ausgleichung des Radarblocks 'WEST-VIRGINIA'	117
8.5. Diskussion und Zusammenfassung	120
9. RADARGRAMMETRISCHE KARTIERUNG VON MEEREREISES	122
9.1. Einleitung	122
9.2. Methode der Eiskartierung	122
9.3. Genauigkeit der radargrammetrischen Mikroanalyse der Eistrift	125
9.4. Beispiel der Messung von Meereseistrift mittels Radar	128
9.5. SEASAT	131
9.6. Zusammenfassung	132
10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	133
10.1. Zusammenfassung	133
10.2. Ausblick	134
APPENDIX A BILDFORMUNG IM SEITWÄRTSRADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR	136
APPENDIX B SCHNITT EINER GERADEN MIT EINEM DREIACHSIGEN ELLIPSOID	142
APPENDIX C BERECHNUNG DER GRÖSSE λ IN GLEICHUNG 3.34	145
REFERENZEN (Nicht radargrammetrisch)	147
BIBLIOGRAPHIE ÜBER RADARGRAMMETRIE (Stand Mai 1976)	149
Zusammenfassung - Abstract	155
Dank	156

1. EINLEITUNG

1.1. HINTERGRUND

Durch eine Anzahl von Jahren hin wurde die Forderung diskutiert, daß ein abbildendes Seitwärts-Radar-System (SLR Side-Looking-Radar) von einem Satelliten aus operieren und somit Radaraufnahmen der Erde, des Mondes oder anderer Himmelskörper erzeugen könnte (Moore^x, 1965; Ellermaier und Simonett^x, 1965). Diese Forderung erhielt bis in die jüngste Vergangenheit nicht genügend Unterstützung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft, um die tatsächliche Entwicklung von Satellitenradar zu rechtfertigen.

Für eine Periode von einigen Jahren bestand also das Problem besonders eines Erd-umkreisenden Radarsatelliten nicht sosehr in technologischen Schwierigkeiten, als vielmehr in dem deutlichen Beweis des wissenschaftlichen Nutzens eines solchen Projektes. Derartige Beweise konnten für ein SLR-System zur Abbildung des Mondes erbracht werden. Daher wurde der Mond der erste Himmelskörper, von dem Satellitenaufnahmen erzeugt wurden (Figur 1.1). Dies geschah im Jahre 1972 im Rahmen des Apollo Lunar Sounder Experiments (ALSE) während der Mondumkreisungen der Apollo 17 Kommandosonde (Phillips^x u.a., 1973).

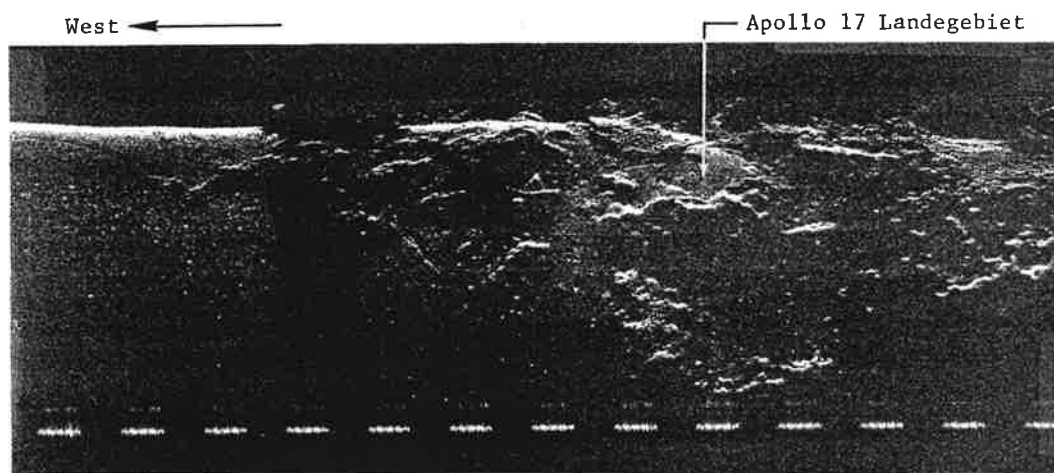
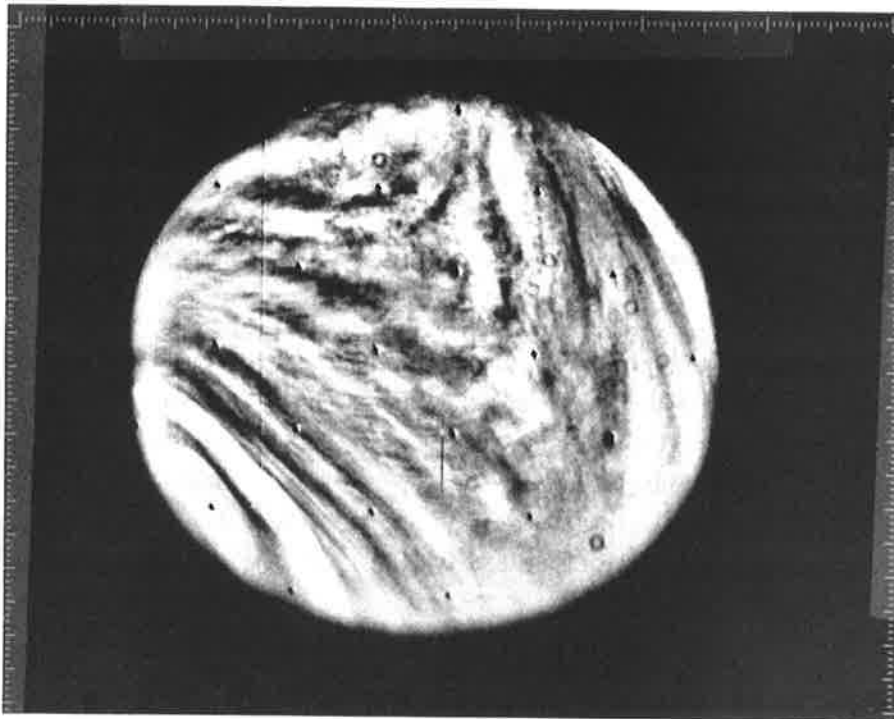


Fig.1.1: Beispiel einer Satellitenradarschrägaufnahme vom Mond, wie sie während der Apollo 17 Mission im Rahmen des Apollo Lunar Sounder Experiments (ALSE) erzeugt wurde; Radarwellenlänge 2 m (vgl. Abschnitt 6., Figur 6.1b).

Seit der Entwicklung des ALSE-Satellitenradars häufte sich wissenschaftliches Material, das den großen Nutzen beweist, der von einem Erd-umkreisenden Radar-Satelliten erwartet werden kann, besonders in ozeanographischen und meeresglaziologischen Problemstellungen. Daher kam es in den Vereinigten Staaten zu dem Beschluß der National Aeronautics and Space Administration (NASA), Radar für einen Erdsatelliten zu entwickeln. Seitwärts-Radarbilder der Erde werden also im Rahmen des ozeanographischen Satellitenprojektes SEASAT-A ab Mai 1978 erzeugt werden (McCandless^x, 1975). Ein wesentliches radargrammetrisches Element wird in der meeresglaziologischen Anwendung der Daten zur Untersuchung der polaren Eisdynamik zu erwarten sein. Möglicherweise werden Radaraufnahmen auch im Rahmen einiger geowissenschaftlicher Missionen an Bord der Space-Shuttle ab 1980 erzeugt werden (Cohen^x u.a., 1975).

^xNichtradargrammetrische Referenzen sind mit einem Stern (x) gekennzeichnet und in einer separaten nichtradargrammetrischen Referenzliste angeführt.



Figur 1.2: Vidikonbildmosaik des wolkenbedeckten Planeten Venus, aufgenommen aus der Raumsonde Mariner 10 im Jahre 1973 (Jet Prop.Lab.)

Die größte wissenschaftliche Herausforderung unter allen geplanten oder vorgeschlagenen Satellitenradarprojekten ergibt sich aber aus der Absicht, die Oberfläche des Planeten Venus zu kartieren. Die vorläufige Planung zielt auf eine Mission etwa im Jahre 1983 ab (Rose und Friedman^x, 1974), und vorbereitende Untersuchungen sind im Gange (Brown^x u.a., 1972; Martin Marietta^x, 1974). Da der Planet Venus ständig und gänzlich wolkenbedeckt ist (Figur 1.2), ist Radar das einzige Verfahren zur Kartierung der Oberfläche. Radargrammetrie wird daher ein tragendes Element in einer Venus Orbital Imaging Radar (VOIR) Mission. Die radargrammetrische Herausforderung des VOIR-Projektes besteht in der Absicht, den gesamten Planeten auf überlappenden Radarbildstreifen abzubilden, die sich von Pol zu Pol erstrecken (Saunders^x u.a., 1973). Man kann also erwarten, daß eine radargrammetrische Blockausgleichung möglich und notwendig sein wird, die auf den Bildern, den Daten über die Umlaufbahn des Raumschiffes und auf unabhängigen Altimetriedaten beruhen soll.

1.2. ZIELSTELLUNG

Gegenwärtig konzentrieren sich die NASA-Studien zur Vorbereitung zukünftiger Satellitenradarprojekte auf die Erde und den Planeten Venus. Die vorbereitenden Untersuchungen hatten in der Vergangenheit die Tendenz, radargrammetrische Gesichtspunkte zu übersehen oder nur oberflächlich zu streifen. Radargrammetrie wird hier als jenes Fach verstanden, in dem geometrische Information über ein Objekt auf Grund von Messungen in Radaraufnahmen gewonnen wird. Radargrammetrische Gesichtspunkte sind vor allem in den meeresglaziologischen Anwendungen eines Erdsatellitenradars und für eine VOIR-Mission sehr bedeutend. Die vorliegende Untersuchung hat daher das allgemeine Ziel, einen ersten Eindruck vom radargrammetrischen Potential von Satellitenradarbildern zu vermitteln und jene Information bereitzustellen, die für die Projektplanung von Bedeutung ist.

Diese allgemeine Zielstellung wird durch die Behandlung einer Reihe von individuellen Problemstellungen verfolgt, die mittels theoretischer Analyse, Computersimulation und Experimenten mit

echten Radardaten untersucht werden. Die Arbeit richtet sich nicht auf ein bestimmtes Satellitenprojekt. Statt dessen wird versucht, die Problemstellungen in solcher Allgemeinheit zu behandeln, daß die Ergebnisse für Satellitenradar generell relevant sind.

1.3. BESCHRÄNKUNG DER ZIELSTELLUNG

Die vorliegende Untersuchung ist im wesentlichen theoretisch, da Satellitenradaraufnahmen praktisch nicht bestehen, mit der Ausnahme der ALSE-Daten der Apollo-Mission zum Mond. Diese Bilder sind nicht repräsentativ für die Bildqualität und -geometrie, die gegenwärtig erhalten werden könnten. Einige der Verallgemeinerungen von Ergebnissen, die mittels ALSE- und Flugzeugradar erhalten werden, sind daher spekulativ.

Nicht alle bearbeiteten radargrammetrischen Problemstellungen können erschöpfend behandelt werden: dies würde einen Arbeitsaufwand erfordern vergleichbar jenem, der insgesamt bisher in der Photogrammetrie erbracht wurde. Statt dessen wird darauf abgezielt, einen ersten Eindruck über das radargrammetrische Potential von Satellitenradar in verschiedenen Anwendungen zu gewinnen, mit offensichtlichen Beschränkungen in Detailfragen.

1.4. STRATEGIE DER UNTERSUCHUNG

Die vorliegende Untersuchung richtet sich auf drei Problemgebiete: das Radareinzelbild, das einzelne Radarstereomodell und den Radarbildverband; die Behandlung dieser radargrammetrischen Grundeinheiten ist sequentiell. Dies ermöglicht das Fortschreiten vom Einfachen zum Komplexen und den Aufbau einer hierarchischen Struktur radargrammetrischer Konzepte.

Nach einer einführenden Analyse einiger grundlegender Satellitenradarbegriffe wird das Radareinzelbild behandelt. Im Mittelpunkt dieser Behandlung steht der Zusammenhang zwischen dem Radarbild- und Objektpunkt, im besonderen die Geometrie des Radarbildes und die momentane Radarabtastlinie (Radar-Scan Line).

Die Untersuchung der Geometrie des Radareinzelbildes kann auf vorhergehenden Arbeiten über Flugzeugradar mit realer Apertur aufbauen. Für eine Reihe grundlegender Begriffe und Analysen (Reliefverschiebung, Radarschatten, innere und äußere Orientierung), die auch auf Satellitenradar mit synthetischer Apertur zutreffen, kann also auf diese Arbeiten verwiesen werden (Leberl, 1970b, 1971c, 1972a,b).

Das Stereomodell wird mittels des theoretischen Fehlerfortpflanzungsgesetzes analysiert. Darüberhinaus wird auf die gemeinsame Verwendung von Stereoradardaten und unabhängig gewonnenen Altimetriedaten eingegangen. Dies ist angesichts der zu erwartenden geringen absoluten, aber wesentlich besseren relativen Genauigkeit von Stereoradar von großer Relevanz.

Die Behandlung des Radareinzelbildes und Stereomodelles wird durch Experimente mit den ALSE-Radaraufnahmen des Mondes ergänzt. Diese bisher einzigen Satellitenradarbilder erlauben die Verifizierung der theoretischen Konzepte, welche vor allem im Falle von Stereoradar einen gewissen spekulativen Charakter haben.

Die Ausgleichung eines Satelliten-Radarbildverbandes ist ein sehr umfassendes Problemgebiet. Der Rahmen der vorliegenden Studie erlaubt nur eine übersichtsweise Behandlung; einige begrenzte

Teilprobleme können jedoch etwas erschöpfender bearbeitet werden. Im wesentlichen wird also versucht, die mathematische Formulierung von satellitenradargrammetrischen Blockausgleichungen anzugeben. Der Aufwand für numerische Analysen mittels Computersimulation oder Flugzeugradardaten ist jedoch nur in einigen wenigen Fällen möglich und konzentriert sich auf die sequentielle und simultane Ausgleichung unabhängiger Stereomodelle.

Eine der vordringlichsten satellitenradargrammetrischen Aufgaben auf unserem Planeten Erde wird in der Vermessung des Meereseises bestehen. Es wird erwartet, daß ab Mitte 1978 regelmäßig Karten erstellt werden können, die die Verteilung des Meereseises anzeigen und somit der Schifffahrt und Meteorologie zu Dienste stehen. Die Vordringlichkeit dieser Aufgabe, die die Problemgebiete 'Einzelbild' und 'Radarbildverband', jedoch nicht 'Stereoradar' betrifft, ist der Anlaß dafür, einen gesonderten Abschnitt der radargrammetrischen Meereseisvermessung zu widmen.

Ein weiterer Bereich von Fragestellungen wird also in dem vorliegenden Bericht in Zusammenhang gebracht. Die Untersuchung erstreckt sich vom Radareinzelbild zum Radarbildverband, und von der Anwendung auf die Mondkartierung bis zur Meereseisvermessung. Die Breite der Aufgabenstellung wird durch die Tatsache verursacht, daß die Satellitenradargrammetrie ein jungfräuliches Arbeitsgebiet ist. Somit ist es wohl gerechtfertigt, statt der erschöpfenden Behandlung von wenigen Detailfragen der Breite der Problemstellung den Vorrang zu geben.

2. SATELLITENRADAR - EINIGE BEGRIFFE

2.1. ALLGEMEINES

Ein Seitwärts-Radar System an Bord eines Satelliten muß unter Beschränkungen operieren, welche für Flugzeugradar nicht gelten. Diese Besonderheiten können von Einfluß auf radargrammetrische Überlegungen sein. Es ist daher sinnvoll, jene Charakteristiken eines Satellitenradarsystems anzuführen, die es von einem Flugzeugradar unterscheiden.

Die Systemparameter eines Raumfahrtraders sind nicht voneinander unabhängig: jeder gewählte Parameter beeinflusst die Wahl der anderen (Brown^x u.a., 1972). Im folgenden werden einige isolierte Konzepte analysiert, die von radargrammetrischer Bedeutung sind. Dies verschleiert die Komplexität der tatsächlichen Parameterfestsetzung. Ein Eindruck vom vollen Ausmaß der Schwierigkeiten wird aus den von NASA beauftragten Satellitenradarstudien erhalten (z.B.: Brown^x u.a., 1972; Friedman^x u.a., 1973; Martin-Marietta^x, 1974; Thompson^x u.a., 1974; Westinghouse^x, 1974).

Die Bildformung in einem Radarsystem mit realer Apertur wird in diesem Bericht als bekannt vorausgesetzt. Eine radargrammetrisch orientierte Beschreibung des Radars mit synthetischer Apertur findet sich im Appendix A. Der vorliegende Abschnitt behandelt nur die Fragen der Wellenlänge und des Auflösungsvermögens, der Blickwinkel und des Gesichtsfeldes, und gibt eine einführende Erklärung der radargrammetrischen Bedeutung der Satellitenumlaufbahn, Planetenumdrehung und des Abbildungskegels.

2.2. AUFLÖSUNG

Radaraufnahmen aus einem Raumfahrzeug können praktisch nicht mit realer Apertur erzeugt werden, denn das Auflösungsvermögen a_a in Richtung der Umlaufbahn ist einfach proportional der Winkelbreite γ_a des Radarimpulses und dem Abstand r des Objektes von der Antenne. Es gilt der Ausdruck:

$$a_a = \gamma_a H / \cos \Omega \quad (2.1.)$$

$$\gamma_a = 1.2 \lambda_w / L \quad (2.2.)$$

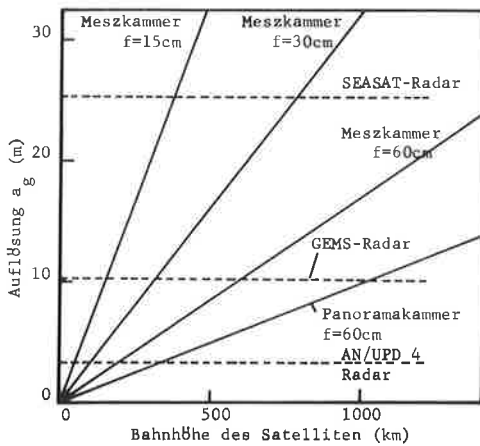
in dem λ_w die Wellenlänge der elektromagnetischen Energie, L die Länge der Antenne, H die Höhe der Umlaufbahn und Ω die Nadirdistanz (den Erhebungswinkel) der Linie Antenne - Objekt bezeichnet. Wird $\gamma_a = 0.1^\circ$ (für $\lambda_w = 3$ cm, $L = 20$ m), $H = 500$ km und $\Omega = 30^\circ$ gesetzt, so erhält man $a_a = 1000$ m. Es muß also ein Radar mit synthetischer Apertur (SAR = Synthetic Apertur Radar) in Raumfahrzeugen verwendet werden; unabhängig von der Höhe der Umlaufbahn kann mit SAR eine Auflösung von 10 m und besser erreicht werden.

Wie wird das Auflösungsvermögen eines Radarsystems definiert? Im wesentlichen ist es der minimale Abstand, den zwei punktförmige Reflektoren voneinander haben müssen, um als zwei unterscheidbare Bildpunkte abgebildet zu werden. Radaraufnahmen mit synthetischer Apertur haben wegen der hohen Kohärenz und engen Frequenzbreite der verwendeten elektromagnetischen Wellen eine körnige Textur. In vielen Fällen führt dies zur Verschlechterung der Auflösung vor allem flächenhafter Details. Um die Körnigkeit des Bildes zu verringern, wird das Konzept des "Multilooks" verwendet: ein Radarsystem mit sehr hohem geometrischem Auflösungsvermögen, z.B. $3 \times 3 \text{ m}^2$, wird dazu verwendet, um tatsächlich Aufnahmen mit einer "echten" Auflösung von z.B. $9 \times 9 \text{ m}^2$ zu erzeugen. Hierbei

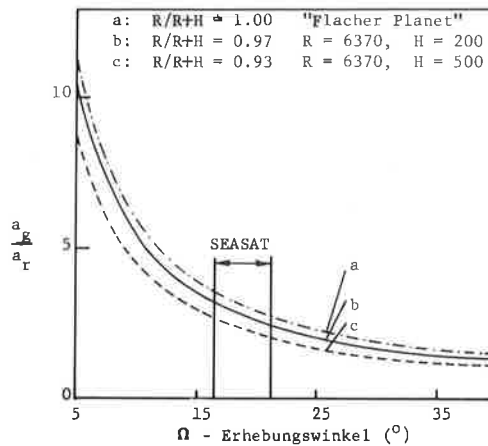
wird der Grauwert eines Bildpunktes aus dem Mittelwert der jeweils 3 x 3 umliegenden Bildelemente bestimmt, sodaß die hohen Frequenzen der Grauwerte des Bildes gefiltert und somit die Körnigkeit verringert wird. Das Multilook-Prinzip kann auch nur auf die Richtung in der Umlaufbahn ("azimutal") oder quer dazu ("Schrägdistanz") angewandt werden.

Eine von der NASA eingeladene Gruppe von Geowissenschaftlern stellte im Jahre 1973 fest, daß geowissenschaftliche Satellitenaufnahmen abhängig von der Anwendung ein Auflösungsvermögen zwischen 10 m und 100 m haben sollen (EOSPDG^X, 1973). SAR kann das 10 m-Limit und mehr erreichen, selbst aus einem Raumfahrzeug. Es ist in diesem Zusammenhang interessant festzustellen, daß laut Figur 2.1 eine photogrammetrische Meßkammer mit der langen Brennweite von 30 cm aus einer Höhe von 500 km nur etwa 17 m aufzulösen vermag.

Es ist wohlbekannt, daß das Auflösungsvermögen in Richtung der Umlaufbahn (a_r) und quer dazu (a_g) voneinander unabhängig ist. In einem optimalisierten System kann jedoch erwartet werden, daß



Figur 2.1: Auflösungsvermögen von Radarsystemen und Meßkammern



Figur 2.2: Radarauflösungsvermögen in Schrägdistanz (a_r) und auf dem Grund (a_g)

a_a und a_r gleich groß sind. Nun bezieht sich jedoch der Radarparameter a_r auf die schiefe Distanz zwischen Antenne und Objekt (Auflösung a_r ist gleich der halben Impulslänge). Die Auflösung (a_g) in der horizontalen oder Grunddistanz wird schlechter, je kleiner der Winkel Ω , und je näher also das Objekt dem Nadir liegt. Es gilt die Beziehung:

$$a_g = a_r R / ((R + H) \sin \Omega) \quad (2.3)$$

R ist der planetare Radius. Figur 2.2 zeigt Beispiele für das Verhältnis der Auflösung a_g auf dem Grund und in Schrägdistanz, a_r , in Abhängigkeit vom Nadir-(Erhebungs-)winkel Ω . Aus Figur 2.2 geht hervor, daß die Grundaufklärung a_g quer zur Umlaufbahn von SEASAT ($\Omega = 20^\circ$) etwa 25 m betragen wird ($a_r = 8$ m). Die azimutale Auflösung auf dem Grund wird aber 7 m betragen. Diese Diskrepanz wird dadurch beseitigt, daß Bildzellen in Azimutrichtung gemittelt werden. Diese Anwendung des Multilook-Prinzips dient dem Zweck, eine isotrope Auflösung der Radarbilder und - wie oben erwähnt - Verringerung der Bildkörnigkeit zu erreichen.

2.3. WELLENLÄNGE

Die für Satellitenradar gegenwärtig vorgesehenen Wellenlängen liegen zwischen dem X- (3 cm) und L- (25 cm) Band. Die untere Grenze für Wellenlängen wird durch atmosphärische Absorption, vor

allem in Wolken und Regen, bestimmt. Für längere Wellenbereiche, z.B. VHF (2 m), bestehen Beschränkungen bei terrestrischer Radiokommunikation, nicht aber bei extraterrestrischer Anwendung, z.B. am Mond und auf dem Planeten Venus.

Für die radargrammetrische Interpretation sind die Eigenschaften der verwendeten Wellen von Bedeutung. X-Band (3 cm) Radar kann wohl die Atmosphäre, jedoch kaum irgendwelche Vegetation durchdringen. L-Band (25 cm) Radar dringt unter Umständen durch leichte Vegetation, dünnes Eis usw. Für längere Wellen nimmt diese Fähigkeit zu. Daher erscheinen für längere Wellen mehr Flächen als glatt als für kurze und sind bei Verwendung des VHF-Bandes mehr spekulare Reflexionen zu erwarten als für das X-Band.

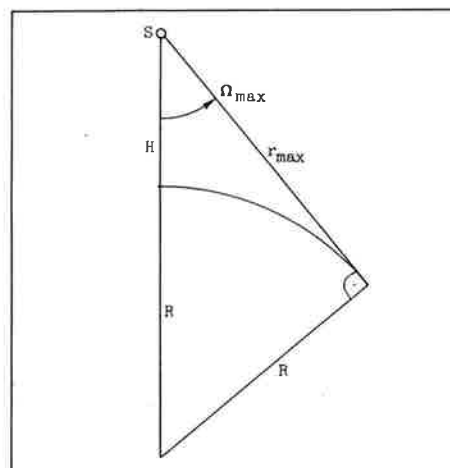
2.4. ERHEBUNGSWINKEL UND GESICHTSFELD

Die Erhebungs- oder Blickwinkel, unter denen ein Satellitenradar abbildet, werden nach oben durch die planetare Krümmung mit Radius R begrenzt. Aus Figur 2.3 folgt für den maximal möglichen Erhebungswinkel Ω_{\max} :

$$\sin \Omega_{\max} = R / (R + H) \quad (2.4)$$

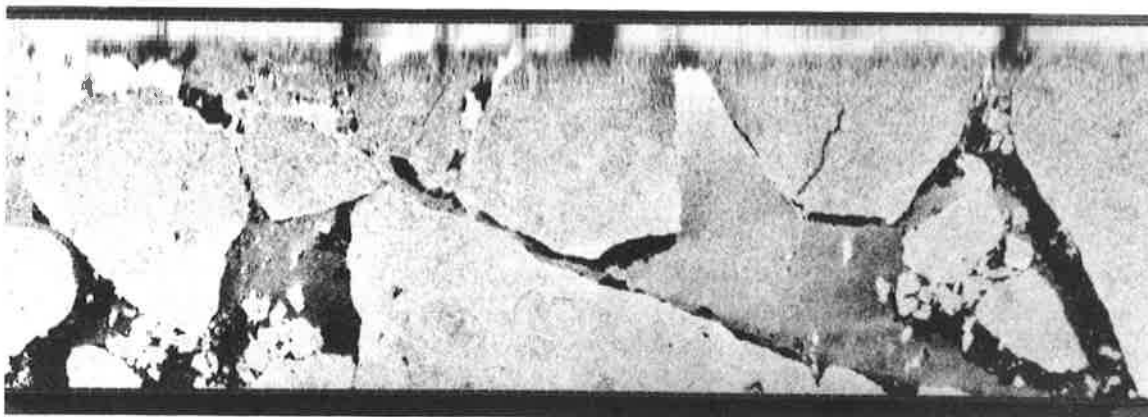
Für den minimalen Erhebungswinkel $\Omega_{\min} = 0^\circ$ erfolgt eine Radarabbildung der Nadirlinie der Umlaufbahn des Raumfahrzeuges, ähnlich der Abbildung eines photogrammetrischen Profilrekorders. Es ist aber bekannt, daß das Auflösungsvermögen a_r entlang der Nadirlinie gering ist (Leberl, 1970b), und die Interpretierbarkeit von Aufnahmen mit kleinen Erhebungswinkeln von etwa $\Omega < 5^\circ$ fast gänzlich verlorengeht. Dies wird in Figur 2.4 veranschaulicht, welche eine Radaraufnahme arktischen Meeres-eises zeigt.

Die Breite des aufzunehmenden Objektstreifens, oder das "Gesichtsfeld", wird in der Praxis durch andere Bedingungen begrenzt als die planetare Krümmung: durch die Impulsfrequenz (PRF - Pulse Repetition Frequency) und die Datenerfassungskapazität der bildformenden Kathodenstrahlröhren.



Figur 2.3: Der maximale Erhebungswinkel Ω_{\max} und Planetenradius R

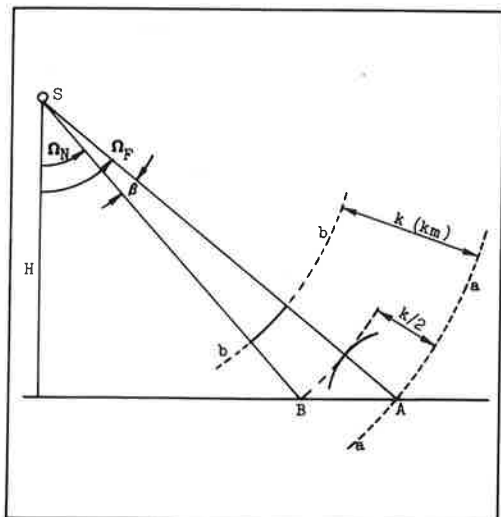
Eine gewisse minimale PRF wird benötigt, um eine bestimmte azimutale Auflösung zu erreichen ($PRF \approx 2.5 \times \text{Umlaufgeschwindigkeit des Satelliten/Länge der Antenne}$). In einem Flugzeugradar wird ein Impuls ausgesendet, nachdem der Empfang des vorhergehenden abgeschlossen ist. Somit ist immer nur ein einziger Impuls unterwegs. Wird eine realistische PRF von etwa 2000 Impulsen per Sekunde



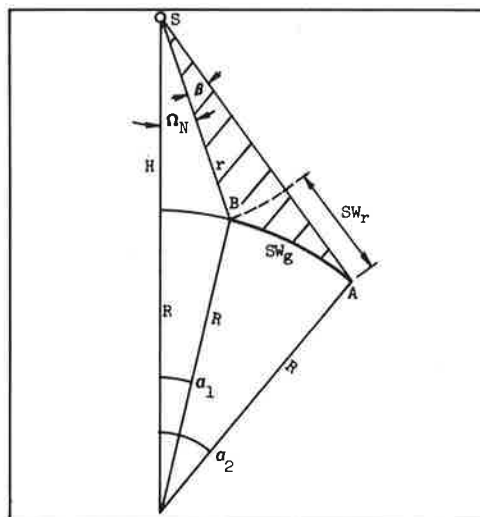
Figur 2.4: Digital entzerrte Radaraufnahme arktischen Meereseises zur Demonstration der Verschlechterung des Auflösungsvermögens in Nadirnähe (oben). 3 km

benützt, so können Objekte abgebildet werden, die bis zu 75 km von der Antenne entfernt sind. Dieser Wert ergibt sich aus der Tatsache, daß ein Impuls mit der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km/sek. den Hin- und Rückweg zu einem 75 km entfernten Objekt in 1/2000 sek. zurücklegen kann (Gesamt 150 km).

Für ein Satellitenradarsystem ist der maximale Bereich von 75 km aber zu gering. Daher werden Impulse in rascherer Folge ausgesandt, ohne auf das Echo der vorhergehenden zu warten. Zu jedem Zeitpunkt sind daher mehrere Impulse auf dem Weg zum Objekt und zurück. Um nun sicher zu stellen, daß zu einem gegebenen Zeitpunkt nur das Echo eines einzigen Impulses, nicht aber auch jenes von anderen empfangen wird, wird die Breite β des Gesichtsfeldes begrenzt.



Figur 2.5: Definitionen für den Zusammenhang zwischen Gesichtsfeld AB, Pulsabstand k, und Erhebungswinkeln.



Figur 2.6: Definitionen für den Zusammenhang zwischen Gesichtsfeld in Schrägdistanz (SW_r) und in Grunddistanz (SW_g).

Figur 2.5 illustriert, wie eine Mehrdeutigkeit in der Distanzmessung quer zur Umlaufbahn vermieden werden kann: beträgt der Abstand k zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen mehr als 150 km ($PRF = 2000$), so kann ein Schrägdistanz-Intervall $k/2$ von 75 km eindeutig abgebildet werden

(Praktisch ist dieses Intervall sogar nur 60 % des theoretischen Wertes): Echos von Punkten A und B werden nicht gleichzeitig empfangen. Fig.2.5 veranschaulicht also graphisch den Zusammenhang zwischen dem Abstand k der Impulse a und b, der Winkelbreite β der ausgesandten Energie, dem minimalen Erhebungswinkel Ω_N und der Breite AB des Gesichtsfeldes.

Figur 2.6 beschreibt den selben Zusammenhang für eine sphärische Fläche vom Radius R , mit dem Gesichtsfeld SW_g in Grunddistanz und SW_r in schiefer Distanz. Sind SW_r , $R + H$ und Ω_N bekannt, so erhält man die Winkelbreite β und Schrägdistanz r aus:

$$\cos \Omega_N = \frac{(R + H)^2 + r^2 - R^2}{2 (R + H) r} \quad (2.5a)$$

$$\cos(\Omega_N + \beta) = \frac{(R + H)^2 + (r + SW_r)^2 - R^2}{2 (R + H) (r + SW_r)} \quad (2.5b)$$

Somit kann SW_g berechnet werden:

$$SW_g = R (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.6)$$

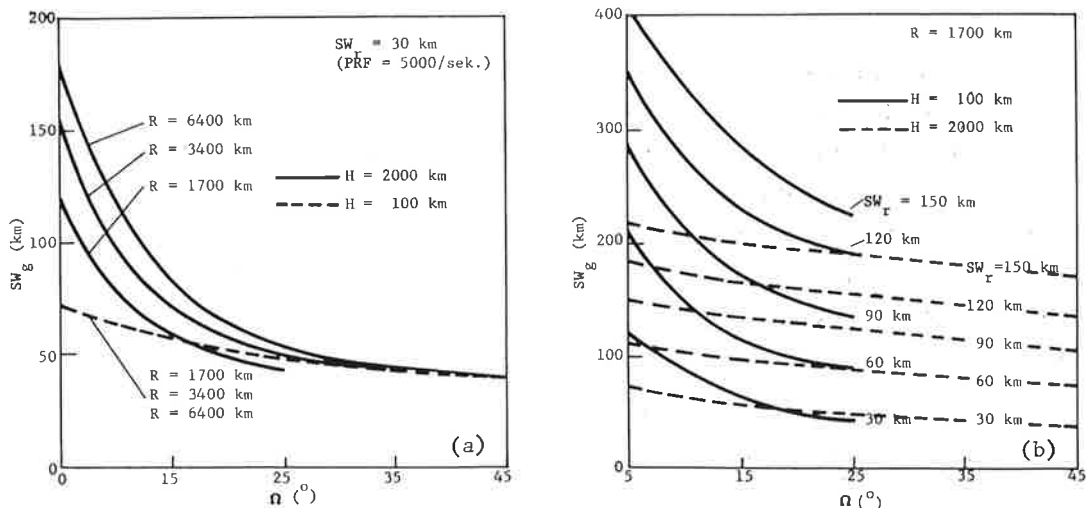
$$\sin \alpha_1 = r \sin \Omega_N / R$$

$$\sin \alpha_2 = (r + SW_r) \sin (\Omega_N + \beta) / R$$

(α_1, α_2 Hilfswinkel).

Die Beziehungen (2.5) und (2.6) führen zu den Figuren 2.7a und b. Diese zeigen, daß das Intervall SW_g der Grunddistanz wächst, falls das Schrägdistanz-Intervall SW_r größer, oder die 'Pulse Repetition Frequency' kleiner gewählt wird. SW_g wächst auch mit kleinerem Erhebungswinkel Ω , wachsender Höhe der Umlaufbahn und größerem Planetenradius.

Der Winkel β kann in Flugzeugradarsystemen etwa 50° betragen. Daher erhält man Radaraufnahmen mit stark variierendem Blickwinkel Ω . Dies führt zu den bekannten Problemen von mehrdeutigen Bildern ("Lay-Overs") im Nahbereich und von exzessiver Schattenwirkung im Fernbereich (Far-Range), wie in Figur 2.8 gezeigt wird.



Figur 2.7: Abhängigkeit zwischen Gesichtsfeld SW_g und SW_r bzw. dem Erhebungswinkel Ω unter verschiedenen Annahmen für (a) den Planetenradius R , und (b) die Impulsfolgefrequenz PRF (oder SW_r).



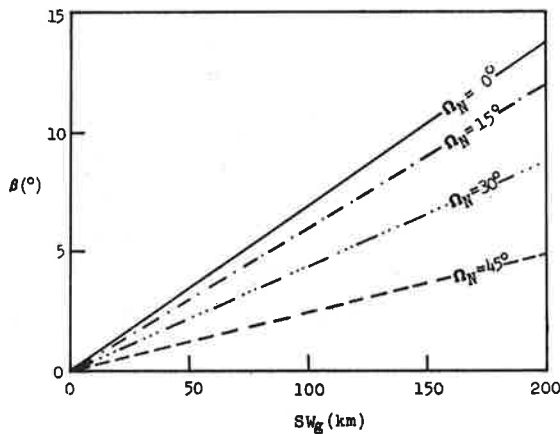
Nahbereich
(Lay-overs)

5 km

Fernbereich
(Schatten)

Figur 2.8: Beispiel eines Flugzeugradarbildes, das den Effekt der großen Variation des Blickwinkels demonstriert (Westinghouse AN-APQ 97, Yellowstone Park)

In einem Satellitenradarsystem bleibt der Winkel β wesentlich kleiner (Figur 2.9). Dies führt zu einheitlichen Abbildungsbedingungen im Nah- und Fernbereich einer Aufnahme. Alle Objekte werden ungefähr unter demselben Blickwinkel abgebildet, was die Bildinterpretation erhöhen wird.



Figur 2.9: Größe der Winkelbreite β eines Satellitenradarstrahls

Die Breite SW_g des Gesichtsfeldes kann auch durch die Datenmenge begrenzt sein, die verarbeitet werden kann: Im Falle der analogen Herstellung der holographischen Signale einer synthetischen Apertur werden Kathodenstrahlröhren verwendet, welche die Anzahl von Bildelementen beschränken. Eine Röhre vermittelt Informationen für etwa 1000 Auflösungselemente im endgültigen Radarbild. Im Falle von SEASAT bedeutet dies die Abbildung eines Bereichs von 25 km (1000 x 25 m). Da SEASAT ein Gesichtsfeld von etwa 100 km haben wird, ergibt sich die Notwendigkeit, vier Kathodenstrahlröhren zu verwenden und die 100 km in vier schmalen, separaten Bildstreifen von je 25 km Breite wiederzugeben.

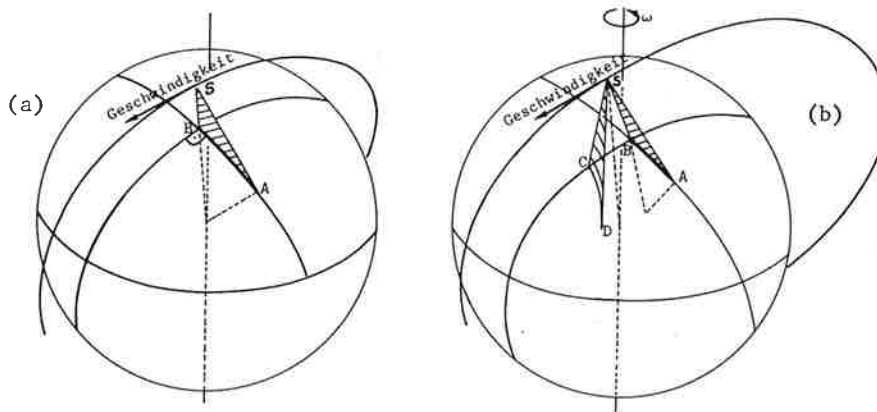
2.5. UMLAUFBAHN, PLANETENUMDREHUNG UND ABBILDUNGSKEGEL

Satellitenumlaufbahnen können kreisförmig und elliptisch sein. Die momentane Abtastlinie eines synthetischen Apertur-Radars ist in bezug auf den Geschwindigkeitsvektor des Sensors (rela-

tiv zum Objekt) definiert. Daher kann ein unverformtes Radarbild nur dann erzeugt werden, wenn der Geschwindigkeitsvektor parallel zur Planetenoberfläche verläuft, also eine kreisförmige Umlaufbahn gegeben ist. Eine elliptische Umlaufbahn verursacht eine variable Vertikalkomponente des Geschwindigkeitsvektors und kompliziert die Radarbildgeometrie (systematische Radarbildverformungen wegen der Exzentrizität der Umlaufbahn).

Auch die Planetenumdrehung beeinflusst die Bildgeometrie in ähnlicher Weise.

Die Abtastfläche ("Abbildungskegel") des Radarsystemes beschreibt die idealisierte Fläche, in der sich die (synthetischen) Radarimpulse fortpflanzen (siehe Appendix A). Im Normalfall ist die Radarabtastfläche eine Ebene. Es besteht aber auch die Möglichkeit, mit einer kegelförmigen Radarabtastfläche mit dem Geschwindigkeitsvektor des Sensors als Kegelachse abzubilden. Die Orientierung des Kegels ist also unabhängig von der Orientierung der Radarantenne und nur durch die Richtung der Fortbewegung der Antenne bestimmt. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt werden, wie eine kegelförmige Abtastfläche erzeugt werden kann.



Figur 2.10¹⁾: Der synthetische Radarstrahl schneidet die Planetenoberfläche entlang (a) eines Großkreises im Falle eines idealen Orbits, oder (b) entlang einer allgemeinen Schnittlinie zwischen Kegel und Kugel im Falle eines elliptischen Orbits (AB) und mit Abtastkegel (CD).

In einem idealen Satellitenprojekt würde man eine kreisförmige Umlaufbahn und einen zu einer Ebene degenerierten Abbildungskegel planen, sodaß zu jedem Zeitpunkt ein Großkreis auf dem Planeten abgebildet wird, der mit der Umlaufbahn des Satelliten einen Winkel von 90° bildet (Figur 2.10a)¹⁾. Die erwähnten Komplikationen führen aber dazu, daß im allgemeinen nicht ein Großkreis, sondern eine Schnittlinie 4. Ordnung zwischen dem Abbildungskegel und der Referenzfigur des Planeten abgebildet wird. (Figur 2.10b)¹⁾.

1) Die in diesem Bericht für die Erläuterung dreidimensionaler Sachverhalte verwendeten graphischen Darstellungen sind Prinzipskizzen und entsprechen nicht einer geometrisch definierten Projektion.

3. GEOMETRIE DER EINZELNEN SATELLITENRADARSCHRÄGAUFNAHME

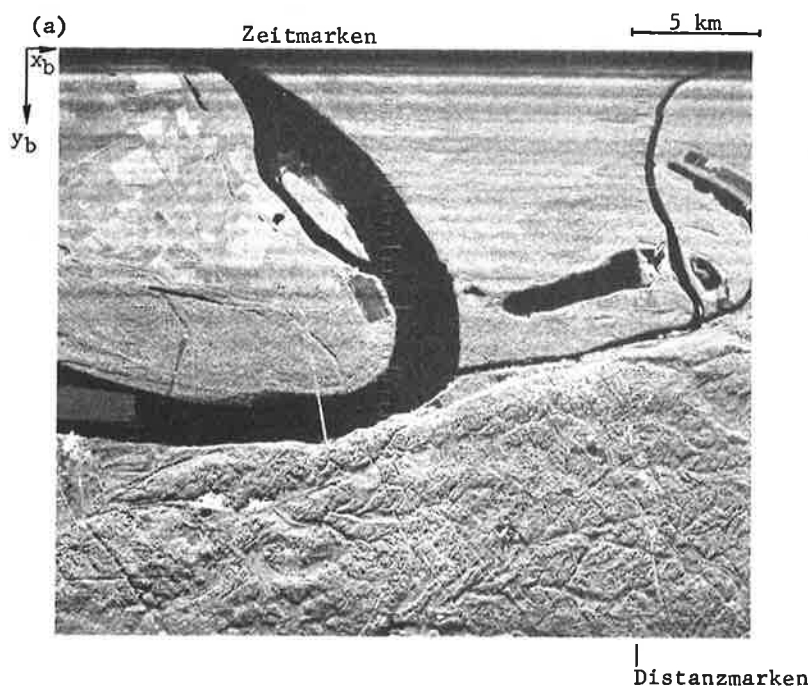
3.1. EINLEITUNG

Der erste Schritt in der geometrischen Analyse von Satellitenradarbildern ist die Formulierung des Zusammenhanges zwischen den im Objektraum gemessenen Größen, nämlich Zeit und Schrägdi- stanz, und den Bildkoordinaten. Diese Größen sind Eingabedaten für die Abbildungsgleichungen, welche wie in der klassischen Photogrammetrie aus der Position und Orientierung des Sensors oder direkt mit den Elementen der Satellitenbahn entwickelt werden können. Die erste Formulierung eig- net sich zur Radarkartierung, die letztere für das Studium der Effekte der Planetenumdrehung und der Exzentrizität der Satellitenumlaufbahn.

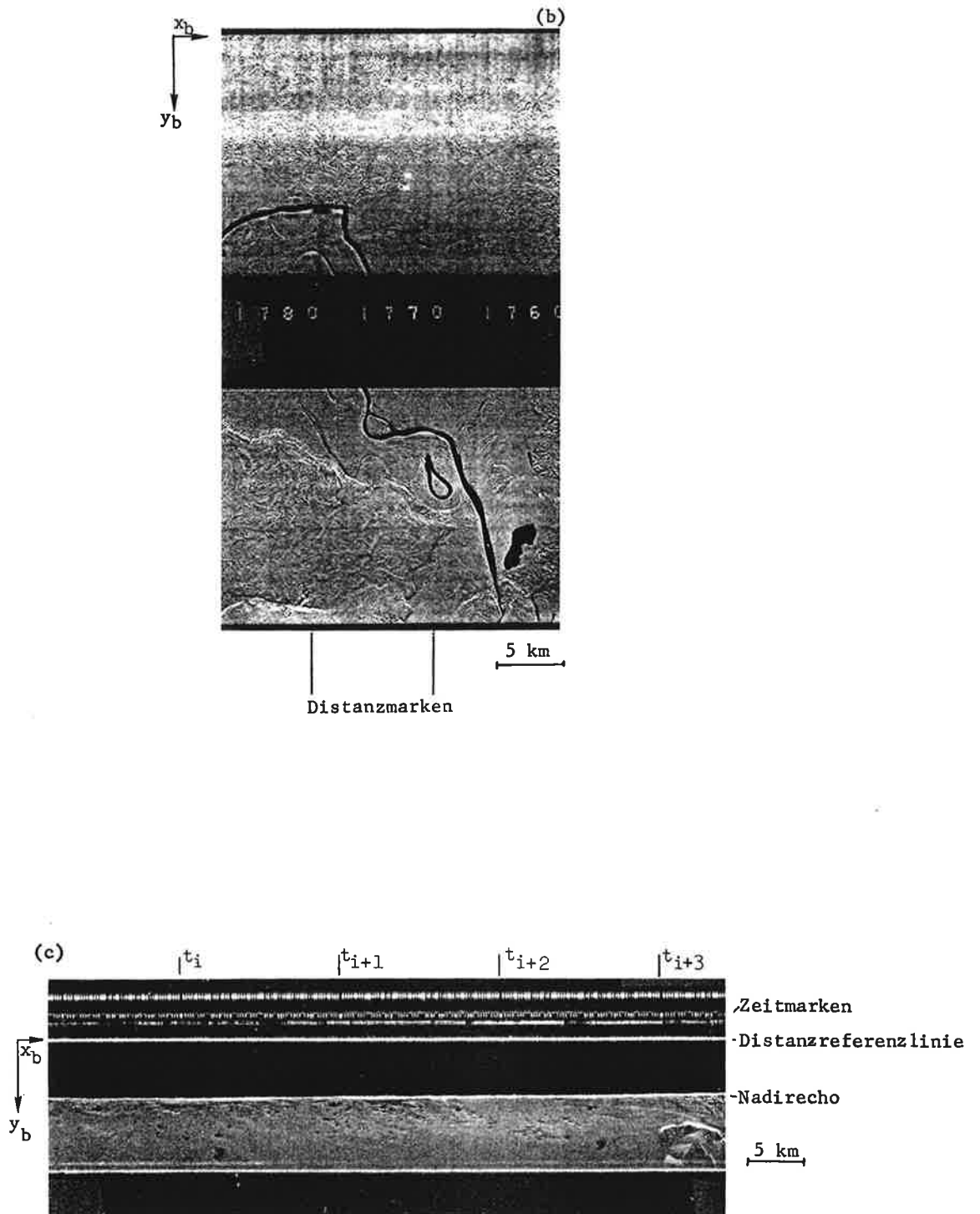
Für die Planung und Ausführung eines Satellitenradarprojektes ist die Kenntnis der Radar-Ab- tastlinie, das ist der in einem gegebenen Moment durch einen Radarimpuls "beleuchtete" oder abge- bildete Teil der Planetenoberfläche, notwendig. Daher wird hierfür eine analytische Formulierung abgeleitet und mit dieser numerische Beispiele berechnet.

Der geowissenschaftliche Gebraucher von Satellitenradarbildern ist nicht an der Radarabtast- linie, sondern an den geometrischen Eigenschaften der Aufnahmen interessiert. Diese Eigenschaften werden daher in rechnerischen Beispielen illustriert.

Die Geometrie eines Flugzeug-Radar mit realer Apertur war Gegenstand einer Reihe photogram- metrischer Untersuchungen. Ebenso wurden Projektionsgleichungen und Auswirkungen von Fehlern der inneren und äußeren Orientierung in früheren Arbeiten (z.B. Konecny, 1970, 1972a,b; Leberl, 1970b, 1971c, 1972a, 1975a,b) ausführlich behandelt. Für grundlegende Definitionen über die Geometrie von Radarbildern (Reliefverschiebung, Bildschatten, usw.), wie sie für die Bildinterpretation wichtig sind, wird im besonderen auf Rydstrom (1968) und Leberl (1975b) verwiesen.



Figur 3.1: Text siehe nächste Seite



Figur 3.1: Beispiele von Rahmenmarken in Radarbildern und Definition der Bildkoordinatenachsen x_b und y_b für den Fall von (a) Westinghouse AN-APQ 97; (b) Goodyear GEMS 1000; (c) JPL-L-Band Radarbildern. Alle drei Beispiele betreffen Flugzeugradar. Für ein Beispiel von Satellitenradar siehe Abschnitt 6.

3.2. RADARBILDKOORDINATEN UND GRÖSSEN IM OBJEKTRAUM (INNERE ORIENTIERUNG)

Flugzeugradaraufnahmen vermitteln die im Zeitpunkt t_p der Bildformung eines Objektes P gemessene Schrägdistanz r_p zwischen der Antenne und P. Mit Hilfe von Rahmenmarken (Figur 3.1) wird ein Radarbildkoordinatensystem (x_b, y_b) definiert, der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten (x_b, y_b) und den Meßgrößen (r, t) wird durch die Art der Radarbildformung bestimmt.

Hiefür bestehen Möglichkeiten, je nachdem auf welche Weise im Sensor die holographischen Signaldaten und im optischen oder digitalen Korrelator das endgültige Radarbild erzeugt werden. In der Folge wird zuerst der Normalfall behandelt, in dem sich die synthetischen Radarimpulse in einer Ebene normal zur Flugrichtung fortpflanzen. Sodann folgt der für die Satellitenradargrammetrie bedeutungsvolle Fall, in dem sich die synthetischen Radarimpulse entlang eines Kegelmantels ausbreiten. Schließlich wird die Auswirkung einer Kantung oder Kippung der realen Antenne auf die synthetische Apertur untersucht und kurz auf die Möglichkeit eingegangen, auch die realen Radarimpulse nicht in einer Ebene, sondern auf einem Kegelmantel auszusenden.

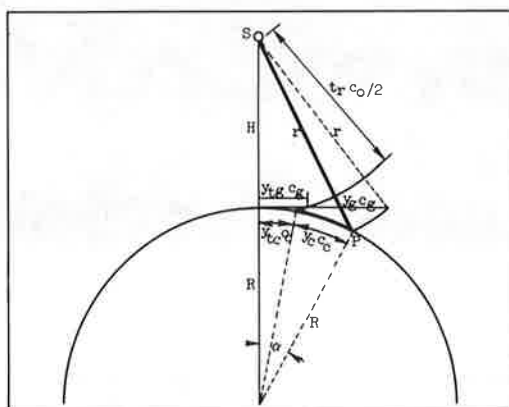
3.2.1 Synthetische Apertur - Abbildung mit Abtastebene

Wird das Radarbild mit einer Abtastebene aufgenommen, so können die gemessenen Schrägdistanzen r direkt im Bild dargestellt werden. Für diesen einfachsten Fall der "Schrägdistanzdarstellung" gelten die Beziehungen:

$$t = t_o + (t_1 - t_o)(x_b - x_{bo}) / (x_{b1} - x_{bo}) \tag{3.1}$$

$$r = (y_b c_r + t_r) c_o / 2 \tag{3.2}$$

Diese vermitteln eine lineare Interpolation der Zeit t mittels der Rahmen-Zeitmarken (siehe Figur 3.1). Die Koordinaten x_b der Bildpunkte und (x_{bo}, x_{b1}) der Zeitmarken t_o, t_1 werden im Radarbild gemessen. In Gl. (3.2) ist c_r ein Maßstabsfaktor zur Umwandlung der Bildkoordinate y_b in Millisekunden, c_r ist die Inverse der Geschwindigkeit, mit der der Kathodenstrahl über den Schirm der Röhre streicht; t_r die sogenannte Abtastverzögerung ("Sweep-delay") in Einheiten von Zeit, und c_o die Lichtgeschwindigkeit.



Figur 3.2: Schrägdistanz r , Grunddistanz $y_g c_g$ und $y_c c_c$.

Wird statt der Schrägdistanzen y_b das Radarbild mit Grunddistanzen y_g erzeugt, so gilt laut Fig. 3.2:

$$r = ((y_g + y_{tg})^2 c_g^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3a)$$

und umgekehrt:

$$y_g = (r^2 - H^2)^{\frac{1}{2}}/c_g - y_{tg} \quad (3.3b)$$

Darin bezeichnen y_{tg} eine durch die Abtastverzögerung definierte Systemkonstante und c_g den Maßstabsfaktor des Radarbildes.

Aus der gemessenen Schrägdistanz r kann auch die sphärische (planetare) Entfernung berechnet werden. Bezeichnet R den Radius des Planeten und α den zu r gehörigen Zentriwinkel, so gilt:

$$r = ((R + H)^2 + R^2 - 2R(R + H) \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4a)$$

Mit dem Faktor c_c als Maßstabszahl des Radarbildes und y_{tc} als Systemkonstante gilt weiters:

$$\alpha = (y_c + y_{tc}) c_c / R \quad (3.4b)$$

Die Umkehrung ergibt:

$$y_c = R \arccos \{ ((R + H)^2 + R^2 - r^2) / 2R(R + H) \} / c_c - y_{tc} \quad (3.4c)$$

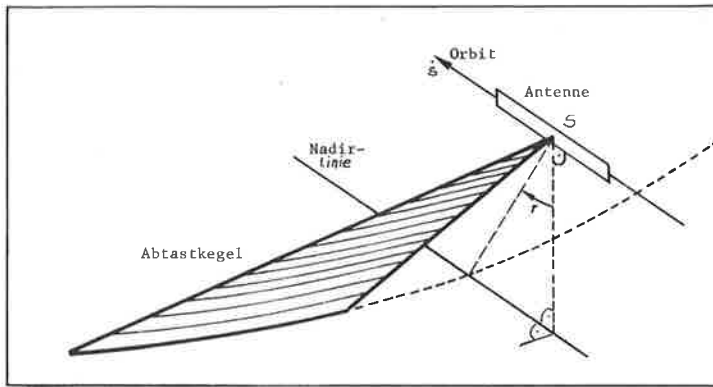
Es ist in diesem Zusammenhang nicht sehr sinnvoll, auf weitere Alternativen einzugehen. Die Ausdrücke (3.1) bis (3.4) demonstrieren das Prinzip, die tatsächlich zu verwendenden Formeln hängen von den Systemparametern des benützten Radarsystems ab.

3.2.2 Synthetische Apertur - Abbildungskegel

Im Appendix A wird das Prinzip der synthetischen Apertur erläutert und auf die Tatsache hingewiesen, daß die empfangenen Radarechos eine Doppelfrequenz besitzen.

Alle Objektpunkte gleicher Dopplerfrequenz in bezug auf eine Satellitenposition S liegen auf einem Kegelmantel mit der Spitze in S und der Achse entlang des Geschwindigkeitsvektors des Satelliten (Figur 3.3). Nur für die Dopplerfrequenz 'Null' degeneriert der Kegelmantel in eine Ebene normal auf den Geschwindigkeitsvektor.

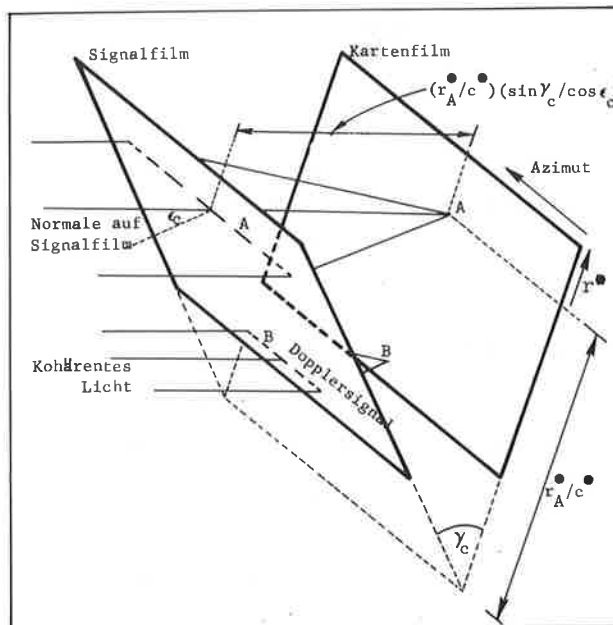
Das Prinzip der synthetischen Apertur und der dabei unter Umständen auftretende Abbildungskegel kann so wie im folgenden durch Darlegung einfacher geometrischer Sachverhalte, ohne Zuhilfenahme von Dopplerfrequenzen der Radarechos, erläutert werden. Jedoch beruht in der von Elektronikern geprägten Fachliteratur die Erklärung der synthetischen Apertur (und des Abbildungskegels) stets auf Dopplerfrequenzen der Radarechos.



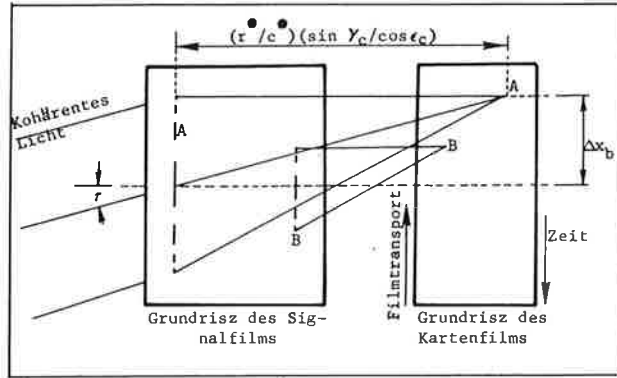
Figur 3.3: Definition eines Abtastkegels, wie er sowohl in einem Radar mit synthetischer wie auch realer Apertur erzeugt werden kann, und Kegelkomplementärwinkel τ .

Daher wird der Fall der Radarabbildung mit einer Abtastebene als "Abbildung mit Bildkorrelation in bezug auf die Dopplerfrequenz Null" bezeichnet. Analog wird die Abbildung mit einem Kegel mit "Bildkorrelation in bezug auf eine von Null verschiedene Dopplerfrequenz" bezeichnet.

Das im Appendix A angedeutete Prinzip der Bildkorrelation zeigt den Normalfall der ebenen Abtastfläche (oder mit anderen Worten der Bildkorrelation in bezug auf die Dopplerfrequenz Null). Dieser Fall ist in Figur 3.4a in größerem Detail wiedergegeben. Hierbei wird nur auf die Fokussierung des kohärenten Lichts in der Azimutrichtung eingegangen. Es ist offensichtlich, daß eine Fokussierung in der Distanz - Richtung weitere optische Elemente benötigt (wie dies im Appendix A (Figur A.8, -9) angedeutet wird.)



Figur 3.4a: Bildkorrelation mit synthetischer Radarapertur; Schrägansicht des Normalfalls (Korrelation in bezug auf Dopplerfrequenz Null)

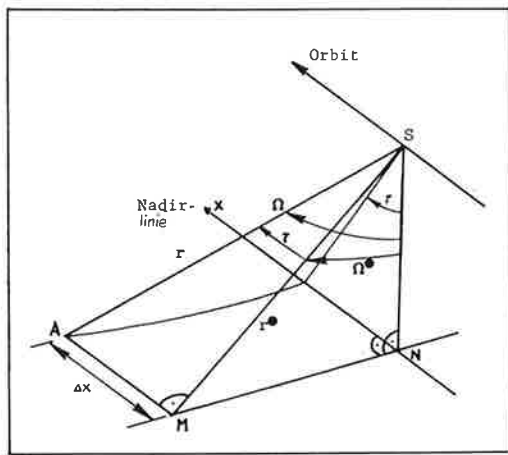


Figur 3.4b: Bildkorrelation mit synthetischer Radarapertur; Grundriß des Sonderfalls (Korrelation in bezug auf Dopplerfrequenz $\neq 0$).

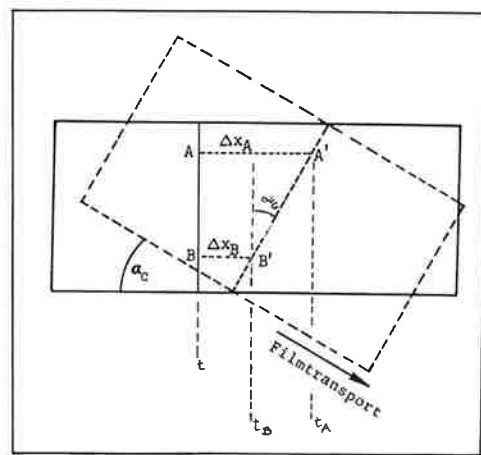
Im folgenden wird gezeigt, daß die kegelförmige Abtastung durch Verdrehung des kohärenten Lichtes im Bildkorrelator um einen Winkel τ erreicht wird. Nach Figur 3.4b führt dies zu einer Verschiebung aller Bildpunkte in Azimutrichtung um einen Betrag Δx_b , proportional zur Schrägdi-
stanz r_p des Objektpunktes P und zum Tangens des Verdrehungswinkels τ . Nach Figur 3.4b gilt die Beziehung:

$$\Delta x_b = (r^{\bullet}/c^{\bullet})(\sin \gamma_c / \cos \epsilon_c) \tan \tau \quad (3.5a)$$

Die Bedeutung der Größen r^{\bullet} , γ_c , ϵ_c ist aus Figur 3.4a zu ersehen; c^{\bullet} ist ein Maßstabsfaktor.



Figur 3.5: Definition der Objektraumgrößen zur Abbildung mit Abtastkegel.



Figur 3.6: Drehung des Kartenfilmes um Winkel α_c zur Kompensierung des Effekts der Kegelaabtastung mit r.

Im Objektraum liegen die der Bildgeraden \overline{AB} (Fig.3.4b) entsprechenden Punkte in einem Abstand Δx von der auf den Geschwindigkeitsvektor senkrecht stehenden Ebene SNM. Der Abstand Δx kann nach Fig.3.5 aus der Gleichung:

$$\Delta x = \tan \tau r^{\bullet} = \sin \tau r \quad (3.5b)$$

berechnet werden. Der Ort aller Punkte, die von der Ebene SNM in Figur 3.5 den Abstand $\tan \tau r^\bullet$ haben, ist ein Kegelmantel. Die Kegellachse ist der Geschwindigkeitsvektor, der Öffnungswinkel ist $(180^\circ - 2\tau)$. Die Verdrehung des kohärenten Lichtstrahls im Korrelator entspricht also der Abbildung mit einem Abastkegel. Die dem Winkel τ entsprechende Dopplerfrequenz f_D ergibt sich aus der Wellenlänge λ_w der Sensorgeschwindigkeit \dot{s} nach:

$$f_D = 2 \sin \tau \dot{s} / \lambda_w \quad (3.6)$$

Soll in der Bildauswertung die Wirkung des Winkels τ nicht berücksichtigt werden, so muß die gemessene x_b -Bildkoordinate um den Wert Δx_b , der sich aus Gl. (3.5a) ergibt, verändert und mit dem neuen $x_b + \Delta x_b$ aus Gl. (3.1) der "Aufnahmezeitpunkt" ermittelt werden. Die Bildkoordinate x_b kann jedoch direkt in Gl. (3.1) eingeführt und zur Berechnung der Zeit t verwendet werden, wenn in den in folgenden Unterabschnitten abzuleitenden Projektionsgleichungen der Einfluß des Winkels τ berücksichtigt wird.

Im Falle einer kegelförmigen Abtastfläche wird die Bildgeometrie verändert. Die Objektpunkte A, B, welche im Falle einer Abtastebene auf einer Bildlinie $x_b = \text{konstant}$ liegen würden, werden mit kegelförmiger Abtastung im Bild um $\Delta x_A, \Delta x_B$ verschoben. Sie werden also nicht zum Zeitpunkt t , sondern zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_A, t_B aufgenommen. Diese Bildverschiebung kann jedoch auf einfache Art nach Fig. 3.6 durch Verdrehung des Kartenfilms um einen Winkel α_c korrigiert werden. Der Winkel α_c ergibt sich lt. Fig. 3.4a,b aus:

$$\tan \alpha_c = \Delta x_b / (r_A^\bullet / c^\bullet)$$

sodaß aus Gl. (3.5a) folgt:

$$\alpha_c = \arctan(\sin \gamma_c \tan \tau / \cos \epsilon_c) \quad (3.7)$$

Der Bildmaßstab verändert sich gegenüber dem der Bildkorrelation mit $\tau = 0$ (siehe Fig. 3.4b und 3.6):

$$A'B' = AB / \cos \alpha_c$$

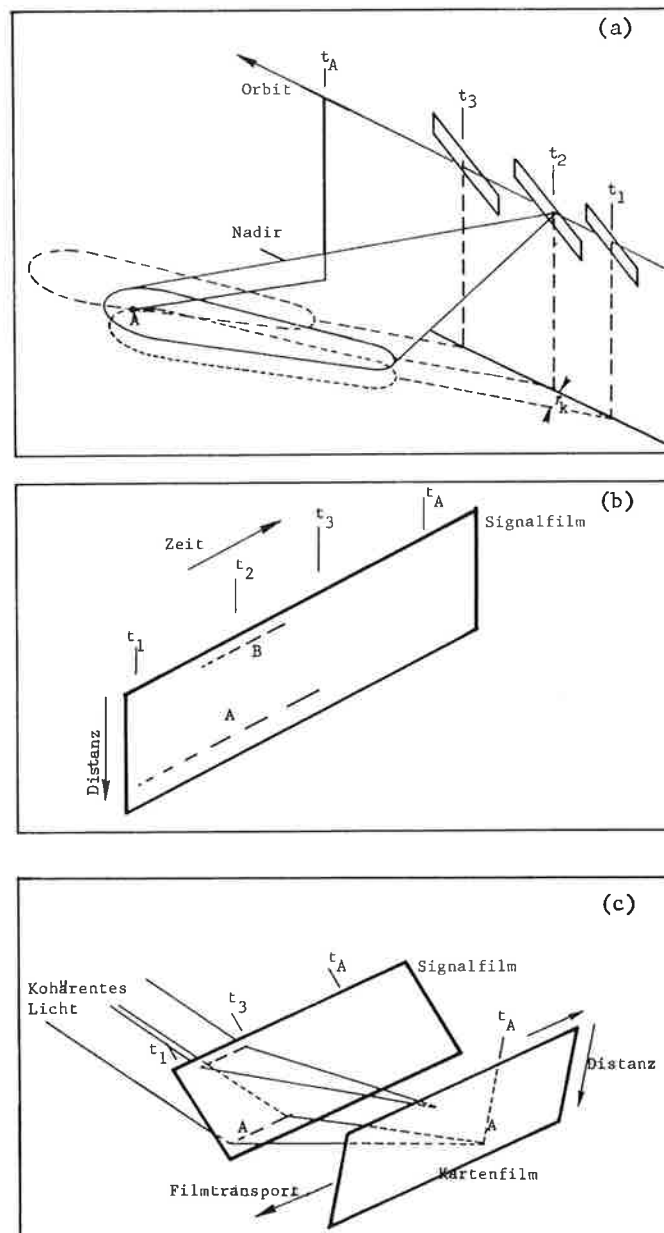
Es muß darauf hingewiesen werden, daß diese Überlegungen nur unter der Annahme gelten, daß die Krümmung der Dopplersignallinien korrigiert wurde (siehe Appendix A).

3.2.3 Synthetische Apertur - Kantung und Kippung der realen Antenne

Zum Zwecke der Erzeugung einer Vorwärtsradaraufnahme kann es sinnvoll sein, die reale Antenne entsprechend Figur 3.7a zu verkanten (oder um die Sensorquerachse zu kippen). In Figur 3.7a und b wird dargestellt, daß eine Antennenkantung (um einen Winkel τ_k) zu einer unvollständigen Dopplersignallinie führt, die also nicht symmetrisch in bezug auf das Doppler-Null ist. Im Prinzip erlaubt jedoch auch dieses unvollständige, unsymmetrische Signal eine Bildkorrelation, die den Bildpunkt dort produziert, wo er mit einem vollständigen Signal erzeugt worden wäre (Figur 3.7c). Es besteht jedoch das Problem der Krümmung der Signallinie, die im Appendix A (Figur A. 4) gezeigt wird. In den Abb. 3.7 ist diese Krümmung nicht dargestellt. Ohne Kantung der realen Antenne, und mit einem symmetrischen Dopplersignal, ist die Krümmung klein und kann daher einfach, im optischen Korrelator z.B. mit der in Fig. A.8 angegebenen konischen Linse, eliminiert werden.

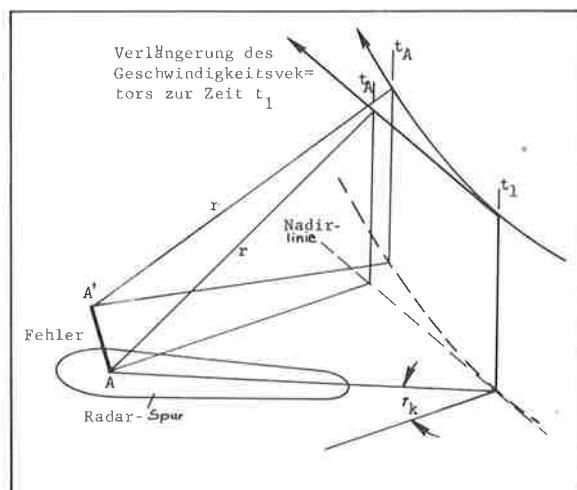
Ist die reale Antenne aber um einen Winkel τ_K gekantet, so ergibt sich für die unbearbeitete Dopplersignallinie eine starke Krümmung. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, diese zu korrigieren, je nachdem, ob die Korrelation digital, optisch, elektronisch oder hybrid erfolgt. In der Literatur wurden optische Verfahren angegeben (Martin^x, 1961; 1963), die jedoch Vereinfachungen darstellen, die zu Verformungen des Radarbildes führen. Der Rahmen der vorliegenden Untersuchung erlaubt es nicht, auf dieses Detailproblem näher einzugehen.

Es sei hier vermerkt, daß die Verkantung der realen Antenne in Zukunft für zivile Aufgaben von Bedeutung sein könnte, z.B. für Vegetations- und bodenkundliche Radaranwendungen (Bush^x u.a., 1975). Denn bei diesen können aus simultanen Radaraufnahmen mit identischer Geometrie, aber unterschiedlichen Radareinfallseinstellungen (mit und ohne Kantung τ_K der realen Antenne) wichtige Informationen erhalten werden.



Figur 3.7: Verkantung der realen Antenne um einen Winkel τ_K (a); Auswirkung auf das Dopplersignal (b); Bildkorrelation mit unvollständiger Dopplersignallinie (c). Punkt A während der Zeit t_1 bis t_3 im Radarfußabdruck. Dopplernull von A wäre zur Zeit t_A .

Derzeit ist dieses Radarkonzept erst in einem vorläufigen Diskussionsstadium, ein Satellitenprojekt ist nicht vorgesehen. Eine ausführliche radargrammetrische Untersuchung erscheint zweckmäßig. Theoretisch ergibt sich mit einer symmetrischen Dopplersignallinie dieselbe Bildgeometrie wie mit nur einem Teil der Dopplersignale (Prinzip der Holographie), sodaß die Umwandlung der Bildkoordinaten x_b, y_b in Zeit t und Schrägdistanz r mit den Formeln (3.1 bis 3.4) durchgeführt werden kann. Jedoch bedeutet t den Zeitpunkt, an dem der Objektpunkt P ohne Antennenkantung bei geradliniger Sensorbewegung 'beleuchtet' worden wäre. Daraus folgt die Möglichkeit grober Radarbildfehler bei nicht-geradliniger Sensorbewegung, was bei Satellitenumlaufbahnen zu erwarten ist (siehe Abb.3.8).



Figur 3.8: Bildkorrelation im Falle einer verkanteten Antenne -- in bezug auf Dopplernull erhält man Punkt A' aus Schrägdistanz r ; im Fall der Korrelation in bezug auf Dopplerfrequenz $\neq 0$ erhält man wahre Lage des Punktes A .

In der Praxis könnte es daher sinnvoll sein, nicht den Zeitpunkt t_A zu ermitteln, sondern jenen, an dem der Objektpunkt P mittels der verkanteten Antenne tatsächlich 'beleuchtet' wurde. Dies würde erlauben, Effekte einer eventuellen Abweichung der Sensorbewegung von einer geraden Linie auf die Radarkartierung zu verhindern. In der Praxis erfordert dieses Vorgehen eine Bildkorrelation in bezug auf eine von Null verschiedene Dopplerfrequenz, sodaß die Radarabtastung in Wirklichkeit nicht in einer Ebene normal auf den Geschwindigkeitsvektor stattfindet, sondern in einem Kegel.

3.2.4 Reale Apertur - Abbildungskegel

Eine kegelförmige Ausbreitung der Impulse kann auch im Radar mit realer Apertur erreicht werden, zum Beispiel, wenn die elektromagnetische Energie der Antenne von einem Ende zugeführt wird ("end-feeding"), wie es im AN/APQ 97 System von Westinghouse der Fall ist. Hockeborn (1971) bezeichnet das Komplement τ des Öffnungswinkels des Kegels mit "Squint" (Schielen). (Mit "Squint" werden in der englischsprachigen Radarliteratur auch andere Abweichungen der Radarabtastfläche von der Ebene normal zur Antennenlängsachse oder zum Geschwindigkeitsvektor bezeichnet).

3.2.5 Fehler der inneren Orientierung des Radars mit synthetischer Apertur

Die innere Orientierung eines Radars mit realer Apertur und die Quellen möglicher Fehler wurden in früheren Arbeiten untersucht (Leberl, 1971c, 1972a). Aus der vorhergehenden Analyse der Zusammenhänge zwischen Bildkoordinaten eines Radars mit synthetischer Apertur und Größen im Objekt-

raum wird deutlich, daß die innere Orientierung hier wesentlich komplexer ist als im Fall der realen Apertur. Vor allem der Vorgang der Bildkorrelation trägt zur Komplizierung der inneren Orientierung bei.

Eine Anzahl der mechanischen, optischen und elektronischen Elemente sind Quellen möglicher Bildfehler. Zwar stellt Petersen (1976) fest, daß der optische Bildkorrelator keine signifikanten Bildfehler verursacht, doch scheint dies eine optimistische Äußerung zu sein. Wegen der vielen unterschiedlichen Anordnungen der Radarsysteme wird von einer allgemeinen Analyse der Fehler der inneren Orientierung des Radars mit synthetischer Apertur abgesehen. In der Folge wird ein Fehlermodell der inneren Orientierung eines synthetischen Apertur-Radars verwendet, das von Gracie u.a. (1970) vorgeschlagen und auch durch DBA-Systems (1974) verwendet wurde (vergleiche auch Leberl, 1971c):

$$\begin{aligned} r &= a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \\ t &= b_0 + b_1 r + b_2 r^2 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} r &= a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \\ t &= b_0 + b_1 r + b_2 r^2 \end{aligned}} \right| (3.8)$$

Darin bedeuten r die Schrägdistanz, t die Zeit. Gracie u.a. (1970) fanden in experimentellen Untersuchungen für Flugzeugradar, daß in Gl. (3.8) die Reduktion auf lineare Glieder zulässig ist, ohne die Genauigkeit der radargrammetrischen Auswertung zu beeinflussen.

3.3. PROJEKTIONS- UND ABBILDUNGSGLEICHUNGEN IN FUNKTION DER SENSORPOSITION UND DES GESCHWINDIGKEITSVEKTORS

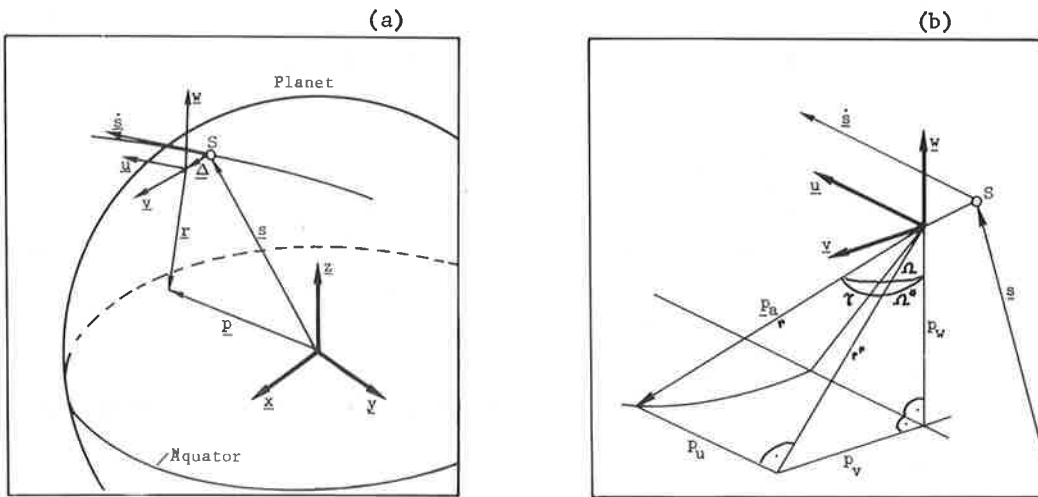
Die Abbildungsgleichungen eines Radarsystems mit realer Apertur wurden in Leberl (1971c, 1972a) abgeleitet. Für ein Radarsystem mit synthetischer Apertur, und überdies an Bord eines Satelliten, sind Abänderungen dieser Gleichungen notwendig.

Gegeben sei ein durch drei rechtwinkelige Einheitsvektoren \underline{x} , \underline{y} , \underline{z} definiertes Planetenkoordinatensystem. Der Ortsvektor eines Punktes an der Planetenoberfläche sei mit $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ bezeichnet, der Positionsvektor der Raumsonde mit \underline{s} , die Exzentrizität der Antennenposition mit $\underline{\Delta}$, und schließlich der Vektor von der Antenne zum Objektpunkt mit \underline{r} . Nach Figur 3.9a gilt für eine synthetische Apertur die Beziehung:

$$\underline{p} = \underline{s} + \underline{\Delta} + \underline{r} \quad (3.9)$$

Wird ein Koordinatensystem der synthetischen Antenne eingeführt, welches durch die Einheitsvektoren \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} definiert wird, gilt:

$$\begin{aligned} \underline{u} &= \dot{\underline{s}} / |\dot{\underline{s}}| \\ \underline{v} &= \underline{s} \times \dot{\underline{s}} / |\underline{s} \times \dot{\underline{s}}| \\ \underline{w} &= \underline{u} \times \underline{v} / |\underline{u} \times \underline{v}| \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \underline{u} &= \dot{\underline{s}} / |\dot{\underline{s}}| \\ \underline{v} &= \underline{s} \times \dot{\underline{s}} / |\underline{s} \times \dot{\underline{s}}| \\ \underline{w} &= \underline{u} \times \underline{v} / |\underline{u} \times \underline{v}| \end{aligned}} \right| (3.10)$$



Figur 3.9: Definition der Koordinatensysteme (Basisvektoren) und Grundgrößen zur Formulierung der Radarprojektionsgleichungen; (a) Planetozentrisches System; (b) Antennensystem.

Aus Figur 3.9b folgt:

$$\underline{r} = p_u \underline{u} + p_v \underline{v} + p_w \underline{w} \quad (3.11a)$$

Die Koeffizienten p_u , p_v , p_w definieren den Ortsvektor \underline{p}_a im Antennensystem. Hiefür gilt:

$$\begin{aligned} p_u &= r \cdot \tan \tau \\ p_v &= r \cdot \sin \Omega \\ p_w &= -r \cdot \cos \Omega \end{aligned} \quad (3.11b)$$

In \underline{p}_a wird für den Erhebungswinkel Ω und die Schrägdistanz r wie in Fig.3.5 angenommen, daß die Krümmung des Dopplersignals korrigiert wurde. Ist dies nicht der Fall, so bezeichnet die y_b -Bildkoordinate nicht die Schrägdistanz r , sondern r (Abb.3.5). Somit gilt auch für die reale Apertur (Hockeborn, 1971):

$$\underline{p}_a = r (\sin \tau, (\sin^2 \Omega - \sin^2 \tau)^{\frac{1}{2}}, \cos \Omega) \quad (3.11c)$$

Unter Verwendung der Gl. (3.11a,b,c) kann Vektor \underline{r} auch durch eine Rotation aus Vektor \underline{p}_a gewonnen werden. Nach Gl. (3.9) folgt:

$$\underline{p} = \underline{s} + \underline{\Delta} + \underline{A} \underline{p}_a \quad (3.12)$$

Für Matrix \underline{A} , welche das Antennenkoordinatensystem $(\underline{u}, \underline{v}, \underline{w})$ in das Referenzsystem $(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$ dreht, besteht die Beziehung:

$$\underline{A} = \begin{vmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

Vergleicht man die Gleichungen (3.12) mit den für Radar mit realer Apertur geltenden (Leberl, 1972 a, Gl. (1)), so folgt, daß diese komplexer sind, weil sie Orientierungsmatrizen für die Antenne,

die Antennenhalterung und den Sensor enthalten können.

Von Interesse ist die Frage nach der physikalischen Bedeutung der Ortsvektoren \underline{s} , $\underline{\Delta}$ und der Rotationsmatrix \underline{A} . Die Exzentrizität $\underline{\Delta}$ der Antenne ist in der Regel klein (≈ 2 m in SEASAT), und wird daher im folgenden vernachlässigt. Dies ist jedoch nicht zulässig in Untersuchungen, in denen nicht die Radaraufnahmen, sondern die holographischen Signaldaten direkt in geometrische Analysen eingeführt werden, z.B. in eine Trilateration (Matthews^x, 1974, pp.154-156). Der Ortsvektor \underline{s} wird aus den Parametern der Satellitenumlaufbahn erhalten und ist für Raumfahrtprojekte in Funktion der Zeit bekannt. Die Rotationsmatrix \underline{A} wird aus \underline{s} und dem Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}$ des Raumschiffes erhalten (Gl. 3.10, 3.13). Bei Aufnahmen mit Radar mit realer Apertur werden hingegen die Rotationsmatrizen durch die Orientierung der realen Antenne und des Satelliten definiert.

Um die Verbindung zwischen den Abbildungsgleichungen für synthetische und reale Antennen herzustellen, ist es sinnvoll, Orientierungswinkel $\bar{\phi}$, $\bar{\omega}$, $\bar{\kappa}$ mit Hilfe der nachfolgenden Gleichungen einzuführen:

$$\underline{A} = \underline{A}_{\bar{\kappa}} \underline{A}_{\bar{\phi}} \underline{A}_{\bar{\omega}} \quad (3.14)$$

Die primäre Drehung $\bar{\omega}$ erfolgt um die \underline{u} -Achse ($\underline{v} \rightarrow \underline{w}$). Winkel $\bar{\phi}$ beschreibt die sekundäre Drehung um \underline{v} ($\underline{w} \rightarrow \underline{u}$), und $\bar{\kappa}$ ist eine tertiäre Drehung um \underline{w} ($\underline{u} \rightarrow \underline{v}$). Für die aus $\bar{\omega}$, $\bar{\phi}$, $\bar{\kappa}$ gebildete Matrix \underline{A} bestehen die Beziehungen:

$$\begin{aligned} u_x &= \cos \bar{\phi} \cos \bar{\kappa} \\ u_y &= \cos \bar{\phi} \sin \bar{\kappa} \\ u_z &= -\sin \bar{\phi} \\ v_x &= \sin \bar{\phi} \cos \bar{\kappa} \sin \bar{\omega} - \sin \bar{\kappa} \cos \bar{\omega} \\ v_y &= \sin \bar{\phi} \sin \bar{\kappa} \sin \bar{\omega} + \cos \bar{\kappa} \cos \bar{\omega} \\ v_z &= \cos \bar{\phi} \sin \bar{\omega} \\ w_x &= \sin \bar{\phi} \cos \bar{\kappa} \cos \bar{\omega} + \sin \bar{\kappa} \sin \bar{\omega} \\ w_y &= \sin \bar{\phi} \sin \bar{\kappa} \cos \bar{\omega} - \cos \bar{\kappa} \sin \bar{\omega} \\ w_z &= \cos \bar{\phi} \cos \bar{\omega} \end{aligned} \quad (3.15a)$$

Soll ein radargrammetrisches Auswerteverfahren für reale Apertur auf synthetische Apertur angewendet werden, so müssen die Orientierungswinkel $\bar{\omega}$, $\bar{\phi}$, $\bar{\kappa}$ gegeben sein. Aus Gl.(3.15a) ist offensichtlich, daß eine Bestimmung dieser Winkel aus den nach Gl. (3.10) vorgegebenen Einheitsvektoren \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} möglich ist:

$$\begin{aligned} \bar{\phi} &= \arcsin (-u_z) \\ \bar{\kappa} &= \arcsin (u_y / (u_x^2 + u_y^2)^{\frac{1}{2}}) \\ \bar{\omega} &= \arcsin (v_z / (u_x^2 + u_y^2)^{\frac{1}{2}}) \end{aligned} \quad (3.15b)$$

Die Gleichungen (3.9) enthalten die vier Unbekannten: $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ und Ω . Der Erhebungswinkel kann eliminiert werden, indem unter Vernachlässigung von $\underline{\Delta}$ (siehe Fig.3.9a,b):

$$|\underline{p} - \underline{s}| = |\underline{r}| = r \quad (3.16)$$

$$\underline{\dot{s}} \cdot (\underline{p} - \underline{s}) = \sin \tau |\underline{\dot{s}}| |\underline{p} - \underline{s}| \quad (3.17a)$$

gesetzt wird.

Mit $\frac{\dot{s}}{|\dot{s}|} = \underline{u}$, folgt aus Gl. (3.17.a):

$$\underline{u} \cdot (\underline{p} - \underline{s}) = \sin \tau |\underline{p} - \underline{s}| \quad (3.17b)$$

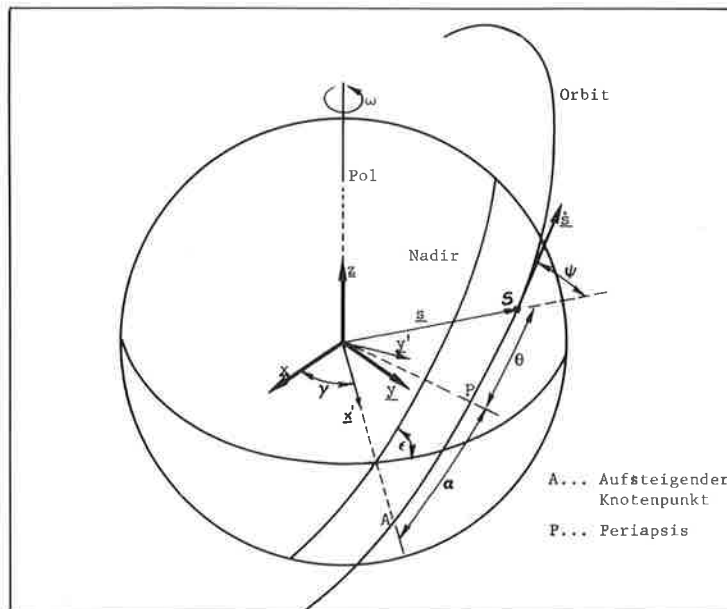
(3.16) beschreibt eine Kugel mit dem Mittelpunkt im Ort \underline{s} und dem Radius r ("Distanzkugel").

(3.17) beschreibt einen (Doppler-)Kegel mit der Spitze in \underline{s} , der Achse $\underline{\dot{s}}$ und dem Öffnungswinkel $(180^\circ - 2\tau)$.

In der Praxis werden meist die Gl. (3.16), (3.17) verwendet. Nur im Falle einer unabhängigen Messung des Erhebungswinkels Ω (z.B. durch ein Radarinterferometer (Manual of Photogrammetry, 1966; Graham, 1975a), oder mittels anderer Sensoren (Moore, 1969)), werden die Gl. (3.9) von Bedeutung sein. Derzeit ist dies wegen der geringen Genauigkeit der Bestimmung von Ω aus einer Satellitenumlaufbahn nicht aktuell.

3.4. PROJEKTIONSGLEICHUNGEN IN FUNKTION DER PARAMETER DER SATELLITENUMLAUFBAHN

Die Position einer Raumsonde in einer Satellitenumlaufbahn wird durch bekannte Parameter beschrieben (siehe Figur 3.10): Winkel γ beschreibt die Orientierung der Knotenlinie (die Länge des aufsteigenden Knotens) in der $\underline{x}, \underline{y}$ -Referenzebene, α ist der Winkel zwischen der Apsidenlinie und der planetaren Äquatorebene, gemessen in der Ebene der Umlaufbahn positiv vom aufsteigenden Knotenpunkt; θ ist der Winkel zwischen der Apsidenlinie und dem Ortsvektor \underline{s} des Satelliten; ϵ ist die Inklination der Ebene der Umlaufbahn, a ist die Länge der großen Halbachse der Umlaufbahn, und e die Exzentrizität. Die Elemente $\gamma, \alpha, \epsilon, a, e$ beschreiben die Satellitenumlaufbahn im System des nicht rotierenden Planeten (Inertialsystem). Im System des rotierenden Planeten kommt dazu die Rotationsgeschwindigkeit ω des Planeten. Die Sensorgeschwindigkeit ist auch von der Gravitationskonstanten μ abhängig.



Figur 3.10: Definition der Umlaufbahn eines Satelliten

Um die Projektionsgleichungen (3.9) oder (3.16), (3.17) in Funktion der Parameter der Umlaufbahn ausdrücken zu können, müssen der Ortsvektor \underline{s} und Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}$ als Funktion von $(\gamma, \alpha, \epsilon, \theta, a, e$ und $\omega, \mu)$ dargestellt werden. Aus Figur 3.10, und mit $|\underline{s}| = s$, folgt:

$$\underline{s} = s \cos(\alpha+\theta) \underline{x}' + s \sin(\alpha+\theta) \cos \epsilon \underline{y}' + s \sin(\alpha+\theta) \sin \epsilon \underline{z}' \quad (3.18)$$

Die Einheitsvektoren \underline{x}' , \underline{y}' , \underline{z}' ergeben sich aus:

$$\begin{aligned}\underline{x}' &= \cos \gamma \underline{x} + \sin \gamma \underline{y} \\ \underline{y}' &= -\sin \gamma \underline{x} + \cos \gamma \underline{y} \\ \underline{z}' &= \underline{z}\end{aligned}$$

Somit erhält man aus Gl. (3.18)

$$\begin{aligned}\underline{s} &= s_x \underline{x} + s_y \underline{y} + s_z \underline{z} \\ s_x &= s(\cos \gamma \cos(\alpha + \theta) - \sin \gamma \sin \epsilon \sin(\alpha + \theta)) \\ s_y &= s(\sin \gamma \cos(\alpha + \theta) + \cos \gamma \sin \epsilon \sin(\alpha + \theta)) \\ s_z &= s(\sin(\alpha + \theta) \cos \epsilon)\end{aligned} \quad (3.19)$$

Hinzu kommt als Gleichung der Kepler-Ellipse

$$s = a(1 - e^2)/(1 + e \cos \theta) \quad (3.20)$$

Winkel γ ist eine Funktion der Geschwindigkeit der Planetenrotation ω , die durch eine lineare Funktion aus dem zum Zeitpunkt t_0 geltenden Wert γ_0 bestimmt wird:

$$\gamma = \gamma_0 + \omega(t - t_0) \quad (3.21)$$

Nach Manning und Hann^x (1967) gilt die Beziehung:

$$t - t_0 = \left(\frac{a^3}{\mu} (1 - e^2)^3\right)^{\frac{1}{2}} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{1}{(1 - e \cos x)^2} dx \quad (3.22)$$

Für den Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}'$ im Inertialsystem ergibt sich eine der Gl.(3.19) analoge Gleichung, nur muß zu $(\alpha + \theta)$ der zwischen \underline{s} und $\underline{\dot{s}}$ aufgespannte Winkel ψ addiert werden, und s wird durch \dot{s}' ersetzt. Der Winkel ψ errechnet sich aus der Ellipsengleichung:

$$\tan \psi = a(1 - e^2)/(e \sin \theta) \quad (3.23)$$

Die Satellitengeschwindigkeit $\underline{\dot{s}}'$ folgt aus der sogenannten "Vis-Viva"Gleichung (Haymes^x, 1971):

$$\dot{s}' = \left\{ \mu \left(\frac{2}{s} - \frac{1}{a} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

worin $\mu = 3 G M$ die Gravitationskonstante des Planeten darstellt (M Masse des Planeten; G universelle Gravitationskonstante. Es gilt für die Erde: $\mu = 3.99 \cdot 10^{15} \text{ km}^3/\text{sec}^2$).

Um die Satellitengeschwindigkeit in dem (mit dem Planeten verbundenen) planetozentrischen Koordinatensystem darstellen zu können, muß der Vektor $\underline{\omega}$ der planetaren Winkelgeschwindigkeit um die z -Achse eingeführt werden:

$$\underline{\omega} = \omega \underline{z} \quad (3.25)$$

Die Geschwindigkeit $\underline{\dot{s}}$ des Satelliten relativ zum Planeten wird aus der Geschwindigkeit $\underline{\dot{s}}'$ durch Addition der entsprechenden Komponente von $\underline{\omega}$ erhalten. Es gilt daher:

$$\underline{\dot{s}} = \underline{\dot{s}}' - \underline{\omega} \times \underline{s} \quad (3.26)$$

oder:

$$\begin{aligned}
 \underline{\dot{s}} &= \dot{s}_x \underline{x} + \dot{s}_y \underline{y} + \dot{s}_z \underline{z} \\
 \dot{s}_x &= \dot{s}' \{ \cos \gamma \cos(\alpha + \theta + \psi) - \sin \gamma \sin \epsilon \sin(\alpha + \theta + \psi) \} + \omega s_y \\
 \dot{s}_y &= \dot{s}' \{ \sin \gamma \cos(\alpha + \theta + \psi) + \cos \gamma \sin \epsilon \sin(\alpha + \theta + \psi) \} - \omega s_x \\
 \dot{s}_z &= \dot{s}' \sin(\alpha + \theta + \psi) \cos \epsilon
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

Durch Einführen der Gl.(3.19) und (3.27) in (3.9, 3.10., 3.11) oder (3.16, 3.17) erhält man schließlich die Radarabbildungsgleichungen in Funktion der Orbitalelemente.

3.5. ALGORITHMUS ZUR RADARPROJEKTION AUF EINE KUGEL

Jeder Radarbildpunkt entspricht einem Radarprojektionsstrahl. Dieser wird durch die Kugel vom Radius r (Schrägdistanz) und den Doppler-Kegel mit dem Öffnungswinkel von $(180^\circ - 2 \tau)$ definiert. Die Schnittlinie beider Flächen ist ein Kreis, der durch die Gleichungen (3.16, 3.17) definiert ist.

Bei der Radareinzelbildauswertung ist die Berechnung des Schnittpunktes des kreisförmigen Radarprojektionsstrahls mit der Referenzkugel des Planeten zu bestimmen. Figur 3.11 erläutert die analytische Formulierung dieser Aufgabe. Es besteht die Gleichung:

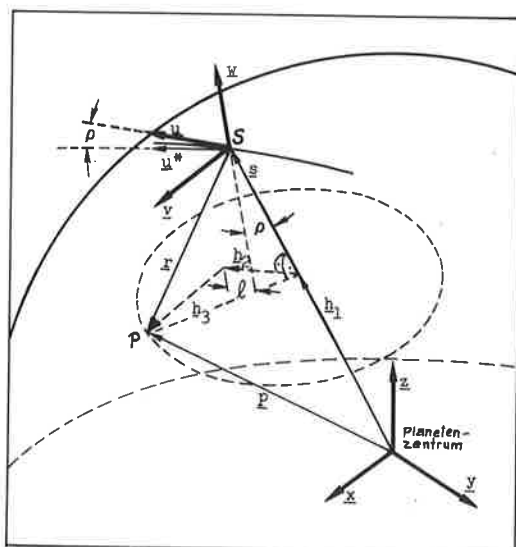
$$\underline{p} = \underline{h}_1 + \underline{h}_2 + \underline{h}_3 \tag{3.28}$$

in welcher der Hilfsvektor \underline{h}_1 die Ebene definiert, in der die Schnittlinie der Planetenoberfläche (Radius R) und der Schrägdistanz-Kugel liegt. Diese Ebene steht normal zum Ortsvektor des Satelliten. Daher gilt:

$$\underline{h}_1 = \underline{s} h_1 / s \tag{3.29}$$

Die Länge des Hilfsvektors \underline{h}_1 ist nach Fig.3.11 mit $|\underline{p}| = R$:

$$h_1 = (R^2 + s^2 - r^2) / 2 s \tag{3.30}$$



Figur 3.11: Definition zur Radarrückprojektion auf eine Kugel

Zur Berechnung der Hilfsvektoren \underline{h}_2 und \underline{h}_3 benötigt man die (rechtwinkligen) Einheitsvektoren ($\underline{u}^\bullet, \underline{v}$); \underline{v} folgt aus Gl. (3.10):

$$\underline{v} = \underline{s} \times \underline{\dot{s}} / |\underline{s} \times \underline{\dot{s}}| \quad (3.31)$$

Für \underline{u}^\bullet gilt:
$$\underline{u}^\bullet = \underline{s} \times \underline{v} / |\underline{s} \times \underline{v}| \quad (3.32)$$

Daraus ergibt sich Winkel ρ zwischen \underline{u}^\bullet und $\underline{\dot{s}}$ (oder \underline{u} , s. Gl. (3.10))

$$\cos \rho = \underline{u}^\bullet \cdot \underline{\dot{s}} \quad (3.33)$$

Damit können die Hilfsvektoren $\underline{h}_2, \underline{h}_3$ berechnet werden. Vektor \underline{h}_2 ist parallel zum Einheitsvektor \underline{u}^\bullet . Aus Fig. 3.11 folgt:

$$\underline{h}_2 = \left\{ (s - h_1) \tan \rho + \ell \right\} \underline{u}^\bullet \quad (3.34)$$

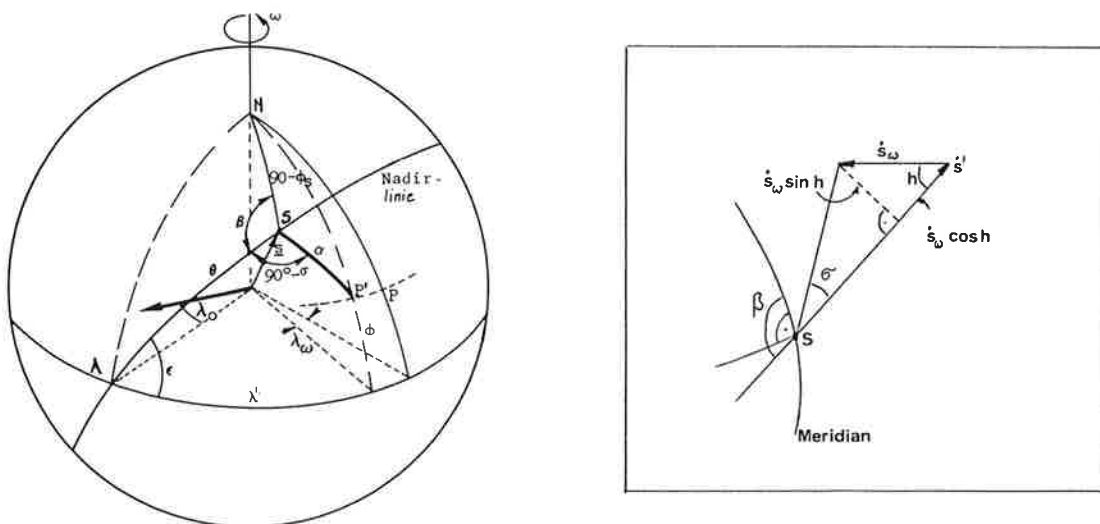
In dieser Gl. (3.34) ist ℓ die Auswirkung der Kegelform des Radarstrahls. Ein Algorithmus zur Berechnung von ℓ ist im Appendix C angegeben.

$$\underline{h}_3 = \left\{ r^2 - h_2^2 - (s - h_1)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \underline{v} \quad (3.35)$$

wobei R und r in Abb. 3.5 und 3.9b definiert sind.

3.6. SONDERFALL DER RADARPROJEKTION AUF EINE KUGEL: KREISFÖRMIGE UMLAUFBAHN, ABBILDUNG IN EINER EBENE

Wird ein sphärischer, nichtrotierender Planet aus einer kreisförmigen Satellitenbahn abgebildet, so stellt die Radarschrägaufnahme in Grunddistanzdarstellung eine äquidistante schiefe Zylinderprojektion dar (Leberl, 1975c). Jede Umlaufbahn definiert einen eigenen Referenzzylinder.



Figur 3.12: Vereinfachte Radarrückprojektion auf eine Kugel -- Definitionen

In Figur 3.12 wird die Inklination der Ebene der Umlaufbahn wiederum mit ϵ , die Satellitenposition im Orbit mit θ definiert, die geo- (planeto) graphischen Koordinaten eines Objektes sind ϕ (Breite) und $\lambda = \lambda' + \lambda_0$ (Länge). Für den Fall der Planetenumdrehung $\omega = 0$ steht die Abtastlinie im rechten Winkel zur Spur der Umlaufbahn (Nadirlinie): Winkel σ der Fig.3.12 ist Null, wenn $\omega = 0$. In diesem Fall gilt für ϕ nach dem Kosinussatz im Dreieck NSP':

$$\sin\phi = \sin\phi_s \cos\alpha - \sin\alpha \cos\phi_s \sin\beta \quad (3.36a)$$

Winkel $\lambda = \lambda' + \lambda_0$ wird über den Großkreis AP' ermittelt:

$$\cos AP' = \cos\theta \cos\alpha$$

und weiters

$$\cos \lambda' = \cos AP' / \cos\phi$$

sodaß:

$$\cos\lambda' = \cos\theta \cos\alpha / \cos\phi \quad (3.36b)$$

Winkel α ergibt sich aus der Radarbildkoordinate y_c in Grunddistanzdarstellung mit Berücksichtigung der sphärischen Krümmung des Planeten (siehe Gl. 3.4b)

$$\alpha = (y_c - y_{tc}) c_c / R \quad (3.4b)$$

Weiters gilt laut Figur 3.12 im Dreieck NAS nach dem Kosinussatz:

$$\sin\phi_s = \sin\theta \sin\epsilon$$

und nach dem Sinussatz:

$$\sin\beta = \cos\epsilon / \cos\phi_s$$

Somit können die Koordinaten ϕ, λ aus bekannten Werten von $\theta, \epsilon, \alpha, \phi_s$ für den Fall $\omega = 0$ errechnet werden.

Die Planetenumdrehungsgeschwindigkeit ω verändert die Richtung des Satellitengeschwindigkeitsvektors um einen Winkel σ . Die Geschwindigkeit \dot{s}_w des Satelliten wegen ω ist:

$$\dot{s}_w = \omega (R + H) \cos\phi_s$$

Laut Fig.3.12b gilt für den Verdrehungswinkel σ :

$$\tan\sigma = \dot{s}_w \sinh / (\dot{s}' - \dot{s}_w \cosh)$$

$$h = \beta - 90^\circ$$

Da gilt: $\cosh = \cos\epsilon / \cos\phi_s$

$$\sinh = \cos\theta \sin\epsilon / \cos\phi_s$$

und schließlich:

$$\tan\sigma = \omega(R + H) \cos\theta \sin\epsilon / (\dot{s}' - (R + H) \cos\epsilon) \quad (3.37)$$

Die Abtastlinie bildet nun mit der Nadirlinie einen um σ von 90° abweichenden Winkel. Analog den Gl. (3.36) ergeben (ϕ, λ) sich nun wie folgt:

$$\sin\phi = \sin\theta \cos\alpha \sin\epsilon - \sin\alpha \cos\phi_s \sin(\beta + \sigma) \quad (3.38a)$$

$$\cos\lambda' = (\cos\theta \cos\alpha + \sin\alpha \sin\theta \sin\sigma) / \cos\phi \quad (3.38b)$$

$$\lambda = \lambda' + \lambda_o + \lambda_\omega$$

Der Winkel λ_ω ist eine zusätzliche Komponente von λ wegen der Planetenumdrehung: Während der Bewegung des Satelliten entlang seiner Bahn vom aufsteigenden Knotenpunkt A bis zur Position S trägt die Planetenumdrehung λ_ω :

$$\lambda_\omega = \omega(R + H)\theta/\dot{s}'$$

Ein drittes Gleichungspaar zur Berechnung von ϕ , λ wird erhalten, wenn davon ausgegangen wird, daß die Satellitenposition (ϕ_s, λ_s) und das Azimut ϵ' des Geschwindigkeitsvektors \dot{s} aus vorhergehenden Berechnungen der Umlaufbahn bekannt sind.

Für diesen Fall ergibt sich wiederum aus dem Kosinussatz im Dreieck NSP':

$$\sin\phi = \sin\phi_s \cos\alpha - \cos\phi_s \sin\alpha \sin\epsilon' \quad (3.39a)$$

und aus dem Sinussatz, ebenfalls im Dreieck NSP':

$$\sin(\lambda - \lambda_s) = \sin\alpha \cos\epsilon' / \cos\phi \quad (3.39b)$$

3.7. ALGORITHMUS ZUR BERECHNUNG DER "RADAR-ABTASTLINIE"

Die Kenntnis der "Radarabtastlinie" oder des momentanen Gesichtsfeldes (Spur) ist für die Planung und Ausführung eines Satellitenradarprojektes von Bedeutung. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen der Abtastlinie des realen und des synthetischen Radarstrahles zu treffen.

Die Radarabtastlinie ist die Schnittlinie des Doppler-Kegels mit der Oberfläche des Planeten. Wird als unabhängige Variable dieser Berechnung die schiefe Distanz r eingeführt, so ist der Algorithmus vom Abschnitt 3.5. anzuwenden.

Wird jedoch nicht die Schrägdistanz r als unabhängige Variable eingeführt, sondern der Erhebungswinkel Ω , so kann die Projektion des Radarbildes auf ein Ellipsoid mit dem im folgenden angegebenen Algorithmus beschrieben werden.

3.7.1. Synthetische Abtastlinie

Der Doppler-Kegel des synthetischen Radarstrahls wird durch seine Erzeugende \underline{p}_g beschrieben. Die Abtastlinie ist die Schnittlinie mit der elliptischen Referenzfigur des Planeten.

Der Winkel τ und Ω (Kegelkomplement- und Erhebungswinkel) definieren die Erzeugende \underline{p}_g (Einheitsvektor in Richtung des Vektors \underline{r} , vergleiche Gl.3.11, Abb.3.9b):

$$\underline{p}_g = \sin\tau \underline{u} + \cos\tau \sin\Omega \underline{v} + \cos\tau \cos\Omega \underline{w} \quad (3.40a)$$

oder:

$$\underline{p}_g = \sin\tau \underline{u} + (\sin^2\Omega - \sin^2\tau)^{\frac{1}{2}} \underline{v} + \cos\Omega \underline{w} \quad (3.40b)$$

Der Schnittpunkt von \underline{p}_g und dem Ellipsoid kann nach dem durch Dallas^x (1973) beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Dieses ist im Appendix B im Detail angegeben. Ein ähnlicher Rechenvorgang wurde durch Puccinelli^x (1976) veröffentlicht. Im folgenden sei nur das Prinzip kurz wiedergegeben. Die Vektoren \underline{s} und \underline{p}_g spannen eine Ebene durch den Koordinatenursprung, normal zu einem

Hilfsvektor \underline{h}_4 auf:

$$\underline{h}_4 = (\underline{s} \times \underline{p}_g) / |\underline{s} \times \underline{p}_g| \quad (3.41)$$

Die Ebene schneidet das Ellipsoid entlang einer Ellipse, die durch die Einheitsvektoren \underline{h}_5 , \underline{h}_6 der großen und kleinen Halbachse beschrieben werden kann. Man erhält \underline{s} und \underline{p}_g in Funktion von \underline{h}_5 , \underline{h}_6 als:

$$\underline{s} = (\underline{s} \cdot \underline{h}_5) \underline{h}_5 + (\underline{s} \cdot \underline{h}_6) \underline{h}_6 \quad (3.42)$$

$$\underline{p}_g = (\underline{p}_g \cdot \underline{h}_5) \underline{h}_5 + (\underline{p}_g \cdot \underline{h}_6) \underline{h}_6 \quad (3.43)$$

Die Bestimmung von \underline{h}_5 , \underline{h}_6 und Transformation von \underline{s} , \underline{p}_g in ein durch \underline{h}_5 , \underline{h}_6 aufgespanntes ebenes Koordinatensystem vereinfacht das räumliche Problem zu einem ebenen. Der Schnittpunkt \underline{p} wird im \underline{h}_5 , \underline{h}_6 -System auf einfache Weise gefunden und in das planetozentrische \underline{x} , \underline{y} , \underline{z} -System zurückgerechnet. Details des Rechenvorganges finden sich im Appendix B.

3.7.2. Reale Abtastlinie

In der Berechnung der realen Abtastlinie (Radarspur) muß das Koordinatensystem \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} der synthetischen Antenne durch das System \underline{u}' , \underline{v}' , \underline{w}' ersetzt werden, das durch die reale Antenne bestimmt wird und vollkommen unabhängig vom Geschwindigkeitsvektor \underline{s} ist. Es ergibt sich \underline{u}' nach Gl.(3.15a):

$$\underline{u}' = \cos \phi' \cos \kappa' \underline{x} + \cos \phi' \sin \kappa' \underline{y} + \sin \phi' \underline{z} \quad (3.44a)$$

und weiters gilt für \underline{v}' , \underline{w}' :

$$\underline{v}' = (\underline{u}' \times \underline{s}) / |\underline{u}' \times \underline{s}|$$

$$\underline{w}' = (\underline{u}' \times \underline{v}') / |\underline{u}' \times \underline{v}'|$$

Die Winkel ϕ' , κ' beschreiben die photogrammetrische Kippung und Kantung der realen Antenne. Der Rollwinkel ω' wird gleich Null gesetzt.

Für die Erzeugende \underline{p}'_g gilt somit:

$$\underline{p}'_g = \sin r \underline{u}' + \cos r \sin(\Omega^*)' \underline{v}' + \cos r \cos(\Omega^*)' \underline{w}' \quad (3.45)$$

Die Berechnung des Schnittpunktes von \underline{p}'_g mit der Planetenoberfläche kann nach dem im Appendix B beschriebenen Algorithmus erfolgen.

3.8. UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEM REALEN UND SYNTHETISCHEN RADARSTRAHL

In Radarsystemen mit synthetischer Apertur wird meist verlangt, daß die Abtastlinien des realen und synthetischen Radarstrahls ident sind. Dies wird durch bestimmte Maßnahmen während des Abbildungsprozesses oder während der Korrelation der Radarsignale erreicht.

3.8.1. Drehung der realen Antenne

Eine einfache Maßnahme, zur Erzeugung identer Abtastlinien für den realen und synthetischen Radarstrahl ist eine entsprechende Orientierung der realen Antenne (siehe Figur 3.13a). Das bedeutet, daß die Einheitsvektoren \underline{u} und \underline{u}' zusammenfallen müssen, welche parallel zum Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}$, und in der Längsachse der realen Antenne liegen. Aus den Gleichungen (3.26), (3.27) und (3.44) ergeben sich Gleichungen für die Orientierungswinkel ϕ' , κ' der realen Antenne.

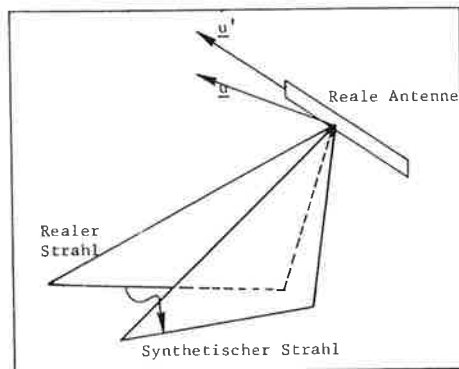
$$\sin\phi' = \sin(\alpha + \theta + \psi)\sin\epsilon \quad (3.46)$$

$$\tan\kappa' = (\dot{s}'_y - \omega s'_x) / (\dot{s}'_x + \omega s'_y)$$

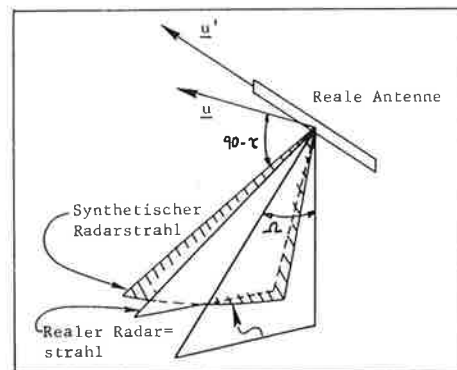
Diese können daher aus Größen berechnet werden, die während der Satellitenmission in Funktion der Zeit bekannt sind.

3.8.2. Bildkorrelation mit Dopplerfrequenz

Die realen und synthetischen Radarabtastlinien können auch durch Modifizierung des synthetischen Strahls zur Deckung gebracht werden. Hierzu wird die Dopplerfrequenz der Korrelation entsprechend geändert, wie dies in Figur 3.13b illustriert wird.



Figur 3.13a: Verdrehung der realen Antenne, um die Radarimpulse im synthetischen Radarstrahl auszusenden.



Figur 3.13b: Einführung eines Dopplerkegels mit Komplementärwinkel τ , um synthetischen Strahl mit dem realen in Koinzidenz zu bringen.

Zur Berechnung des Winkels τ müssen die Erzeugenden \underline{p}_g und \underline{p}'_g des realen und des synthetischen Radarstrahls zur Deckung gebracht werden. Werden die Komponenten der Vektoren \underline{p}_g und \underline{p}'_g mit (g_x, g_y, g_z) und (g'_x, g'_y, g'_z) bezeichnet, so erhält man aus Gl. (3.40b) und (3.45):

$$\begin{aligned} g_x/g_y &= g'_x/g'_y \\ g_x/g_z &= g'_x/g'_z \end{aligned} \quad (3.47)$$

Gl.(3.47) enthalten als unabhängige Variable den Erhebungswinkel $(\Omega)'$ im realen Apertursystem, und als abhängige die Werte τ und Ω des synthetischen Systems. Für verschiedene Werte von $(\Omega)'$ ergeben sich unterschiedliche Winkel τ und Ω , von denen nur ein einziger Wert τ verwendet werden kann. Dies sollte ein Mittelwert aus den für den minimalen, mittleren und maximalen Erhebungswinkel $(\Omega)'$ berechneten Werten sein.

3.8.3. Methodenvergleich

Unterschiedliche Radarabtastlinien werden durch eine elliptische Satellitenumlaufbahn verursacht, nicht aber durch eine kreisförmige. Außerdem verursacht die Umdrehungsgeschwindigkeit des Planeten eine Verdrehung des synthetischen Radarstrahles (siehe Abschnitt 3.4, Gl. 3.26 und Abschnitt 3.6, Gl. 3.37).

Die Kompensierung von Unterschieden zwischen den realen und synthetischen Radarabtastlinien mittels Antennendrehung wäre vom radargrammetrischen Standpunkt vorzuziehen. Denn für den Fall $\tau = 0$ kann eine vollkommene Deckung der Abtastlinien erreicht werden, und die Veränderung der Antennenorientierung hat keinen Einfluß auf die Bildgeometrie.

Die Kompensierung durch Veränderung des Squintwinkels τ führt zu einer Bildgeometrie, die jener eines Systems mit realer Apertur nahekommt. Da jede physische Drehung eines Teils eines Satelliten Energie verbraucht, wird dieses Verfahren dem erstgenannten vorgezogen.

3.9. PROJEKTIONSEIGENSCHAFTEN VON SATELLITENRADARBILDERN

3.9.1. Einleitung

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen Satellitenradaraufnahmen und kartographischen Projektionen behandelt. Dabei wird von Radarbildern ausgegangen, welche bei kreisförmiger Umlaufbahn um einen sphärischen Planeten auftreten. Weiters wird der Einfluß einer Exzentrizität der Umlaufbahn untersucht.

Im folgenden werden erst mathematische Beziehungen zur Bestimmung der Verzerrungen der Radarbilder und der Kartenprojektionen abgeleitet und diese dann verglichen.

3.9.2. Berechnung der Verzerrungen der Radarbilder

Projektionsverzerrungen in Radarbildern können mit Hilfe der TISSOT-Indikatrix beschrieben werden (Rinner, 1948; Leberl, 1971c, 1972a). Für die Diskussion mit anderen Geowissenschaftlern werden numerisch ermittelte Werte für Maßstabsunterschiede in Richtung der Umlaufbahn und quer dazu als wesentlich angesehen. Daher werden in der Folge diese Verzerrungen des Radarbildes abgeleitet.

Hiezu wird von drei Bildpunkten $p_1 (x_b, y_b)$, $p_2 (x_b + \Delta x_b, y_b)$, $p_3 (x_b, y_b + \Delta y_b)$ ausgegangen, die ein rechtwinkeliges Dreieck formen. Werden die entsprechenden Objektpunkte in einer mathematischen Projektion abgebildet, so erhält man die Kartenpunkte $p_1 (x_1, y_1)$, $p_2 (x_2, y_2)$, $p_3 (x_3, y_3)$ (Siehe Fig. 3.14). Man kann nun die Maßstabsverzerrung S_c und die Winkelverzerrung S_α durch die folgenden Beziehungen einführen:

$$S_c = (S_x - S_y) / S_x \quad (3.48a)$$

$$S_\alpha = \arctan((x_3 - x_1) / (y_3 - y_1)) - \arctan((x_2 - x_1) / (y_2 - y_1)) - 90^\circ \quad (3.48b)$$

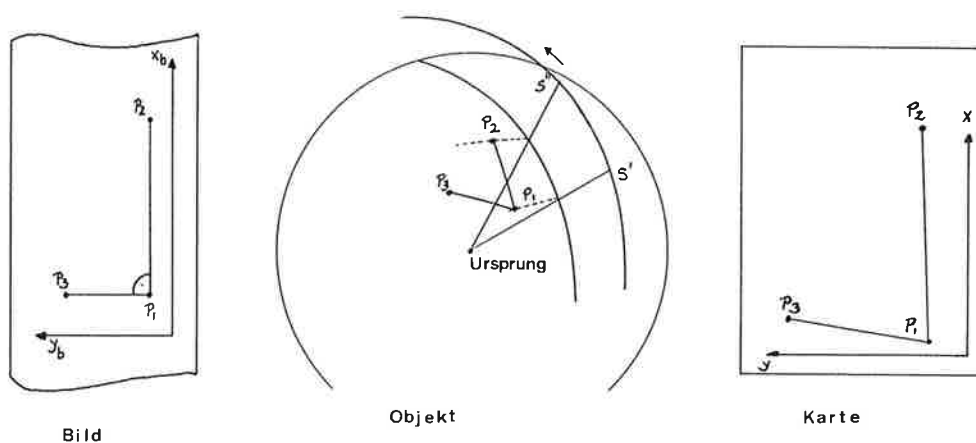
wobei

$$S_x = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{\frac{1}{2}} / \Delta x_b$$

$$S_y = ((x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2)^{\frac{1}{2}} / \Delta y_b$$

Zum Studium der Eigenschaften der Radarabbildung wurde ein Computerprogramm erstellt, das auch die Berechnung der Radarabtastlinien auf dem Ellipsoid ermöglicht.¹⁾ Als Eingangsdaten werden die Parameter des (rotierenden) Referenzellipsoides und der Satellitenumlaufbahn benützt. Das Programm berechnet in Funktion der wahren Anomalie θ des Satelliten und des Erhebungswinkels Ω die Radarabtastlinie und die Verzerrungen S_α , S_c .

Zu diesem Zwecke werden erst der Positionsvektor \underline{s} und der Geschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{s}}$ der Raumsonde unter Verwendung der Gl. (3.18) bis (3.27) bestimmt. Hierauf wird mit den Gl. (3.40) bis (3.43) und dem von Dallas^x (1973) angegebenen Algorithmus (Schnittpunkt Raumvektor und Ellipsoid) die Abtastlinie auf dem Ellipsoid ermittelt. Die Projektionsverzerrungen werden nach den Gl.(3.48) für Gruppen von je drei Ellipsoidpunkten \underline{p}_1 , \underline{p}_2 , \underline{p}_3 , bestimmt, die im Bild ein rechtwinkeliges Dreieck formen.



Figur 3.14: Definition der Bild- und entsprechenden Objekt- sowie Kartenpunkte p_1, p_2, p_3 für die Ermittlung von Maßstabs- und Winkelverzerrungen.

Für jede Position \underline{s} des Satelliten und jeden Erhebungswinkel Ω wird erst der Zeitpunkt t der Abbildung und die Schrägdistanz r bestimmt. Daraus werden Radarbildkoordinaten ermittelt.

Wird die Schrägdistanz r direkt dargestellt, so kann mit Hilfe der Gl. (3.3) und (3.4) eine Darstellung mit Grunddistanzen y_g oder sphärischen Distanzen y_c erfolgen. Dies kann durch eine digitale Bildverarbeitung (Nachbehandlung) bewirkt werden.

Die in diesen Gleichungen auftretende Höhe des Satelliten über dem Nadir N wird aus dem Schnitt des Vektor \underline{w} mit der Referenzfigur erhalten (Fig.3.15). Der in der Ebene der Umlaufbahn, senkrecht auf \underline{s} liegende Einheitsvektor \underline{w} wird nach Gl.(3.10) berechnet.

Für die Abbildung in der Azimut(Flug-)richtung können verschiedene Annahmen eingeführt werden. Am einfachsten wäre eine konstante Transportgeschwindigkeit des Signalfilms, sodaß die Koordinate x_b im Film proportional der Zeit t ist. Eine verbesserte Annahme wird durch eine Synchronisierung des Filmtransportes mit der Geschwindigkeit des Nadirs N am Ellipsoid erreicht (Figur 3.15). Die Länge der Nadirlinie und x_b -Bildkoordinate wird durch numerische Integration der NN-Werte bestimmt. Das Computerprogramm erlaubt die Berechnung nach beiden Annahmen.

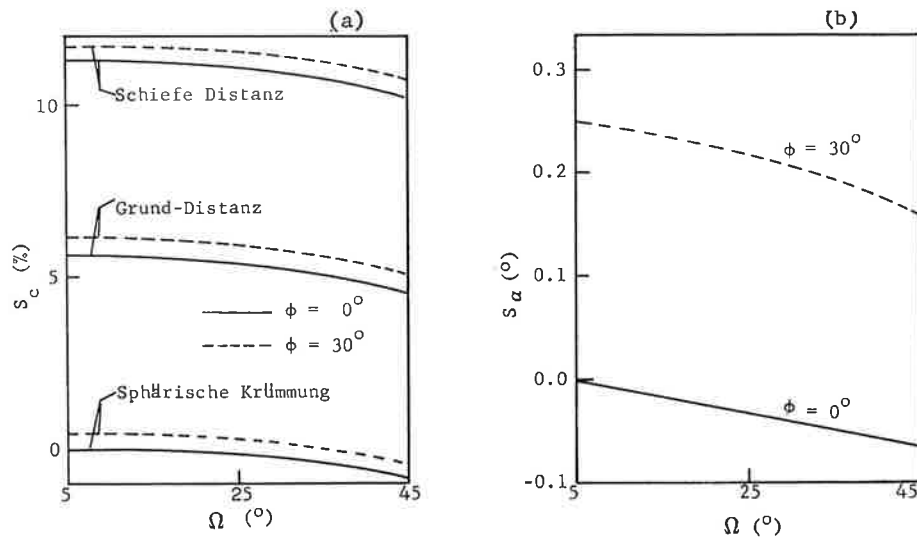
1) In Fortran V am Univac 1108 Computer des JPL. Kopien dieses Programms werden vom Autor auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

$$\begin{aligned}
 x &= R \cos \phi_n \cos \lambda_n \\
 y &= R \cos \phi_n \sin \lambda_n \\
 \sin \phi_n &= \cos \phi_T \cos \phi \cos(\lambda - \lambda_T) + \sin \phi \sin \phi_T \\
 \sin \lambda_n &= (\sin \phi - \sin \phi_n \sin \phi_T) / (\cos \phi_n \cos \phi_T)
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

Diese fünf Projektionen werden im folgenden zur Analyse der Projektionseigenschaften des Radarschrägbildes verwendet.

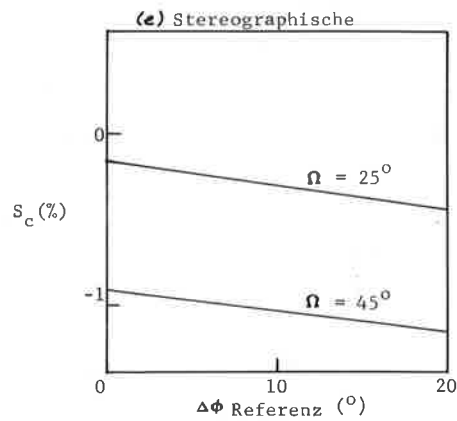
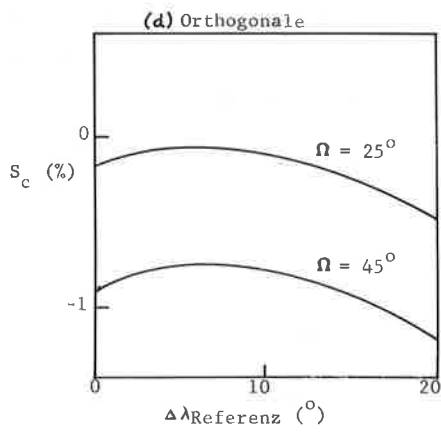
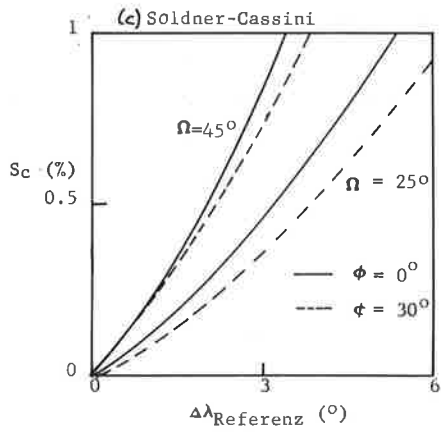
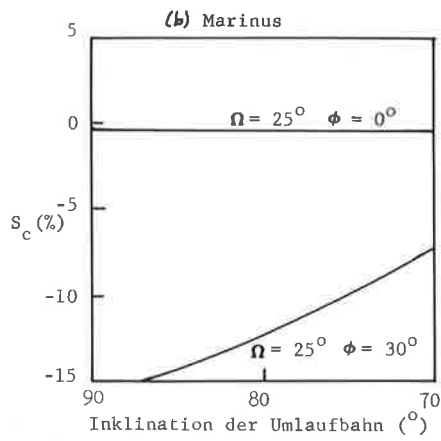
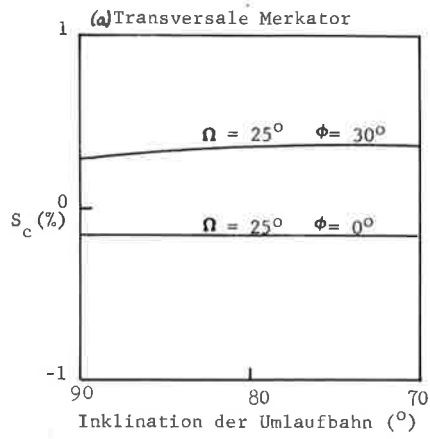
3.9.4 Bildverzerrungen

Die Form, in welcher die gemessenen Schrägdistanzen r im Bild wiedergegeben werden, beeinflusst die Geometrie des Radarbildes. Figur 3.16 zeigt einen Vergleich der transversalen Merkatorprojektion mit der Bildgeometrie einer Schrägdistanzdarstellung und zweier Grunddistanzdarstellungen, mit y_b -Bildkoordinaten nach den Gl. (3.3b, 3.4c). Dabei wird, wie auch in den anderen Diagrammen dieses Abschnittes, eine Umlaufbahn in 800 km Höhe angenommen (wenn nicht ausdrücklich anderes vermerkt ist). Die Berechnungen erfolgten für Gruppen von je 3 Punkten im Radarbild, die in Flugrichtung und quer dazu voneinander 100 km entfernt sind ($\Delta x = \Delta y = 100$ km). Aus Fig. 3.16 folgt, daß nur bei Berücksichtigung der sphärischen Krümmung des Planeten eine geringe Maßstabsverzerrung im Bild auftritt. Für Radarbilder mit horizontalen Distanzen liegt die Maßstabsdifferenz S_c bei 5 %, für schiefe Distanzen bei 10 %. Die differentiellen Maßstabsunterschiede nehmen mit dem Erhebungswinkel Ω und mit der geographischen Breite ϕ zu. Die Winkelverzerrung ist in allen Fällen gering.



Figur 3.16: Verzerrung eines Radarbildes im Vergleich zur Transversalen Merkatorprojektion; (a) Maßstabsverzerrung S_c für drei Darstellungen der Querkoordinate; (b) Winkelverzerrung S_α

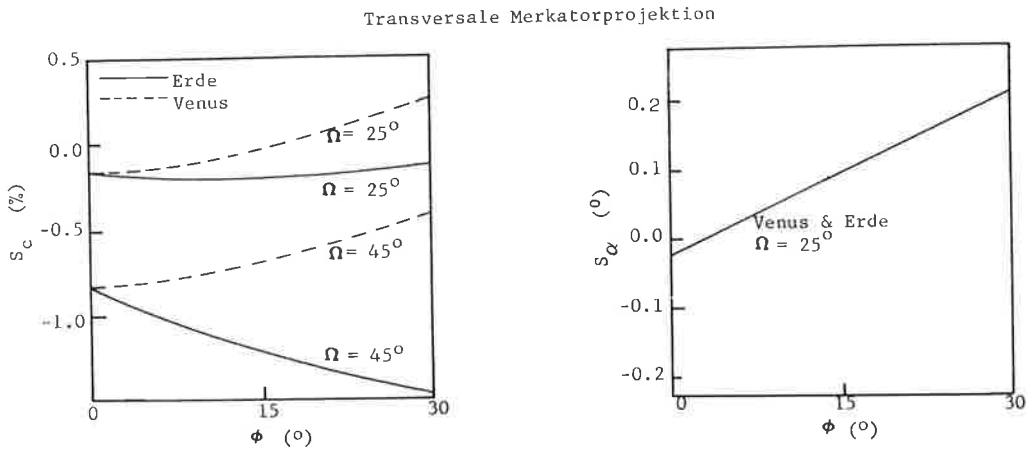
Ein Vergleich der Radarbildgeometrie für sphärische Distanzen mit gebräuchlichen Kartenprojektionen wird in Fig. 3.17 gezeigt. Die transversale Merkatorprojektion weist global die kleinsten Unterschiede gegenüber dem Radarbild auf (Fig. 3.17a). Die Soldner-Cassini-Projektion entspricht der Radargeometrie für geringe Längenunterschiede $\Delta\lambda$ zwischen dem Bezugsmeridian der Projektion und dem Nadir der Satellitenumlaufbahn. Mit zunehmendem $\Delta\lambda$ nimmt auch der Unterschied zwischen den Projektionen rasch zu und erreicht mit $\Delta\lambda = 3^\circ$ etwa 1 % (Fig. 3.17c).



Figur 3.17: Maßstabsverformung eines Satellitenradarbildes im Vergleich mit verschiedenen Kartenprojektionen (planetare Krümmung berücksichtigt.)

Die Marinusprojektion ist nur in Äquaturnähe ($\phi = 0$) dem Radarbild ähnlich (Fig.3.17b). Verzerrungen der Orthogonalprojektion auf eine Tangentialebene (s.Fig.3.17d) und der stereographischen Projektion (s.Fig.3.17e) gegenüber dem Radarbild nehmen mit wachsendem Abstand des Berührungspunktes der Projektionsebenen vom abgebildeten Punkt zu. In beiden Fällen erreicht die Verzerrung bei einem Abstand von etwa 10° den Wert von 1 %.

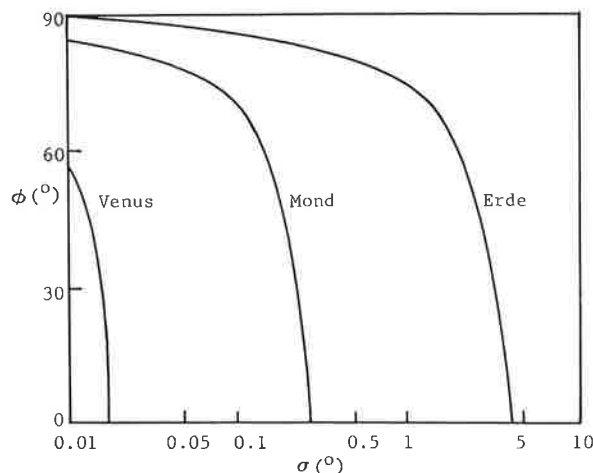
Der Einfluß der Rotation des Planeten auf die Abweichung des Radarbildes von der transversalen Merkatorprojektion wird in Fig.3.18 dargestellt. Wegen der Erdrotation beschreibt der Satellitennadir keinen Großkreis. Da aber wegen der Verdrehung des Geschwindigkeitsvektors auch die Radarabtastebene entsprechend verdreht wird, bleiben Winkel- und Maßstabsverzerrungen klein.



Figur 3.18: Differentielle Maßstabsunterschiede S_c und Winkelverformung S_α wegen Planetenumdrehung ω .

Die Abweichungen wurden für die Erde ($\omega = 0.073\text{mrad/sec}$) und für die Venus ($\omega = 0.0003\text{mrad/sec}$) berechnet.

In diesem Zusammenhang wird auf Gl.(3.37) verwiesen, die den algebraischen Ausdruck für die Verdrehung σ des Satellitengeschwindigkeitsvektors \dot{s} zufolge der Rotationsgeschwindigkeit ω darstellt. Fig.3.19 zeigt daraus berechnete numerische Werte für die Erde, den Mond und die Venus. Daraus geht hervor, daß im Falle einer polaren Erdumlaufbahn σ in Äquaturnähe etwa 4° beträgt.



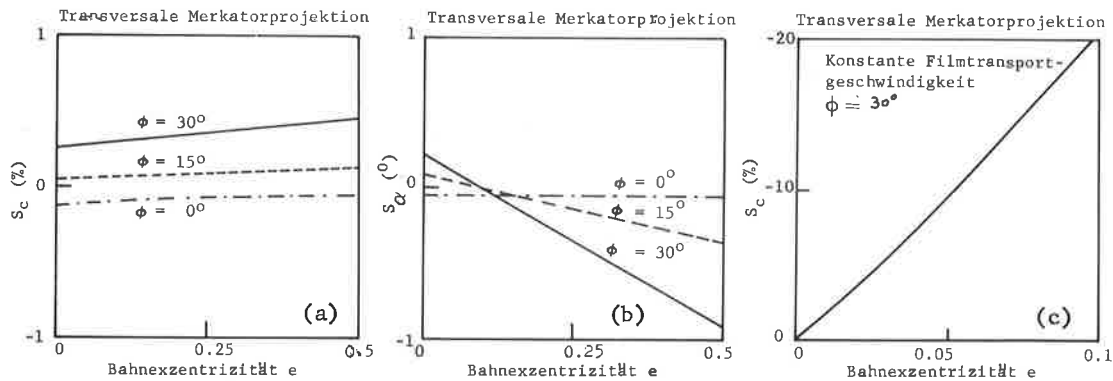
Figur 3.19: Verkantungswinkel σ des synthetischen Radarstrahls wegen Planetenumdrehung; polare Umlaufbahn des Satelliten ($\epsilon = 90^\circ$).

Die Exzentrizität der Satellitenumlaufbahn verursacht sekundäre Bildverzerrungen, die sich den primären Projektionsverzerrungen überlagern. Fig.3.20 zeigt die Abweichungen der Radarbildgeometrie von einer transversalen Merkatorprojektion mit zunehmender Exzentrizität der Umlaufbahn. Diese sind gering: selbst eine Exzentrizität von $e = 0.5$ bewirkt bei synchronisierter Filmgeschwindigkeit (Fälle a,b) nur unwesentlich größere Verzerrungen als $e = 0.0$ (Kreisbahn).

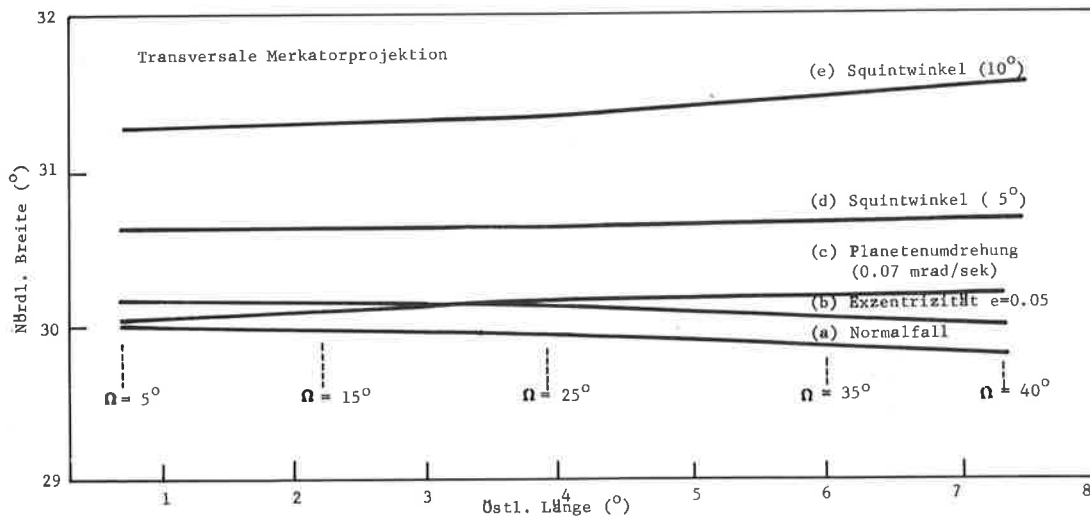
Bei konstanter Filmtransportgeschwindigkeit nehmen hingegen die Bildverzerrungen mit wachsender Exzentrizität rasch zu.

3.10. BEISPIEL ZUR BERECHNUNG DER RADARABTASTLINIE

Das für die Untersuchung der Projektionseigenschaften von Radarbildern entwickelte Computerprogramm¹⁾ ermöglicht auch die Berechnung von Radarabtastlinien. Als Beispiel werden diese in einer transversalen Merkator-Projektion graphisch dargestellt.



Figur 3.20: Maßstabs- (a), (c) und Winkelverzerrung (b) eines Radarbildes wegen Exzentrizität der Umlaufbahn; (a), (b) mit synchronisierter Filmtransportgeschwindigkeit; (c) mit konstanter Geschwindigkeit des Filmtransports.



Figur 3.21: Radarabtastlinien aus einer konstanten Sensorposition ($\phi = 30^\circ$, $\lambda = 0^\circ$; Abstand vom Erdzentrum = 7178 km).

1) Siehe Fußnote auf Seite 39

Figur 3.21 zeigt fünf Radarabtastrlinien für einen Satelliten (a) mit kreisförmiger Umlaufbahn ohne Planetenumdrehung, und mit $\tau = 0^\circ$; (b) mit einer elliptischen Umlaufbahn, $e = 0.05$, ohne Planetenumdrehung, $\tau = 0^\circ$; (c) mit einer kreisförmigen Umlaufbahn, $\tau = 0$, mit Planetenumdrehung ($\omega = 0.0729$ mrad/sec); (d) mit einer kreisförmigen Umlaufbahn, $\tau = 5^\circ$, ohne Planetenumdrehung; (e) wie (d), jedoch mit $\tau = 10^\circ$. Die Satellitenbahn ist polar (Inklination von 90°), und die Apsidenlinie der elliptischen Umlaufbahn im Fall (b) liegt in der Äquatorebene (Argument der Periapsis, $\alpha = 0^\circ$).

Figur 3.21 zeigt den Einfluß verschiedener Projektparameter und unterstreicht die Bedeutung der "Radarabtastrlinie" für die Projektplanung und Datengewinnung. Eine eingehendere numerische Analyse der Geometrie der Radarabtastrlinien wird in der vorliegenden Untersuchung nicht ausgeführt.

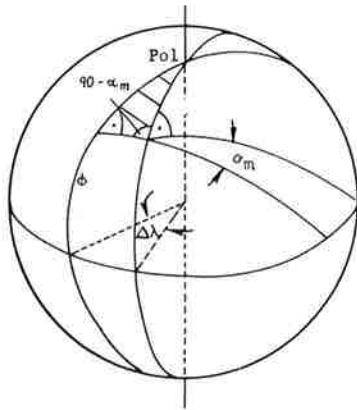
3.11. VERDREHUNG DER BILDLINIEN IN ÜBERLAPPENDEN RADARAUFNAHMEN

Da jede Satellitenradaraufnahme eine Projektion auf einen für jeden Orbit spezifischen Referenzzyylinder darstellt, kommt es zu einer Verdrehung α_m von Bildlinien von einer Aufnahme zur nächsten. Figur 3.22 zeigt, daß diese Verdrehung α_m gleich der Meridiankonvergenz ist. Eine Kurve der Planetenoberfläche, die in einem Radarbild als gerade Linie (im besonderen als $x_b = \text{constant}$) abgebildet wird, kann im überlappenden Bildstreifen eine Kurve höherer Ordnung sein. Nähert man diese Kurve auch durch eine Gerade an, so schließt diese mit der y-Bildachse einen Winkel α_m ein (Figur 3.22). Für den Fall einer polaren Umlaufbahn gilt nach Fig.3.22:

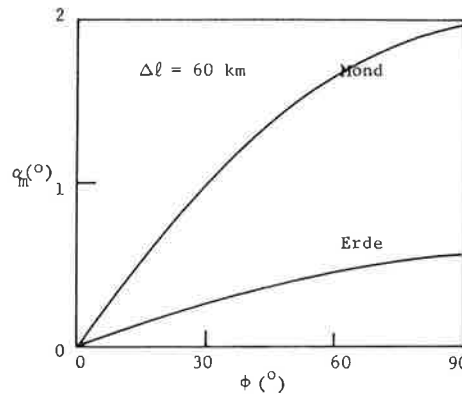
$$\cos(90 - \alpha_m) = \sin\phi \sin\Delta\lambda \tag{3.54}$$

oder

$$\sin \alpha_m = \sin\phi \sin\Delta\lambda = \sin\phi \sin(\Delta\ell/R) \tag{3.55}$$



Figur 3.22: Effekt der Meridiankonvergenz auf überlappende Radarbilder



Figur 3.23: Verdrehungswinkel α_m einer Bildlinie in überlappenden Radarbildern.

Gl.(3.55) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Bildlinienverdrehung α_m , der planetographischen Breite ϕ , und dem in km ausgedrückten Abstand $\Delta\ell$ zwischen den Nadirlinien der Satellitenumlaufbahnen. Der Effekt ist in der Nähe der Pole maximal. Die gegebene graphische Darstellung in Figur 3.23 zeigt weiters den inversen Einfluß des Radius des Planeten, das heißt, α_m wird größer, wenn der Radius kleiner ist.

3.12. ÜBERSICHT ÜBER VERFAHREN DER EINZELBILDAUSWERTUNG

3.12.1 Allgemeines

Messungen vereinzelter Geländedetails in Radareinzelbildern wurden u.a. durch Rydstrom (1968) Dalke u.a. (1968) und Leberl (1975b) beschrieben. Die in diesen Referenzen angeführten Methoden der Messung von planimetrischen Abständen, Winkeln und topographischen Höhen (auf Grund von Schattentlängen), gelten auch für Satellitenradaraufnahmen. Diese Verfahren sind im wesentlichen für die Bildinterpretation von Bedeutung, nicht aber für die systematische Herstellung von Karten (Bildplänen und Linienkarten). Sie sind daher nicht Gegenstand des vorliegenden Abschnittes, der die Umbildung von Radaraufnahmen in eine Kartenprojektion zum Ziel hat.

Rechnerische und methodische Gesichtspunkte der Einzelbildauswertung von Seitwärts-Radaraufnahmen wurden in früheren Arbeiten behandelt (Leberl, 1971a; 1972a; 1975a). Dabei wurde auf die Möglichkeit der graphischen, photographischen und numerischen Entzerrung, sowie auf Details des mathematischen Modells des Umbildungsvorganges unter Voraussetzung einer ebenen Objektfläche eingegangen.

In den letzten Jahren hat der Begriff des Digitalen Höhenmodelles (DHM) Eingang in das Vermessungswesen gefunden. In der Photogrammetrie gewinnt die Technologie der "Digitalen Bildverarbeitung (DBV)" zunehmend an Bedeutung. Beide Konzepte beeinflussen die Satellitenradargrammetrie. Denn Satellitenradarbilder werden in Zukunft in digitaler Form vorliegen, sodaß eine Digitalverarbeitung notwendig sein wird. Außerdem werden solche Aufnahmen zum Zwecke der Informationsgewinnung über unsere Umwelt in vielen Gebieten mehrmals im Jahre wiederholt werden. Diese "multitemporalen" Aufnahmen müssen miteinander verglichen werden. Dabei wird auch die Höheninformation (DHM) zur Korrektur der Einzelbilder benutzt. Das Verfahren der Benutzung des DHM für die Einzelaufnahme wird von Makarović^x (1973) als "Digital Mono-Plotting (DMP)" (= Digitale Einzelauswertung) bezeichnet. Dieses Verfahren und die digitale Bildverarbeitung werden wegen ihrer Bedeutung für die Satellitenradargrammetrie im folgenden diskutiert.

3.12.2 Digitale Einzelauswertung (Digital Mono-Plotting)

Die digitale Auswertung einzelner Luftbilder wurde in den U.S.A. am Rome Air Development Center entwickelt (Hall^x, 1973). Unabhängig davon wurde diese Methode in Europa durch Makarović^x (1973) vorgeschlagen. In der Folge wird angenommen, daß relevante planimetrische Bilddetails der Einzelaufnahme digitalisiert wurden, und jedem digitalisierten Punkt mittels eines digitalen Höhenmodells eine Geländehöhe zugeordnet ist. Die digitale Datenmenge kann nun in eine Kartenprojektion (mit Berücksichtigung der Radialverschiebung wegen Geländereiefs) transformiert werden.

Eine Methode der radargrammetrischen Einzelauswertung folgt, wenn der zu jedem Bildpunkt gehörige Punkt des DHM aufgesucht wird. Ist die Zuordnung zwischen Bild- und Geländepunkten bekannt, so können digitalisierte Bilddetails mit Hilfe von 'künstlichen' Paßpunkten in die Kartenprojektion transformiert werden. Im folgenden wird die Bestimmung des zu einem Geländepunkt \underline{g} gehörigen Bildpunktes sowie der umgekehrte Prozess beschrieben.

Der Ortsvektor \underline{s}_ℓ und der Geschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{s}}_\ell$ des Sensors sind in bestimmten regelmäßig aufeinanderfolgenden Zeitpunkten t_ℓ bekannt. Gracie u.a. (1970, 1972) geben eine Methode an zur Bestimmung des Schnittpunktes \underline{s}_g der Flugbahn des Sensors mit der zu einem Geländepunkt \underline{g}

gehörigen Ebene des Dopplernulls. Die Flugbahn wird durch ein Polygon angenähert; die Seiten beginnen in den Punkten \underline{s}_l in Richtung $\dot{\underline{s}}_l$. Für den Abstand e_l zwischen \underline{s}_l und \underline{s}_g gilt (siehe Figur 3.24):

$$e_l = \dot{\underline{s}}_l \cdot (\underline{s}_l - \underline{g}) / \dot{\underline{s}}_l$$

und weiters

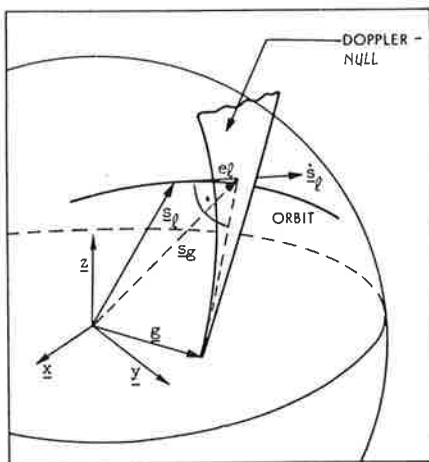
$$\underline{s}_g = \underline{s}_l + \underline{s}_l e_l / \dot{\underline{s}}_l \quad (3.56)$$

Mit Hilfe von \underline{s}_g werden der Aufnahmezeitpunkt t_g und die Schrägdistanz r_g (die Radarbildkoordinaten) ermittelt. Für jeden DHM-Punkt \underline{g} wird ein lineares Stück der Flugbahn aufgesucht, das der Bedingung

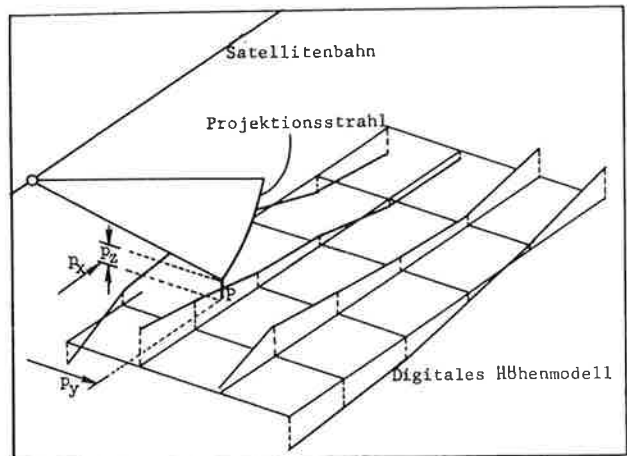
$$t_l \leq t_g < t_{l+1}$$

entspricht.

Greve und Cooney (1973) entwickeln ein anderes Computerprogrammsystem für die digitale Auswertung von einzelnen Radarbildern. Für jeden Punkt des digitalisierten Bildes wird der Projektionsstrahl mit einer Horizontalebene in der Höhe p_z^\bullet geschnitten, welche entweder die Höhe des vorhergehenden Punktes oder der höchste Punkt des DHM ist. Dies ergibt den Ortsvektor $\bar{\underline{p}} = (\bar{p}_x, \bar{p}_y, p_z^\bullet)$. Die tatsächliche zu \bar{p}_x, \bar{p}_y gehörende Geländehöhe ist \bar{p}_z . Es wird p_z^\bullet um ein vorgegebenes Intervall an \bar{p}_z gerückt und der Vorgang solange wiederholt, bis der Unterschied $(\bar{p}_z - p_z^\bullet)$ kleiner als ein vorgegebenes Intervall wird. Nun wird in einigen Punkten $g_i, i = 1, \dots, m$ des DHM eine polynomiale Fläche interpoliert und der Radarprojektionsstrahl mit dieser Fläche zum Schnitt gebracht (Fig. 3.25). Der Schnittpunkt ist die Lösung \underline{p} .



Figur 3.24: Aufsuchen des Punktes der Satellitenbahn, aus dem Objektpunkt \underline{g} abgebildet wurde.



Figur 3.25: Schnitt des Projektionsstrahles mit einem digitalen Höhenmodell.

Durch dieses Verfahren wird jedem digitalisierten Bildpunkt ein Ortsvektor \underline{p} des Objektpunktes zugeordnet. Diese Vorgangsweise hat auch für die Herstellung einer Grundrißkarte von Satellitenradaraufnahmen Gültigkeit. Das kritische Element liegt in dem Verfahren des Aussuchens der Geländehöhe p_z . In dem für Luftbilder entwickelten Verfahren von Makarović (1973) wird eine andere, von Greve und Cooney (1973) verschiedene Vorgangsweise vorgeschlagen. Ein Vergleich des rechnerischen Aufwandes für die hier beschriebenen Verfahren und das von Makarović^x (1973) läßt vermuten,

daß der von Greve und Cooney (1973) verwendete Vorgang dem in Gl.(3.56) angegebenen unterlegen ist, falls die Zahl der digitalisierten Bildpunkte größer ist als die Zahl der Punkte im DHM.

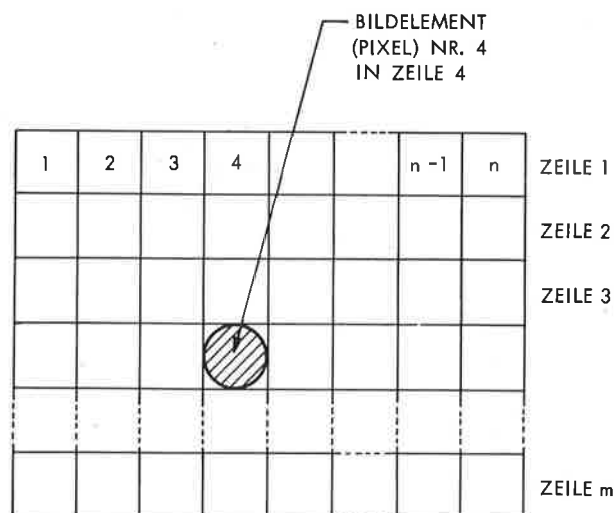
Der von Greve und Cooney (1973) erhaltene mittlere Kartierfehler bei Verwendung eines militärischen Flugzeugradars mit synthetischer Apertur (AN-ASQ 142) und des DHM des U.S.Militärs (Marschenweite = 60 m) betrug etwa ± 34 m. Um diese Genauigkeit mit Satellitenradar zu erreichen, muß die Sensorposition und -orientierung mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Dies erfordert wie bei der in Abschnitt 6 beschriebenen radargrammetrischen Mondkartierung die Verwendung von Paßpunkten.

3.12.3 Digitale Bildverarbeitung

Ein digitales Bild wird durch Zerlegung einer kontinuierlichen (photographischen) Aufnahme in diskrete Punkte gewonnen. In Figur 3.26 sind diese diskreten Bildelemente ('Pixels', engl. von 'Picture Elements') dargestellt. Jedem Bildelement werden als Koordinaten die Zeilennummer, die Probennummer und der Grauwert zugeordnet. Die Digitalisierung einer photographischen Aufnahme und die umgekehrte Aufgabe wird mit Hilfe von besonderen Filmlese- und -schreibgeräten ausgeführt.

Ein Digitalbild kann entzerrt werden. Dabei wird jedem Pixel im ursprünglichen Bild ein Pixel gleicher Dichte (aber verschiedener Lage) in einem neuen Raster zugeordnet ('Resampling'). Die Transformation kann mit Projektionsgleichungen oder durch Interpolation mit Hilfe von Paßpunkten erfolgen. In der Regel liegen in der Bildverarbeitung große Datenmengen vor. Deshalb erscheint es notwendig, nicht jedes Bild mit Benutzung des DHM zu entzerren, sondern geeignete Gruppen (Raster) von Bildelementen.

Die Pixel der Gruppe werden durch Interpolation transformiert.



Figur 3.26: Definition des digitalen Bildes mit Bildelementen, angeordnet in Zeilen und Proben.

3.13. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurden rechnerische Verfahren für das einzelne Satellitenbild (die radargrammetrische Grundeinheit) abgeleitet. Es sind dies die Transformation der Bildkoordinaten in Zeit und Schrägdistanz; die Projektions- und Abbildungsgleichungen; Algorithmen zur Transformation von Zeit und Schrägdistanz in planetozentrische Koordinaten; und Algorithmen zur Ermittlung der Radarabtastlinien auf der Oberfläche eines Planeten.

Einige dieser Verfahren wurden zur numerischen Analyse der Projektionseigenschaften von Satellitenradarbildern sowie zur Berechnung von Radarabtastlinien verwendet. Auf den für Satellitenbildstreifen typischen Effekt der Meridiankonvergenz wird hingewiesen und eine Übersicht über Verfahren der Radareinzelbildauswertung unter Berücksichtigung von vorgegebenen Geländehöhen gegeben. Die numerische Analyse der Radarprojektion führt zur Schlußfolgerung, daß ein Satellitenradarsystem Aufnahmen erzeugen kann, die sich "im Rohzustand" um weniger als 0.5 % von gebräuchlichen Kartenprojektionen unterscheiden. Zu diesem Zweck ist es jedoch notwendig, die gemessenen Schrägdistanzen in sphärische y_b -Bildkoordinaten umzuformen und die Filmtransportgeschwindigkeit (oder ihr digitales Äquivalent) mit der Bewegung des Satellitennadirpunktes zu synchronisieren.

4. THEORETISCHE ANALYSE DES SATELLITENRADAR - STEREOMODELLES

4.1. EINLEITUNG

Für die Planung von Satellitenradar-Projekten ist die Frage von Bedeutung, ob überlappende Satellitenradaraufnahmen zur Stereobetrachtung und räumlichen Vermessung topographischer Details verwendet werden können und welche Ergebnisse zu erwarten sind. Im vorliegenden Kapitel wird daher die Geometrie des Radarstereomodells untersucht.

Für die dynamisch erzeugten Satellitenradarbilder hat die Orientierung mit "Einstelldaten" besondere Bedeutung. Denn die relative Orientierung eines Stereobildpaares kann nur bestimmt werden, wenn Einstelldaten (Sensorkoordinaten und -geschwindigkeit) vorliegen. Sie unterscheidet sich dadurch von der Orientierung klassischer photogrammetrischer Bildpaare, in welchen Einstelldaten nur ausnahmsweise benutzt werden.

Im vorliegenden Kapitel werden Verfahren zur radargrammetrischen Modellherstellung auf Grund von Einstelldaten angegeben. Außerdem wird der Einfluß der Bildfehler auf die Genauigkeit eines Radarstereomodells betrachtet. Eine analoge Untersuchung wurde in (Leberl, 1972b) für Flugzeugradar mit realer Antenne ausgeführt. Die dort erhaltenen Ergebnisse können jedoch nicht auf Satellitenradar mit synthetischer Apertur angewendet werden. Es werden daher, unter Benutzung der mathematischen Formulierungen in dieser Arbeit, in der Folge besondere Untersuchungen für verschiedene Konfigurationen des Satellitenstereoradar ausgeführt.

Erst wird ein mathematisches Modell betrachtet, das für die Berechnung von Schnittpunkten zweier Radarprojektionsstrahlen mit synthetischer Apertur gültig ist. Hierauf wird eine Übersicht über die in Satellitenprojekten möglichen Stereokonfigurationen gegeben. Sodann folgen Verfahren der relativen Orientierung des Stereomodells und die Bestimmung seiner Verzerrungen. Die Fehlerverteilung im Stereomodell wird für eine Reihe von Anordnungen studiert.

4.2. SCHNITTPUNKT ZWEIER RADARGRAMMETRISCHER PROJEKTIONSSTRAHLEN

4.2.1 Allgemeiner Fall

Ein radargrammetrisches Stereomodell wird durch die Schnittpunkte homologer Projektionsstrahlen von Objektpunkten gebildet. Mathematisch entspricht dies der Auflösung von zwei vektoriellen Projektionsgleichungen (3.9):

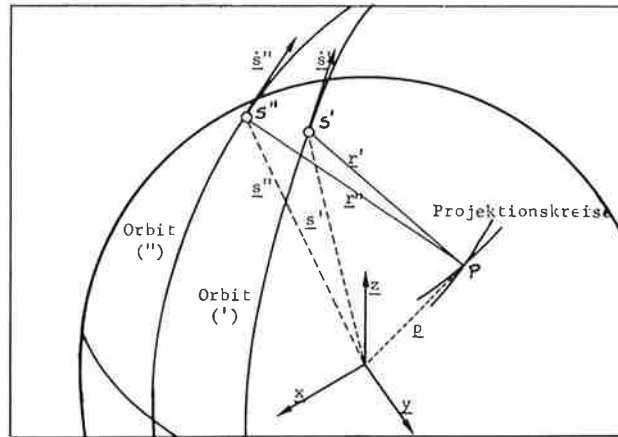
$$\underline{p} = \underline{s}' + \underline{r}' \quad (4.1a)$$

$$\underline{p} = \underline{s}'' + \underline{r}'' \quad (4.1b)$$

Diesen entsprechen 6 skalare Gleichungen mit den 5 Unbekannten, den Koordinaten $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ und den Erhebungswinkeln Ω', Ω'' (Die beiden Radarbilder des Objektpunktes \underline{p} werden durch Apostrophe ('), ('') unterschieden). Die zu lösende Aufgabe wird in Figur 4.1. graphisch veranschaulicht.

Die Unbekannten $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ lassen sich aus Gl.(4.1) einfach eliminieren:

$$\underline{s}' + \underline{r}' - \underline{s}'' - \underline{r}'' = 0 \quad (4.2)$$



Figur 4.1: Bildung eines Radarstereomodellens.

Gl.(4.2) entspricht drei skalaren Gleichungen mit zwei Unbekannten Ω' , Ω'' und ist die Koplanaritätsbedingung für die Vektoren $(\underline{s}' - \underline{s}'')$, \underline{r}' und \underline{r}'' . Vektor \underline{p} folgt nach Gl.(3.9) aus den nach Gl.(4.2) ermittelten Erhebungswinkeln.

Eine direkte Berechnung des Ortsvektors $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ folgt aus den Gl. (3.16, 3.17):

$$|\underline{p} - \underline{s}'| = r' \quad (4.3a)$$

$$|\underline{p} - \underline{s}''| = r'' \quad (4.3b)$$

$$\underline{\dot{s}} \cdot (\underline{p} - \underline{s}') = \sin \tau' (|\underline{\dot{s}}'| |\underline{p} - \underline{s}'|) \quad (4.3c)$$

$$\underline{\dot{s}}'' \cdot (\underline{p} - \underline{s}'') = \sin \tau'' (|\underline{\dot{s}}''| |\underline{p} - \underline{s}''|) \quad (4.3d)$$

Die Gl. (4.1), (4.2), (4.3) sind (wie in der photogrammetrischen Modellberechnung) überbestimmte Gleichungssysteme, die nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden können. Nach Linearisierung von Gl. (4.3) folgt:

$$\underline{C} \cdot \underline{v}_a + \underline{D} \Delta \underline{p} + \underline{f}_a = 0 \quad (4.4)$$

Darin bezeichnet $\Delta \underline{p}$ die unbekanntes Zuschläge zu den vorläufigen Näherungswerten \underline{p}_0 :

$$\underline{p} = \underline{p}_0 + \Delta \underline{p}$$

Vektor \underline{f}_a enthält die Widersprüche der Gleichungen (4.3); Vektor \underline{v}_a die Verbesserungen der Meßgrößen \underline{s}' , $\underline{\dot{s}}'$, \underline{s}'' , $\underline{\dot{s}}''$, r' , r'' , τ' , τ'' , also 16 Elemente. In der Folge wird davon ausgegangen, daß die Fehler von \underline{s} , $\underline{\dot{s}}$ zum Teil durch Ungenauigkeiten der Positions- und Geschwindigkeitsbestimmungen verursacht sind. \underline{C} und \underline{D} sind aus den partiellen Differentialen der Gl. (4.3) gebildete Koeffizientenmatrizen. Aus einem überbestimmten System (4.4) können nach den Regeln der Ausgleichsrechnung die Unbekannten $\Delta \underline{p}$ und ihre Varianz-Kovarianzmatrix \underline{Q}_{pp} berechnet werden. Bezeichnet \underline{Q} die 16 x 16 - Matrix der Varianzen-Kovarianzen der Beobachtungen, so gilt:

$$\Delta \underline{p} = - (\underline{D}^T (\underline{C} \underline{Q} \underline{C}^T)^{-1} \underline{D})^{-1} \underline{D}^T (\underline{C} \underline{Q} \underline{C}^T)^{-1} \underline{f}_a \quad (4.5a)$$

$$\underline{Q}_{pp} = (\underline{D}^T (\underline{C} \underline{Q} \underline{C}^T)^{-1} \underline{D})^{-1} \quad (4.5b)$$

Die Linearisierung der Koplanaritätsbedingung (4.2) führt zu Verbesserungsgleichungen für die Zuschläge $\underline{\Delta\Omega} = (\Delta\Omega', \Delta\Omega'')$ der unbekanntem Erhebungswinkel:

$$\underline{v}_b + \underline{E} \underline{\Delta\Omega} + \underline{f}_b = 0 \quad (4.6)$$

Bezeichnet \underline{f}_b die Absolutglieder, \underline{v}_b die Verbesserungen, so bestehen die Gleichungen:

$$\underline{\Delta\Omega} = - (\underline{E}^T \underline{Q}^{-1} \underline{E})^{-1} \underline{E}^T \underline{Q}^{-1} \underline{f}_b \quad (4.7a)$$

$$\underline{Q}_{\Omega\Omega} = (\underline{E}^T \underline{Q}^{-1} \underline{E})^{-1} \quad (4.7b)$$

Mit Gl. (4.5a) wird die Minimumsbedingung für die Quadratsummen der 16 Verbesserungen \underline{v}_a der Meßgrößen erfüllt, mit Gl. (4.7a) hingegen die Minimumsbedingung für die Quadratsumme der Abstände \underline{v}_b der kreisförmigen radargrammetrischen Projektionsstrahlen.

In die Berechnung können die Meßgrößen \underline{s} (Positionsvektor), $\underline{\dot{s}}$ (Geschwindigkeitsvektor) und r (Schrägdistanz) entweder direkt eingeführt oder durch die Parameter der Satellitenumlaufbahn ersetzt werden (Gl.3.19, 3.27). Es besteht kein Grund, einem dieser Verfahren den Vorzug zu geben.

Gracie u.a. (1970) gehen von anderen Annahmen aus. Die Vektoren \underline{s} und $\underline{\dot{s}}$ werden als bekannte Funktionen der Zeit betrachtet und nur Schrägdistanzen r', r'' und Aufnahmezeiten t', t'' als Meßgrößen eingeführt. Dies setzt voraus, daß die Sensorposition \underline{s} und die Geschwindigkeit $\underline{\dot{s}}$ aus den Bahngrößen berechnet und etwa mit Hilfe von Polynomen in Funktion der Zeit t dargestellt werden:

$$\begin{aligned} s_x(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \\ s_y(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots \\ s_z(t) &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots \\ \dot{s}_x(t) &= a_1 + 2a_2 t + \dots \\ \dot{s}_y(t) &= b_1 + 2b_2 t + \dots \\ \dot{s}_z(t) &= c_1 + 2c_2 t + \dots \end{aligned} \quad (4.8)$$

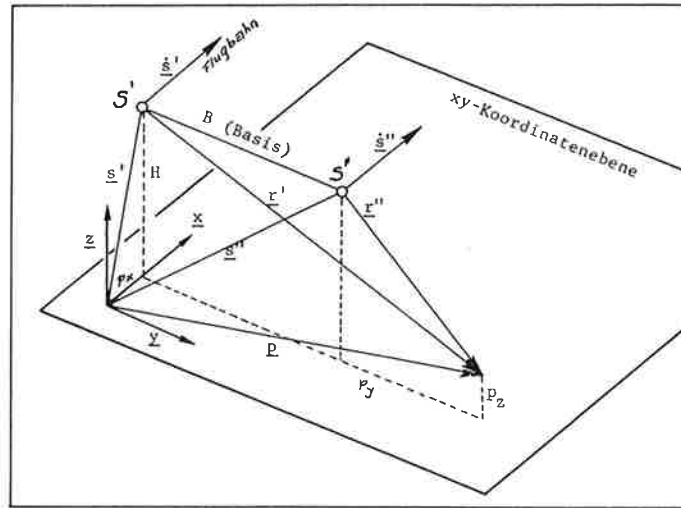
Unter der Annahme, daß die Polynomkoeffizienten fehlerfreie Konstante sind, werden die Polynome für jeden Bildpunkt in die Gl. (4.3) eingesetzt. In den Gl. (4.4) enthält in diesem Fall der Vektor \underline{v} nur Verbesserungen der Meßgrößen r', r'', t', t'' .

Die allgemeinste Formulierung der Modellbildung folgt, wenn sowohl Aufnahmezeiten als auch Sensorposition und Geschwindigkeit als Meßgrößen eingeführt werden. Dieser Fall wird im Kapitel 7 (Ausgleichung von Radarbildverbänden) behandelt.

4.2.2 Vereinfachter Sonderfall

Eine einfache Berechnung des radargrammetrischen Modelles ist möglich, wenn die Umlaufbahn geradelinig und parallel zu einer ebenen Planetenoberfläche verläuft. Dieser Fall hat für die Auswertung von Radaraufnahmen aus dem Flugzeug Bedeutung (Derenyi, 1975a), und ist als erste Näherung auch für die Satellitenradargrammetrie in kleinen Gebieten sinnvoll (Leberl, 1975e).

In einem planetarischen Koordinatensystem, dessen X- und Y-Achsen nach Figur 4.2 parallel zu den in der Höhe H verlaufenden geradlinigen Flugbahnen und der Basis B liegen, können die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren einfach dargestellt werden.



Figur 4.2: Sonderfall der Radarstereoaufnahme

$$\begin{aligned} \underline{s}' &= (s'_x, 0, H) & \underline{s}'' &= (s''_x, B, H) \\ \underline{\dot{s}}' &= (\dot{s}'_x, 0, 0) & \underline{\dot{s}}'' &= (\dot{s}''_x, 0, 0) \end{aligned}$$

Werden diese in die Gl. (4.3) eingeführt und $\tau = 0$ gesetzt, so bestehen für den Ortsvektor des Objektpunktes $\underline{p} = (p_x, p_y, p_z)$ die Gleichungen:

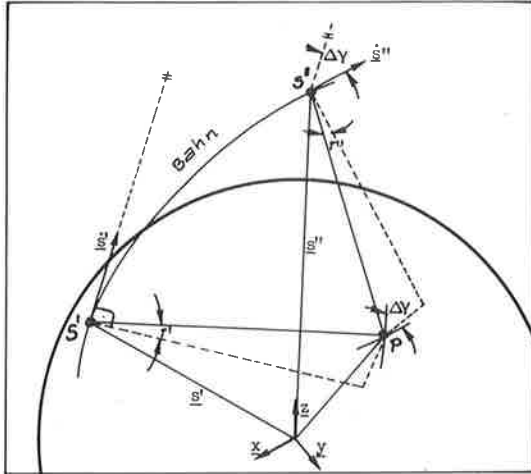
$$\begin{aligned} p_x &= (s'_x + s''_x) / 2 \\ p_y &= (-r''^2 + r'^2 + B^2) / (2B) \\ p_z &= H - \left\{ (r'^2 - p_y^2)^{\frac{1}{2}} + (r''^2 - (B - p_y)^2)^{\frac{1}{2}} \right\} / 2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.3. STEREOADARGRAMMETRISCHE KONFIGURATIONEN

Bei Radaraufnahmen mit realer Apertur können Stereobilder durch gegenseitige Verkantung oder Kippung zweier Antennen in einer Flugbahn hergestellt werden (Leberl, 1972b; Carlsson, 1973, Bair und Carlson 1974, 1975). Bei Radaraufnahmen mit synthetischer Apertur ist dies nicht möglich.

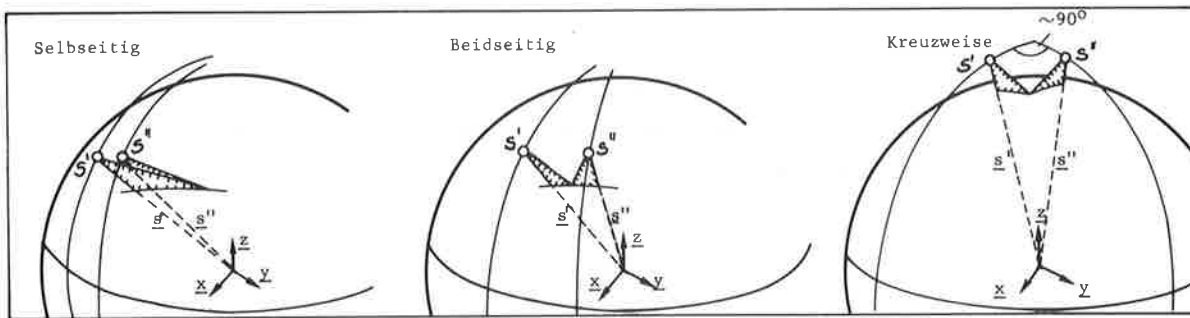
Die Ebenen der Projektionskreise für Aufnahmen mit synthetischer Apertur liegen unabhängig von der Antennenorientierung und vom Öffnungswinkel des Dopplerkegels (τ) normal zum Geschwindigkeitsvektor des Sensors. Sie sind daher für eine Bahnkurve nahezu parallel und es besteht keine Möglichkeit, einander überdeckende Aufnahmen herzustellen, deren Projektionskreise einander schneiden (Leberl, 1972b).

Die theoretische Möglichkeit, die aus der Änderung des Geschwindigkeitsvektors \dot{s} (Figur 4.3) entlang einer Umlaufbahn folgt, scheidet praktisch aus. Denn die mit Hilfe positiver und negativer Dopplerkegel erreichbare Konvergenz ist selbst im Falle voneinander entfernter Aufnahmepunkte S und großer Winkel τ gering.



Figur 4.3: Stereoaordnung in einer Umlaufbahn

Radarstereoaufnahmen mit künstlicher Apertur können daher praktisch nur von 2 getrennten Umlaufbahnen hergestellt werden.



Figur 4.4: Stereokonfigurationen in verschiedenen Umlaufbahnen zur selben Seite von zwei nahezu parallelen Bahnen, zwischen den beiden Bahnen und mittels nicht paralleler Bahnen.

Hiefür werden drei Konfigurationen diskutiert (Fig.4.4): Bei parallelen Umlaufbahnen kann das Überlappungsgebiet der Aufnahmen auf der selben Seite beider Bahnen liegen (Fall a: 'same-side'-Stereo) ; oder zwischen den Umlaufbahnen (Fall b: 'opposite side'-Stereo). Überlappende Aufnahmen werden auch aus Umlaufbahnen erhalten, die einen Winkel von etwa 90° bilden, also sich kreuzen (Fall c: 'cross-wise'-Stereo). Im allgemeinen werden die Anordnungen nach Fall (a) oder (b) verwendet. Fall (c) hat in Polnähe Bedeutung (polare Umlaufbahn).

4.4. RELATIVE ORIENTIERUNG

Die Orientierung der Radaraufnahmen für die Stereoausswertung hat die Ermittlung der Komponenten der Ortsvektoren, \underline{s}' , \underline{s}'' und der Richtung $(\dot{s}'_y/\dot{s}'_x, \dot{s}'_z/\dot{s}'_x)$ der Geschwindigkeitsvektoren \dot{s}' , \dot{s}'' also von 10 Unbekannten zur Aufgabe. Diese Parameter können auch durch \underline{s}' , Basis $\underline{b} = (\underline{s}' - \underline{s}'')$ und die Orientierungswinkel $\bar{\phi}'$, $\bar{\kappa}'$, sowie $d\bar{\phi} = (\bar{\phi}'' - \bar{\phi}')$, $d\bar{\kappa} = (\bar{\kappa}'' - \bar{\kappa}')$ ersetzt werden.

Die relative Orientierung ist eine Teilaufgabe hiervon, die erfüllt ist, wenn sich entsprechende Projektionsstrahlen in zwei einander überdeckenden Aufnahmen schneiden.

Die erhaltenen Schnittpunkte bilden das durch die Aufnahmen vermittelte Stereomodell. Für die relative Orientierung zweier Radaraufnahmen mit synthetischer Apertur gelten ähnliche Überlegungen wie für die Streifenkamera mit einem Aperturschlitz und vertikaler Abbildungsebene. Für diese wurde das Problem der relativen Orientierung ausführlich behandelt (Elms^x, 1962; Case^x, 1967; Masry, 1969; Derenyi, 1970; Konecny, 1970, 1971).

Die Analogie zwischen Streifenkamera und Radar besteht, weil für beide Systeme die Projektionsstrahlen in Ebenen normal zur Flugrichtung liegen. Diese Projektionsstrahlen sind jedoch für Streifenaufnahmen Gerade, und für Radaraufnahmen Kreise.

Die relative Orientierung wird mit Hilfe der Koplanaritätsbedingung für den Basisvektor $\underline{b} = (\underline{s}' - \underline{s}'')$ und nach Gl. (3.12) die Vektoren $\underline{r}' = \underline{A}' \underline{p}'_a$ und $\underline{r}'' = \underline{A}'' \underline{p}''_a$ ausgeführt. Diese wurde bereits in Gl. (4.2) in Vektorform mitgeteilt. Daraus folgt die in der Photogrammetrie übliche Determinantenform:

$$\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ r'_x & r'_y & r'_z \\ r''_x & r''_y & r''_z \end{vmatrix} = 0 \quad (4.10)$$

In einem Radarbild B' bezeichne $x'_b = \text{const.}$ die mit einer bestimmten Orientierung zum Zeitpunkt t' aufgenommene Bildlinie. Im entsprechenden Bild B'' werden die zur Bildlinie $x'_b = \text{const.}$ gehörenden Objektpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten abgebildet. Die $x'_b = \text{const.}$ entsprechende Bildkurve ist daher im allgemeinen keine Gerade. Die Bedingung (4.10) muß daher für jedes homologe Punktpaar, das zu den Zeitpunkten t' , t'' aufgenommen wurde, aufgestellt werden. Aus ihr kann nur ein einziger Orientierungsparameter ermittelt werden. Es besteht daher in aller Strenge nur die Möglichkeit, einen einzigen Orientierungsparameter aus dem Bildinhalt (durch relative Orientierung) zu bestimmen, wie dies bei photographischen Aufnahmen der Fall ist. Alle anderen Orientierungsparameter müssen für eine Stereoauswertung vorgegeben sein.

Wird angenommen, daß alle zur Bildlinie $x'_b = \text{const.}$ von B' gehörigen homologen Punkte von B'' mit derselben Orientierung aufgenommen wurden (obwohl die Aufnahme nicht zum selben Zeitpunkt erfolgt) so können nach Derenyi (1970) und Konecny (1970) zwei Orientierungsparameter aus der Koplanaritätsbedingung bestimmt werden. Die restlichen Parameter müssen vorgegeben sein. In konventioneller photogrammetrischer Terminologie sind erstere entweder $(db_x, d\bar{\kappa})$ oder $(d\bar{\phi}, d\bar{\kappa})$ oder bei nicht parallelen Satellitenbahnen (db_x, db_z) oder $(d\bar{\phi}, db_z)$. Die (konventionellen photogrammetrischen) Orientierungselemente $\bar{\phi}$ und $\bar{\kappa}$ wurden in Gl. (3.15b) definiert, Linearformen für die Differentialgrößen $db_x, db_y, d\bar{\phi}, d\bar{\kappa}$ folgen aus Gl.(4.10).

Aus dem Gesagten folgt, daß eine relative (und absolute) Orientierung von Radarbildern nur mittels vorgegebener (Einstell-)Daten ausgeführt werden kann. Diese Daten sind für Satellitenprojekte stets bekannt, aber sie sind mit Fehlern behaftet, die Anlaß zu Verformungen des Stereomodelles geben. Ein langperiodischer Teil dieser Verformungen kann durch Paßpunkte eliminiert werden, ein hochfrequenter Fehleranteil führt zu zufälligen Modellverformungen.

Die Berechnung der Modellkoordinaten mittels der Gl. (4.5a) oder (4.7a) und auch das Verfahren von Gracie u.a. (1970) (siehe Gl. (4.8)) berücksichtigen nicht, daß die Fehler der Einstell-daten einem Trend folgen und nicht nur normal verteilt mit dem Mittelwert Null sind. Der Trend kann durch eine stückweise Polynomfunktion erfaßt werden, deren Koeffizienten als Unbekannte in

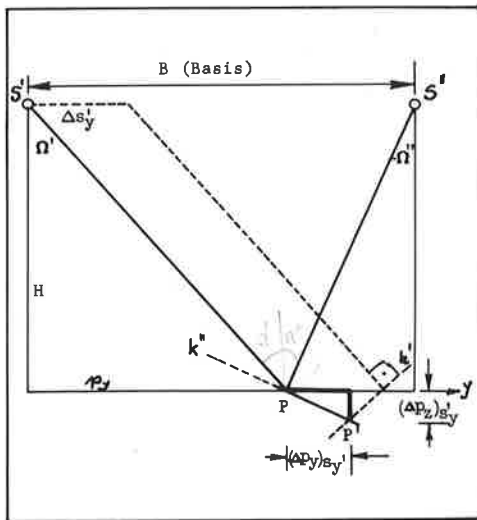
die Ausgleichung eingeführt werden. Das mathematische Modell hierfür wird bei der Ausgleichung von Radarbildblöcken (Kapitel 7) beschrieben. Dabei werden auch vorgegebene Paßpunkte berücksichtigt. Das Stereobildpaar ist nur ein Sonderfall des Radarbildblockes.

4.5. FORMELN FÜR DIE VERFORMUNGEN DES STEREOMODELLES

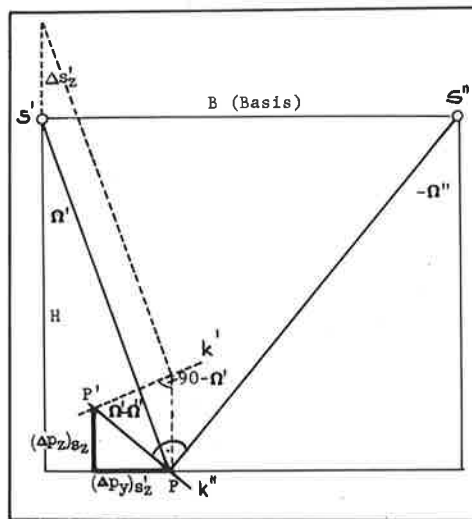
Um die Größenordnung der Verformungen des Radarstereomodelles zu bestimmen, welche sich aus Fehlern der Einstelldaten und der Schrägdistanz ergeben, werden Formeln hierfür abgeleitet. Dabei werden die im Abschnitt 4.2 eingeführten Annahmen benutzt, die zu den Gl. (4.9) führten.

Aus Figur 4.2 ergibt sich, daß ein Fehler $\Delta s'_x$ einer Sensorposition die folgenden Modellfehler verursacht:

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{s'_x} &= (\Delta s'_x) / 2 \\ (\Delta p_y)_{s'_x} &= 0 \\ (\Delta p_z)_{s'_x} &= 0 \end{aligned} \tag{4.11a}$$



Figur 4.5: Sensorpositionsfehler $\Delta s'_y$ und Modellfehler $\Delta p_y, \Delta p_z$



Figur 4.6: Sensorpositionsfehler $\Delta s'_z$ und Modellfehler $\Delta p_y, \Delta p_z$

Die Auswirkung eines Fehlers $\Delta s'_y$ der Komponente s'_y wird in Figur 4.5 dargestellt (in welcher die Projektionskreise k', k'' durch gerade Linien normal zur Blickrichtung angenähert sind). Daraus ergeben sich die folgenden Modellfehler:

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{s'_y} &= 0 \\ (\Delta p_y)_{s'_y} &= \Delta s'_y p_y / B = \Delta s'_y / (1 - \cot \Omega' \tan \Omega'') \\ (\Delta p_z)_{s'_y} &= \Delta s'_y p_y (p_y - B) / (H B) = \Delta s'_y / (\cot \Omega'' - \cot \Omega') \end{aligned} \tag{4.11b}$$

Durch einen Fehler $\Delta s'_y$ wird das Stereomodell in der Höhe nichtlinear verbogen (Δp_z) und in der Lage affin verformt ($\Delta p_x, \Delta p_y$).

Ein Fehler $\Delta s'_z$ der s'_z -Komponente verursacht nach Figur 4.6 die Modellverformungen:

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{s'_z} &= 0 \\ (\Delta p_y)_{s'_z} &= -\Delta s'_z H / B = \Delta s'_z / (\tan \Omega'' - \tan \Omega') \\ (\Delta p_z)_{s'_z} &= \Delta s'_z \frac{B - p_y}{B} = \Delta s'_z / (-\tan \Omega' \cot \Omega'' + 1) \end{aligned} \quad (4.11c)$$

Diese entsprechen einer Kippung (Δp_z) und einer konstanten Verschiebung des Stereomodells in der y-Richtung.

Orientierungsfehler des Sensors sind Fehler $\Delta \dot{s}'$ des Geschwindigkeitsvektors. Seine Komponenten $\Delta \dot{s}'_x, \Delta \dot{s}'_y, \Delta \dot{s}'_z$ verursachen die nachfolgenden Fehler $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ der Modellpunkte. Da ein Fehler $\Delta \dot{s}'_x$ die Orientierung des Radarstrahls unbeeinträchtigt läßt, gilt:

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{\dot{s}'_x} &= 0 \\ (\Delta p_y)_{\dot{s}'_x} &= 0 \\ (\Delta p_z)_{\dot{s}'_x} &= 0 \end{aligned} \quad (4.11d)$$

Der Fehler $\Delta \dot{s}'_y$ verursacht eine Verkantung des Radarstrahles (κ), die in p_x einen mit p_y linear anwachsenden Fehler verursacht:

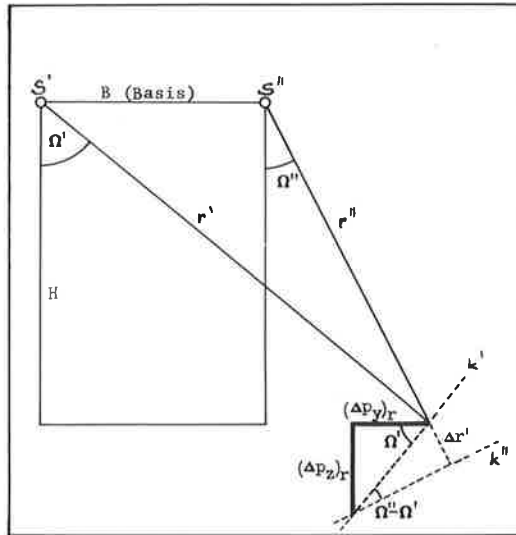
$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{\dot{s}'_y} &= \Delta \dot{s}'_y p_y / 2 = \Delta \dot{s}'_y H \tan \Omega' / 2 \\ (\Delta p_y)_{\dot{s}'_y} &= 0 \\ (\Delta p_z)_{\dot{s}'_y} &= 0 \end{aligned} \quad (4.11e)$$

Der Fehler $\Delta \dot{s}'_z$ verursacht eine Kippung des Radarstrahles (ϕ), die sich nur auf die p_x -Komponente auswirkt.

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{\dot{s}'_z} &= -H \Delta \dot{s}'_z / 2 \\ (\Delta p_y)_{\dot{s}'_z} &= 0 \\ (\Delta p_z)_{\dot{s}'_z} &= 0 \end{aligned} \quad (4.11f)$$

Schließlich verursacht ein Schrägdistanzfehler $\Delta r'$ die Modellfehler (Fig.4.7):

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{r'} &= 0 \\ (\Delta p_y)_{r'} &= -\Delta r' \cos \Omega'' / \sin(\Omega' - \Omega'') \\ (\Delta p_z)_{r'} &= \Delta r' \sin \Omega'' / \sin(\Omega' - \Omega'') \end{aligned} \quad (4.11g)$$



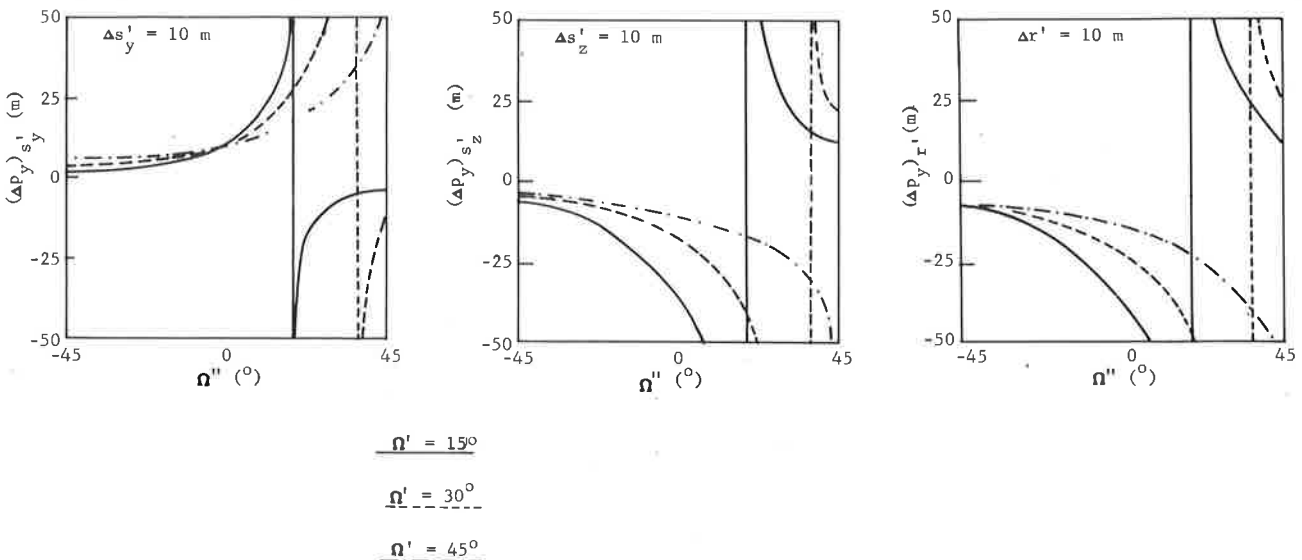
Figur 4.7: Schrägdistanzfehler $\Delta r'$ und Modellfehler $\Delta p_y, \Delta p_z$

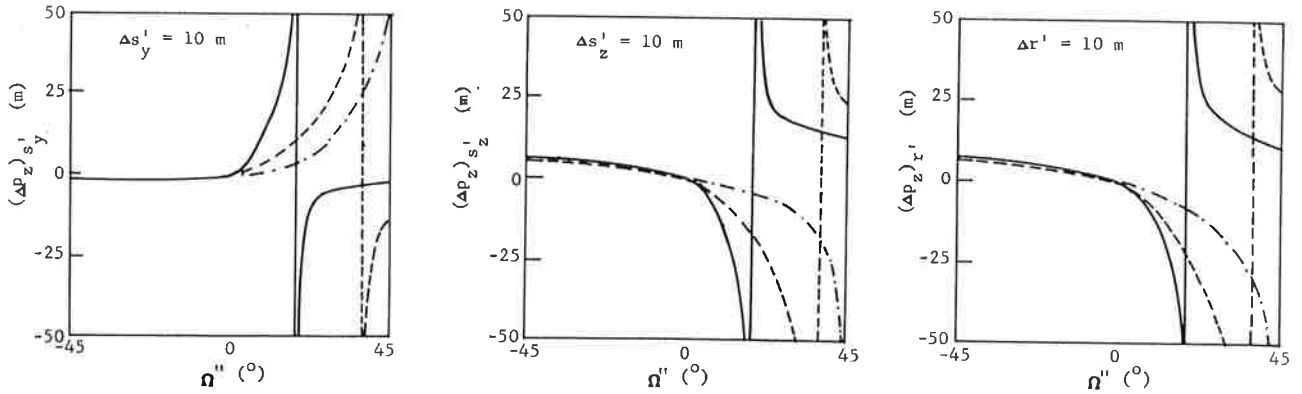
Ähnliche Ausdrücke ergeben sich für die Auswirkung von Fehlern der Einstelldaten des überlap-
penden Bildes. Es zeigt sich, daß Fehler in den Komponenten des Geschwindigkeitsvektors nur in
Richtung der Sensorbewegung (Umlaufbahn) wirken. Nur die Positionsfehler in y und z sowie r verur-
sachen Modelldeformationen quer zur Umlaufbahn und in der Höhe.

Des weiteren folgt, daß nur die durch Orientierungsfehler verursachten Modellfehler von der
Flughöhe H abhängen, alle anderen aber ausschließlich eine Funktion der Erhebungswinkel Ω', Ω''
sind.

Figur 4.8 zeigt den Verlauf und die Größenordnung der Modelldeformationen zufolge von Posi-
tionsfehlern $\Delta s'_y, \Delta s'_z$ und Schrägdistanzfehlern $\Delta r'$ von 10 m. Aus der Darstellung sind Singulari-
täten der Fehlerkurven für den Fall $\Omega' = \Omega''$ erkennbar. Hiefür sind die Schnittwinkel der Projek-
tionskreise sehr klein und die Modellfehler groß. Der Einfluß der Positionsfehler des Sensors auf
die Modellkoordinaten wird aber geringer, je mehr sich Ω' und Ω'' voneinander unterscheiden.

Figur 4.8: Text siehe nächste Seite





Figur 4.8: Beispiele von Fehlerkurven für die Modellkoordinate p_y , p_z .

4.6. GENAUIGKEIT UND FEHLER DER MODELLKOORDINATEN

4.6.1 Parameter und Rechenmethode

Die Güte einer Stereoradarkonfiguration kann durch die Auswirkungen zufälliger Fehler der gemessenen Parameter auf die Koordination des Modellpunktes p , also durch die Gewichtungsfaktoren Q_{xx} , Q_{yy} , Q_{zz} beurteilt werden. Die Parameter, welche diese Größen beeinflussen, sind in Tab.4.1 angeführt. Der wichtigste unter ihnen ist der Unterschied ($\Delta\Omega = \Omega'' - \Omega'$) der Erhebungswinkel, unter denen ein Objektpunkt p abgebildet wurde, oder der Konvergenzwinkel $\Delta\gamma$ der Projektionsstrahlen. Der Unterschied zwischen $\Delta\Omega$ und $\Delta\gamma$ ist im allgemeinen klein, für $\Delta\gamma = \Delta\Omega = 90^\circ$ können optimale Ergebnisse erwartet werden.

Tabelle 4.1: Satellitenradarparameter

Innere Orientierung	
	Zeitreferenzmarken
	Zeitmessung
	Schrägdistanzreferenzmarken
	Schrägdistanzmessung (Auflösung a_r)
Äußere Orientierung	
	Positionsmessung des Sensors
	Messung des Geschwindigkeitsvektors des Sensors
Satellitenbahn	
	Höhe
	Exzentrizität
	Inklination
	wahre Anomalie des Sensors
Radarsensor	
	Kegelwinkel
	Erhebungswinkel
	Unterschied der Erhebungswinkel

Der Schnittwinkel $\Delta\gamma$ (oder $\Delta\Omega$) der Radarprojektionsstrahlen wird durch die Länge der Basis $b = \underline{s}' - \underline{s}''$, die Erhebungswinkel Ω , die Exzentrizität der Umlaufbahn, die planetographische Breite ϕ , den Kegelkomplementärwinkel τ , und die Höhe der Umlaufbahn beeinflusst. Die Genauigkeit des Modells hängt aber auch von der Genauigkeit der "Einstelldaten" ab, das sind die in die Berechnung einzuführenden Größen \underline{s}' , \underline{s}'' , $\underline{\dot{s}}'$, $\underline{\dot{s}}''$, r' , r'' . Diese sind wiederum eine Funktion der Meßgenauigkeit und der Genauigkeit der zeitlichen Zuordnung der Bildgrößen.

Somit ergeben sich drei Gruppen von Parametern, deren Fehler die Genauigkeit eines Modellpunktes (Schnitt zweier Radarprojektionsstrahlen) beeinflussen: (a) Parameter der inneren Orientierung, diese wirken auf die Zeit t , die Schrägdistanz r und den Winkel τ ; (b) die Einstelldaten \underline{s}' , \underline{s}'' , $\underline{\dot{s}}'$, $\underline{\dot{s}}''$; und (c) Parameter, welche die Konvergenz der Projektionsstrahlen bestimmen.

Zur Berechnung der Gewichtskoeffizienten Q_{xx} , Q_{yy} , Q_{zz} des Modellpunktes wurde ein Computerprogramm geschrieben,¹⁾ das für die vereinfachten Annahmen nach Gl. (4.11) und auch für den Allgemeinfall nach (4.5b) angewendet werden kann. In diesem können beliebige Parameter der Satellitenbahn (Bahndurchmesser, Exzentrizität usw.), Kegelwinkel τ und Erhebungswinkel Ω des Radarsystems, sowie Standardabweichungen (Gewichtskoeffizienten) der Beobachtungen eingeführt werden. "Ursprüngliche" Beobachtungsfehler werden in und quer zur Bahnrichtung sowie in der Höhe angenommen. Die Berechnungen erfolgen in einem planetozentrischen Koordinatensystem. Das Programm ermittelt für eine regelmäßige Anordnung von Punkten auf der Planetenoberfläche die zugehörigen Orts- und Geschwindigkeitsvektoren des Sensors sowie die Standardabweichungen (Gewichtskoeffizienten) der Modellpunktkoordinaten. Die Ergebnisse werden in der folgenden Sektion beschrieben. Der Vorteil dieses (allgemeinen) Computerprogrammes liegt in seiner Flexibilität und der Benutzung eines planetozentrischen Koordinatensystems. Dadurch können die Ergebnisse für eine zu spezifizierende Kartenprojektion durch Standardabweichungen σ_x , σ_y , σ_z im Kartenkoordinatensystem dargestellt werden.

4.6.2 Ergebnisse

Die in der Folge besprochenen Ergebnisse betreffen den Fall der selbstseitigen Konfiguration mit Schnittwinkeln $\Delta\gamma$ von 3° bis 9° . Derart kleine Schnittwinkel ergeben sich stets im Fall eines Satellitenradars wegen der großen Bahnhöhe und der geringen Breite des Gesichtsfeldes (ungünstiges Basis-Höhenverhältnis). Zum Beispiel werden im SEASAT-Projekt eine Bahnhöhe von 800 km und ein Gesichtsfeld von 100 km gewählt werden, sodaß Schnittwinkel bis etwa 6° zu erwarten sind.

Das Potential des Computerprogramms wird nicht voll ausgenutzt, da es für beliebige Schnittwinkel von Projektionsstrahlen und für jede beliebige Stereokonfiguration erstellt ist. Aber beim derzeitigen Stand der Radartechnik sind derartige Annahmen noch nicht sinnvoll.

Die Berechnung der Modellfehler wurde für die in Tabelle 4.2 enthaltenen Annahmen ausgeführt. Für die Komponente der Sensorposition in Bahnrichtung wurde eine geringere Genauigkeit angenommen als für die anderen Komponenten (der Fehler des aus dem Bild ermittelten Aufnahmezeitpunktes bewirkt vor allem einen Fehler der Sensorposition in Flugrichtung). Die Richtungsfehler des Geschwindigkeitsvektors wurden unter Annahme eines Positionsfehlers von ± 10 m/100 km mit 0.005° angesetzt.

¹⁾ In Fortran V für den Univac 1108 Computer des JPL. Kopien des Programmes werden vom Autor auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4.2: Annahmen für die mittleren Fehler

Positionsfehler		Geschwindigkeitsfehler	
In Bahnrichtung	$(\sigma_\ell) \pm 25 \text{ m}$	In Bahnrichtung	$(\sigma_\ell) \pm 10 \text{ m/100 km}$
Quer zur Bahnrichtung	$(\sigma_q) \pm 10 \text{ m}$	Quer zur Bahnrichtung	$(\sigma_q) \pm 10 \text{ m/100 km}$
Höhe	$(\sigma_h) \pm 10 \text{ m}$	Höhe	$(\sigma_h) \pm 10 \text{ m/100 km}$
Schrägdistanz	$(\sigma_r) \pm 7 \text{ m}$	Winkel	$(\tau) \quad 0.0^\circ$

Die Ergebnisse der Berechnungen werden (im allgemeinen) in einer transversalen Merkatorprojektion dargestellt. Falls eine andere Projektion benützt wurde, wird dies angegeben.

Aus den in Fig.4.9a dargestellten Modellfehlern ergibt sich dieselbe Schlußfolgerung wie aus Gl. (4.11). Der Fehler wächst mit dem Abstand des Sensors vom Aufnahmegebiet, der mit dem Erhebungswinkel Ω und der Flughöhe H (siehe Fig.4.12) zunimmt. Für die Projektparameter des SEASAT-Systems ($\Omega' = 15^\circ$, $\Delta\Omega = 6^\circ$) müssen x-Fehler in der Größenordnung von $\pm 60 \text{ m}$ erwartet werden.

Für die quer zur Flugrichtung liegende Modellkoordinate y besteht eine starke Abhängigkeit des mittleren Fehlers σ_y vom Unterschied $\Delta\Omega$ der Erhebungswinkel (s.Fig.4.9b). Größere Erhebungswinkel führen zu kleineren σ_y , weil der Konvergenzwinkel $\Delta\gamma$ für ein konstantes $\Delta\Omega$ mit größerem Ω' zunimmt. Mit den gewählten Annahmen kann für SEASAT mit einem σ_y von $\pm 150 \text{ m}$ gerechnet werden.

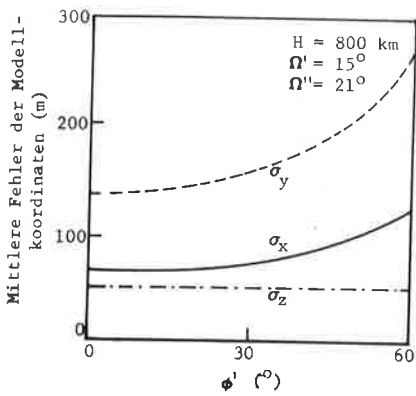
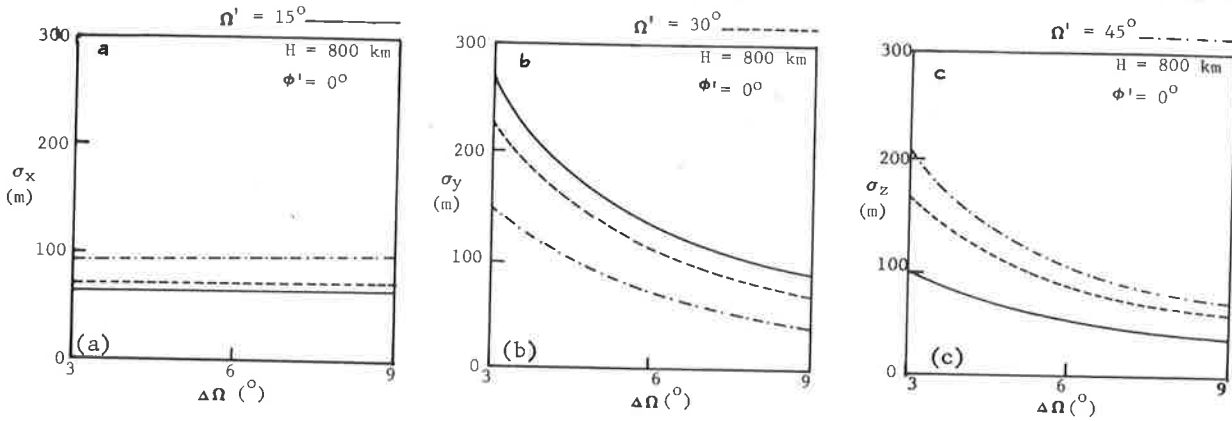
Der Höhenfehler σ_z des Modelles wird nach Fig.4.9c mit wachsendem $\Delta\Omega$ verringert. Jedoch führt ein ansteigendes Ω' - trotz günstigerem Konvergenzwinkel $\Delta\Omega$ - zu größeren Höhenfehlern. Für SEASAT kann mit Höhengenaugigkeiten von $\pm 60 \text{ m}$ gerechnet werden.

Entlang einer (polaren) Satellitenbahn bleiben die mittleren Stereomodellfehler gleich. Lediglich die Verzerrungen durch die Kartenprojektion wirken sich aus. Bei transversaler Merkatorprojektion und den SEASAT-Parametern ergibt sich nach Fig.4.10 die Höhe z als die genaueste und y als die ungenaueste Koordinate. σ_x und σ_y wachsen wegen der Merkatorprojektion mit der geographischen Breite ϕ . In einer lokalen orthogonalen Tangentialprojektion würden beide unabhängig von ϕ sein.

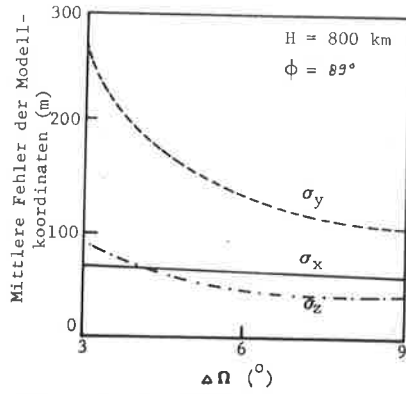
In Polnähe geht die selbstseitige ('Same-Side') Stereokonfiguration in eine kreuzweise über. Da sich die Abtastebenen hier unter einem Winkel von nahezu 90° schneiden, stellt sich die Frage, ob die Genauigkeit des Stereomodells dadurch verbessert wird. Fig.4.11 gibt die Modellfehler in geozentrischen Koordinaten (und nicht im Kartensystemen). Es zeigt sich, daß sich die Modellgenauigkeit in Polnähe nicht wesentlich erhöht. Für kleine $\Delta\Omega$ bleibt auch in Polnähe die Konvergenz $\Delta\gamma$ klein. Für eine kreuzweise Konfiguration ist überdies die visuelle Stereomodellbetrachtung kaum möglich, sodaß dieses Verfahren praktisch nicht angewendet werden kann.

Die Höhe der Umlaufbahn des Satelliten hat in erster Linie Einfluß auf σ_x . Fig.4.12 zeigt jedoch, daß für $\Delta\Omega = \text{const.}$ der Konvergenzwinkel $\Delta\gamma$ mit der Höhe wächst, also kleinere σ_y , σ_z - Werte für größere Höhen erhalten werden.

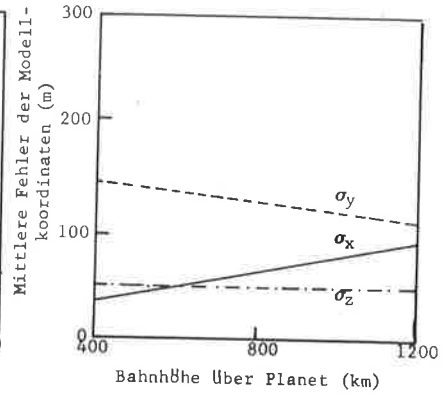
Figur 4.9: Standardabweichungen der Modellkoordinatenfehler in transversaler Merkatorprojektion



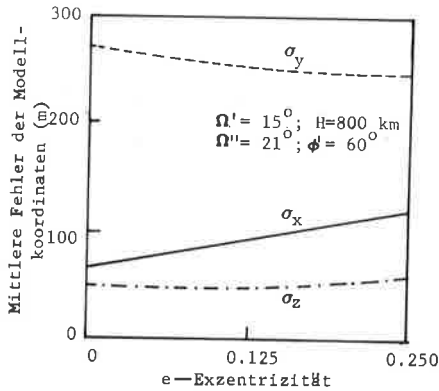
Figur 4.10: Abhängigkeit des Modellfehlers von der geographischen Breite



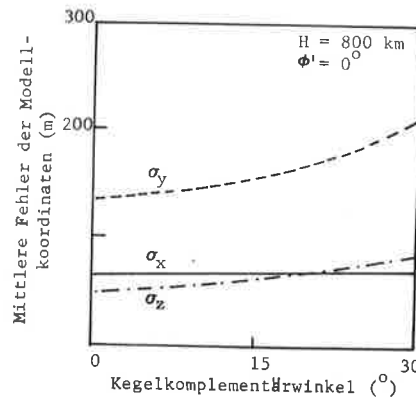
Figur 4.11: Abhängigkeit der Modellfehler von $\Delta\Omega$ in Polnähe



Figur 4.12: Abhängigkeit des Modellfehlers von der Flughöhe.



Figur 4.13: Abhängigkeit der Stereo-modellfehler von der Bahnexzentrizität



Figur 4.14: Abhängigkeit des Stereo-modellfehlers vom Kegelkomplementärwinkel.

Schließlich stellt sich die Frage nach dem Einfluß der Exzentrizität der Umlaufbahn und der Wirkung des Winkels τ . Die wachsende Exzentrizität der Umlaufbahn führt für eine vorgegebene geographische Breite und feste Parameter Ω' , $\Delta\Omega$ zu größeren Flughöhen. Damit wächst nach Fig.4.13 vor allem σ_x ; σ_z bleibt nahezu unverändert, und σ_y verringert sich geringfügig. Analoge Auswirkungen hat auch eine wachsende Flughöhe H (s. Fig.4.12). Die Exzentrizität der Umlaufbahn ist daher für stereoradargrammetrische Ergebnisse ohne Einfluß.

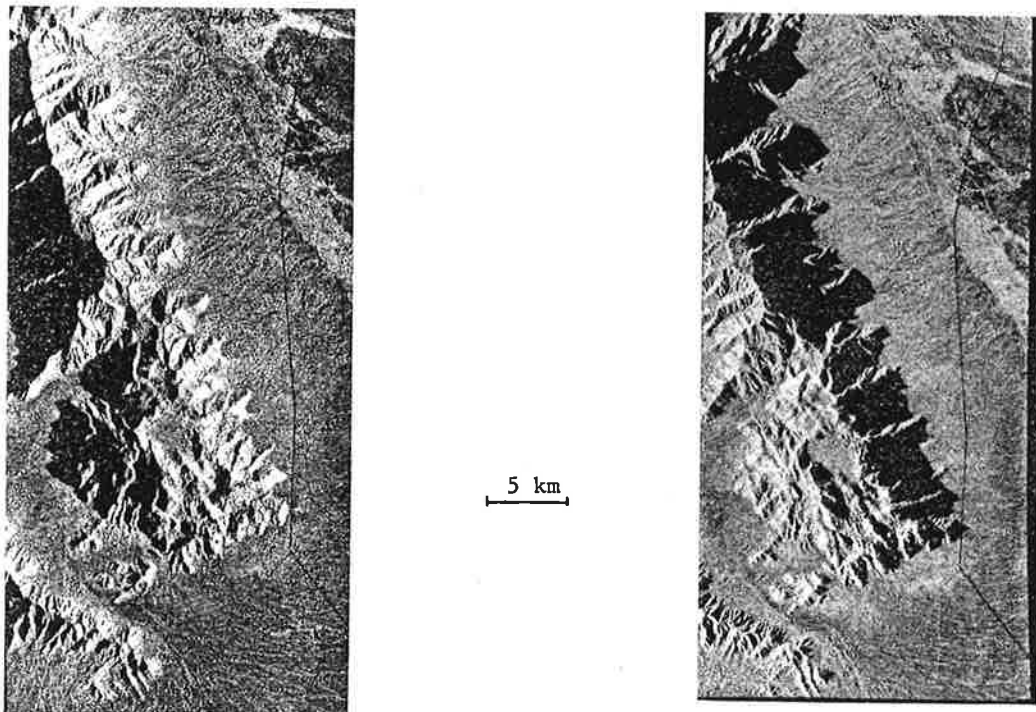
Ein zunehmender Winkel τ verkleinert für ein vorgegebenes $\Delta\Omega$ den Konvergenzwinkel $\Delta\gamma$ und vergrößert daher σ_y wie σ_z , während σ_x unverändert bleibt (Fig.4.14).

4.7. METRISCHE VERSUS PHYSIOLOGISCHE GESICHTSPUNKTE FÜR STEREORADAR

Im vorliegenden Abschnitt wurden bisher nur geometrische, nicht aber physiologische Aspekte des Stereoradars behandelt. Daher wurde auch gefolgert, daß der Konvergenzwinkel der Projektionsstrahlen nahe 90° sein soll. Es ist aber bekannt, daß ein visueller Stereoeffekt leichter erhalten wird, je kleiner $\Delta\Omega$ gewählt ist. Außerdem ist bekannt, daß Bilder nur dann einen visuellen Stereoeffekt verursachen, wenn die Bildqualität und Ausleuchtung des Objekts in den überlappenden Aufnahmen im wesentlichen gleich ist, und nur kleine Parallaxen auftreten, die etwa einem Winkelabstand von $70'$ entsprechen.

Bei Stereoradar (vor allem vom Flugzeug aus) werden Aufnahmen aber häufig mit verschiedenen Erhebungswinkeln erzeugt. Das Objekt wird daher völlig verschieden ausgeleuchtet, da die Intensität des Radarechos in erster Linie von der Einfallrichtung der Strahlung auf der reflektierenden Fläche abhängt (siehe Figur 4.15). Bei photographischen Aufnahmen wirkt sich dieser Effekt gering aus, weil die Einfallrichtung der Sonnenstrahlen sich in den benachbarten Bildflügen nur geringfügig verändert. Den vom geometrischen Standpunkt zur Erzielung hoher Genauigkeit geforderten grossen Schnittwinkeln der Projektionskreise entsprechen vom Standpunkt der Stereobetrachtung möglichst kleine Schnittwinkel, also Erhebungswinkel, die sich in den beiden Aufnahmen nur wenig unterscheiden sollen.

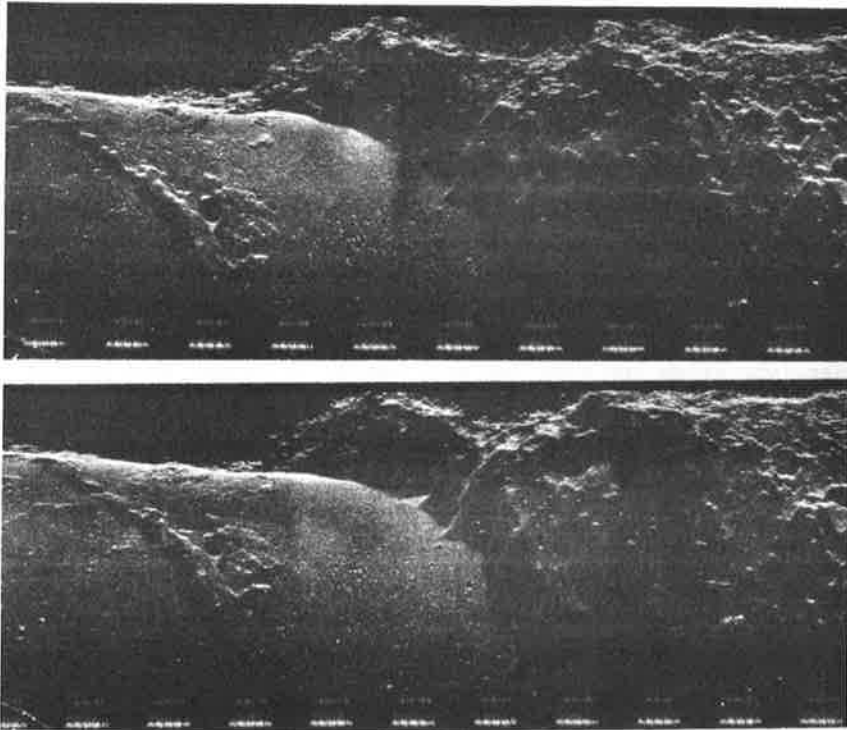
Für eine quantitative Analyse des visuellen Stereoeffektes und verschiedener Konfigurationen wären systematische Experimente mit echten Radaraufnahmen notwendig. Das derzeit verfügbare Bildmaterial reicht aber nicht einmal aus, um die Grenzen und Möglichkeiten der visuellen Stereobe-



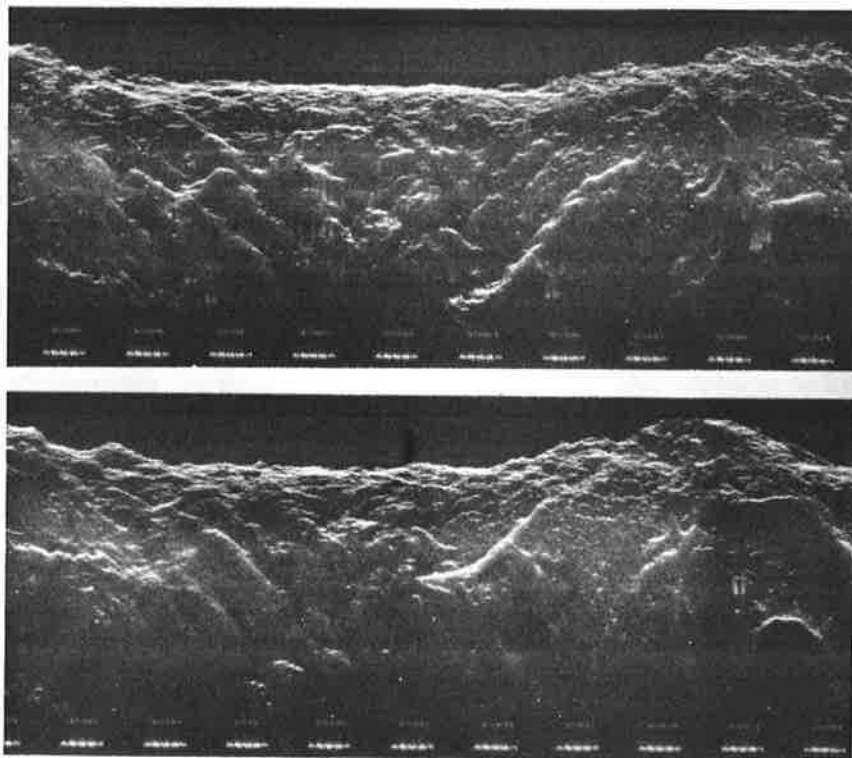
Figur 4.15: Beispiel eines beidseitigen Flugzeugradarstereomodelles, aufgenommen mit dem Goodyear GEMS-1000 System über den Estrella-Bergen bei Phoenix, Arizona

obachtung zu erfassen. Es kann nur die Schwierigkeiten aufzeigen, nicht aber zu ihrer Lösung beitragen. Die Satellitenradaraufnahmen vom Mond (Apollo 17 Mission, Apollo Lunar Sounder Experiment-ALSE) in Fig.4.16 demonstrieren an zwei Stereobildpaaren den mit wachsenden Konvergenzwinkeln $\Delta\gamma$

Stereobildpaar vom Appenin-Gebirge des Mondes



Stereobildpaar aus dem Oriental-Gebiet des Mondes



Figur 4.16: Beispiele zweier Stereomodelle mittels Apollo 17 ALSE Satellitenradar; das obere Stereopaar kann visuell in Stereo betrachtet werden, während das untere Bildpaar keine Stereobetrachtung erlaubt. 10 km

wachsenden Unterschied in den Bildern wegen der unterschiedlichen Ausleuchtung des Objektes und großen Parallaxen. Die Stereobetrachtung wird zunehmend schwieriger. Eine Analyse des Zusammenhanges zwischen Stereobetrachtung, Konvergenz der Projektionsstrahlen, Blickwinkel und Geländereief ist jedoch nicht möglich.

4.8. ZUSAMMENFASSUNG

Die Bildung eines Radarstereomodelles ist im allgemeinen nur bei Verwendung von Einstelldaten möglich (Positions- und Geschwindigkeitsvektor des Sensors). Mit diesen Daten lassen sich Stereomodelldaten p_x , p_y , p_z aus überbestimmten Systemen nach verschiedenen Verfahren berechnen.

Satellitenradar mit synthetischer Apertur läßt nur Stereoanordnungen zu, die durch Aufnahmen aus verschiedenen Umlaufbahnen erhalten werden (seitliche Überlappung). Vorwärtsüberlappung mittels Konvergentaufnahmen in einer Bahn sind praktisch nicht möglich.

Fehler des Geschwindigkeitsvektors des Sensors wirken sich nur in der x-Koordinate des Modelles (in der Richtung der Satellitenbahn) aus. Sie wachsen mit dem Abstand vom Objekt, der Bahnhöhe und dem Erhebungswinkel der Visurlinie. Positionsfehler quer zur Umlaufbahn (y) und in der Höhe (z) verursachen Modelldeformationen quer zur Flugrichtung (y) und in der Höhe. Diese sind nur von der Konvergenz der Projektionsstrahlen und dem Erhebungswinkel abhängig, wachsende Konvergenzwinkel verringern diese Fehler. Wachsende Erhebungswinkel führen zu kleineren Modellfehlern σ_y und größeren σ_z .

Für SEASAT-Projektparameter muß mit mittleren Stereomodelldaten von etwa ± 60 m für σ_x und σ_z , und von ± 100 m für σ_y gerechnet werden. Um Modellgenauigkeiten in der Größenordnung der Grundauflösung (SEASAT: = 25 m) zu erreichen, wären Konvergenzwinkel nötig, die wahrscheinlich einen visuellen Stereoeindruck nicht mehr erlauben, und die eine Veränderung der Radarparameter in überlappenden Aufnahmen erfordern.

Im allgemeinen folgt, daß die Bahnhöhe geringen Einfluß auf die Genauigkeit der Modellkoordinaten hat, wesentlich ist jedoch die Wahl der Erhebungswinkel. Der Konvergenzwinkel der Projektionsstrahlen muß so groß gewählt werden, daß gerade noch eine Stereobetrachtung möglich ist. Untersuchungen zur Bestimmung dieser Grenzen sind erforderlich. Wünschenswert wäre, entweder so große Gesichtsfeldbreiten zu erzeugen, daß ein günstiger Konvergenzwinkel aus einer großen Stereobasis folgt, oder die Möglichkeit zu besitzen, verschiedene Erhebungswinkel für Stereoradaraufnahmen zu erhalten und damit den Konvergenzwinkel entsprechend zu vergrößern.

5. RADARSTEREO- UND EXTERNE HÖHENDATEN

5.1. EINLEITUNG

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß die topographische Beschreibung einer Oberfläche mittels Stereoradar mit großen Fehlern behaftet sein kann, die sich aus den Fehlern der Einstelldaten ergeben. Diese setzen sich aus einem systematischen Anteil (Trend) und einer kleineren, nur über kurze Abstände korrelierten Komponente zusammen. Daher sind auch die Höhenfehler des Radarstereomodells im wesentlichen systematisch, mit Überlagerung einer kleineren zufälligen Komponente. Die aus dem Radarstereomodell gewonnenen Höhen haben also eine geringe absolute Genauigkeit; es kann aber erwartet werden, daß die relative Genauigkeit der Höhenunterschiede wesentlich größer ist.

Ein aktives Radarsystem, wie es zur Herstellung von Bildern verwendet wird, erlaubt auch die Gewinnung von Höhenprofilen des Geländes entlang der Nadirlinie der Satellitenbahn. Daher wird im allgemeinen zusammen mit den Radaraufnahmen die Messung von Geländeprofilen geplant. Die durch Radaraltimetrie gewonnenen Höhendaten können sehr genau sein, mit verschwindend kleinen systematischen Fehlern.

Es ist daher naheliegend, jedoch bisher ungebräuchlich, die stereoradargrammetrische Höhenkartierung auf diese Geländeprofile hoher absoluter Genauigkeit zu stützen. Damit kann die spärliche, durch das Radaraltimeter vermittelte Höheninformation aufgefüllt werden.

Die wesentliche Schwierigkeit liegt in der Tatsache, daß die mit dem Radaraltimeter erfaßten Geländepunkte nicht identifiziert werden können. Aus den Altimeterdaten folgt daher nicht ein Netz von Höhenpaßpunkten, sondern ein (Digitales) Höhenmodell (DHM). Es besteht die Aufgabe, dieses mit dem durch das Radarstereomodell zu vereinigen. Für dieses Interpolationsproblem werden im folgenden einige Lösungen angegeben und verglichen.

Die Verwendung externer Höhenpaßpunkte, also Geländepunkte, die im Radarbild identifizierbar sind, ist nicht Gegenstand des vorliegenden Kapitels, sondern wird im Kapitel 6 im Zusammenhang mit der radargrammetrischen Mondkartierung behandelt.

Kraus^x (1973) hat eine Variante der linearen Prädiktion für die Vereinigung zweier Gruppen von photogrammetrischen Höhenmessungen verwendet. Das Verfahren ist aber in der ursprünglichen Form nicht für das vorliegende Problem geeignet, da hier nicht von Messungsgruppen gleicher statistischer Charakteristik ausgegangen wird. Aufbauend auf Kraus^x (1973) wurden in einer vorhergehenden Arbeit (Leberl^x, 1976c) Erweiterungen der linearen Prädiktion entwickelt, um diese auch für Messungsgruppen unterschiedlicher Eigenschaften anwenden zu können. Diese werden der Vollständigkeit halber in dem folgenden Kapitel nochmals abgeleitet, diskutiert und in numerischen Experimenten angewendet. Hieraus folgen Grundlagen für die Anwendung der linearen Prädiktion und anderer Methoden zur Lösung der gestellten Aufgabe.

5.2. STATISTISCHES MODELL DER HÖHENMESSUNGEN

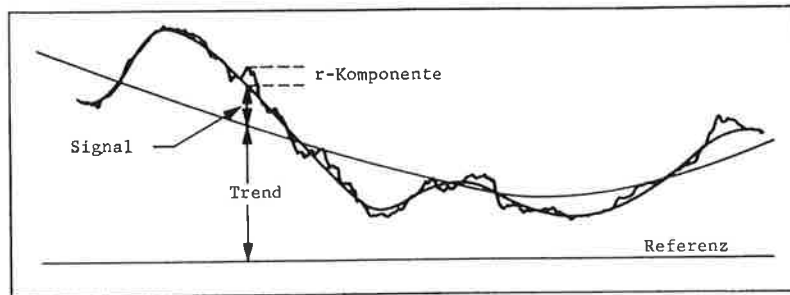
Eine Geländeoberfläche $z = z(x,y)$ kann als Summe von drei Komponenten dargestellt werden (Figur 5.1):

$$z(x,y) = t(x,y) + s(x,y) + r(x,y) \quad (5.1)$$

Die erste, $t(x,y)$ ist der 'Trend', die zweite, $s(x,y)$ das Signal und die dritte, $r(x,y)$ eine Komponente, die einer Störfunktion ähnelt. Der Trend $t(x,y)$ beschreibt den systematischen Teil der

Funktion. Das Signal $s(x,y)$ ist eine Zufallsfunktion, deren Kovarianzfunktion $C_s(d)$ die statistischen Eigenschaften in Funktion der Distanz d beschreibt:

$$C_s(d) = 0 \quad \text{für } d \rightarrow \infty \quad (5.2)$$



Figur 5.1: Definitionen der statistischen Komponenten einer Geländeoberfläche, die sich aus Trend, Signal s und Signal r zusammensetzt.

Die Funktion $r(x,y)$ ist ebenfalls eine Zufallsfunktion. Ihre Kovarianzfunktion $C_r(d)$ wird für $d > 0$ klein:

$$C_r(d) \geq 0 \quad \text{für } d = 0 \quad (5.3)$$

$$C_r(d) \rightarrow 0 \quad \text{für } d \neq 0$$

Die Einführung der Zufallsfunktionen $r(x,y)$ in das Modell des Geländes ermöglicht es, bei der numerischen Ermittlung der Kovarianzfunktion eine als Störfunktion wirkende Komponente zu berücksichtigen, auch wenn theoretisch fehlerfreie Beobachtungen diskreter Geländehöhen vorliegen. Für fehlerfreie Messungen gilt daher:

$$C_{s+r}(d) = C_s(d) \quad (5.4)$$

$$C_{s+r}(0) = C_s(0) + C_r(0)$$

Die Bezeichnung "Störfunktion" ist nur für Beobachtungsfehler zutreffend, nicht aber für eine Komponente des beobachteten Phänomens. Die Funktion $r(x,y)$ wird daher einfach mit "r-Komponente" bezeichnet.

Der Meßungsfehler der stereoradargrammetrischen Geländehöhe $z'(x,y)$ setzt sich aus einem Trend t' , dem Signal s' und der Störfunktion r' zusammen.

$$z'(x,y) = z(x,y) + t'(x,y) + s'(x,y) + r'(x,y) \quad (5.5)$$

Die Fehler der Altimetermessungen $z''(x,y)$ hingegen enthalten wegen ihrer hohen Genauigkeit nur das Signal s'' und die Störfunktion r'' , nicht aber den Trend t . Daher gilt hiefür:

$$z''(x,y) = z(x,y) + s''(x,y) + r''(x,y) \quad (5.6)$$

Die Signale s' , s'' und die Störfunktionen r' , r'' werden mittels ihrer Kovarianzfunktionen $C_{s'}(d)$, $C_{s''}(d)$, $C_{r'}(d)$, $C_{r''}(d)$ statistisch beschrieben.

Im folgenden wird die lineare Prädiktion nur auf die Zufallsfunktionen, nicht aber auf die deterministischen Größen $t(x,y)$, $t'(x,y)$ angewandt. Für die vom Trend befreiten diskreten Höhenmessungen e'_i , e''_j ($e'_i = e'(x_i, y_i)$):

$$e'_i = s_i + s'_i + r_i + r'_i \quad i = 1, \dots, n_i \quad (5.7a)$$

$$e''_j = s_j + s''_j + r_j + r''_j \quad j = 1, \dots, n_j \quad (5.7b)$$

wobei $s_i = s(x_i, y_i)$, erhält man die Kovarianzen $C_{e'}(d)$, $C_{e''}(d)$ und die Kreuz-Kovarianz $C_{e'e''}(d)$. Im folgenden wird das Argument der Kovarianzfunktion weggelassen ($C_{e'}(d) = C_{e'}$).

Auf die Bedeutung der Trendberechnung wird im Abschnitt 5.5 eingegangen. Die nach der Trendeliminierung verbleibenden Residuen e' , e'' führen in einem Standardalgorithmus der Kovarianzrechnung auf die Funktionen $C_{e'}$, $C_{e''}$, $C_{e'e''}$. Diese Funktionen werden zur linearen Prädiktion benötigt. Ist zusätzlich zu z' , z'' noch eine dritte Messungsgruppe z''' vorgegeben, so gilt auch für diese nach Trendeliminierung:

$$e'''_k = s_k + s'''_k + r_k + r'''_k \quad k = 1, \dots, n_k \quad (5.7c)$$

5.3. LINEARE PRÄDIKTION

Aufbauend auf den Zufallskomponenten $\underline{e}' = (e'_1, e'_2, \dots, e'_{ni})$; $\underline{e}'' = (e''_1, e''_2, \dots, e''_{nk})$... ergibt sich eine Schätzung $\bar{s}_i + \bar{r}_i$ der Signale $s = s(x,y)$ und $r = r(x,y)$ auf Grund von (Yaglom^x, 1962):

$$\bar{s}_i + \bar{r}_i = \underline{q}_i \underline{Q}^{-1} \underline{e} \quad (5.8)$$

wobei

$$\underline{e} = (\underline{e}', \underline{e}'', \dots)$$

Die Matrix \underline{Q} besteht aus den Kovarianzen des Vektors \underline{e} und enthält daher spezifische Werte der Autokovarianzfunktionen $C_{e'}$, $C_{e''}$, $C_{e'e''}$, ... :

$$\underline{Q} = \begin{vmatrix} C_{e'} & C_{e'e''} & \vdots \\ C_{e'e''} & C_{e''} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix}$$

wobei

$$\underline{Q}_{e'} = \begin{bmatrix} C_{e'}(d_{11}) & C_{e'}(d_{12}) & \dots & C_{e'}(d_{1n_i}) \\ C_{e'}(d_{21}) & C_{e'}(d_{22}) & \dots & C_{e'}(d_{2n_i}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{e'}(d_{n1}) & C_{e'}(d_{n2}) & \dots & C_{e'}(d_{n_i n_i}) \end{bmatrix}$$

Für $\underline{Q}_{e''}$, $\underline{Q}_{e'e''}$ ergibt sich das logische Äquivalent von $\underline{Q}_{e'}$.

Der Vektor \underline{q}_i enthält die Kreuz-Kovarianzen $C_{(s+r), e'}$, $C_{(s+r), e''}$, ... zwischen dem Signal ($s_i + r_i$) des Geländes und dem Vektor $\underline{e} = (e', e'', \dots)$.

Kann nun angenommen werden, daß s_i weder mit s' oder s'' , noch mit r' , r'' oder r korreliert ist, so gilt nach Gl.(5.7):

$$C_{(s+r)e'} = C_{(s+r)e''} = C_s + C_r \tag{5.9}$$

Sind die statistischen Eigenschaften des Geländes bekannt, so liegen die Kovarianzfunktionen C_s , C_r vor. Sind jedoch C_s und C_r einer direkten Beobachtung und Berechnung nicht zugänglich, so müssen hierfür Annahmen getroffen werden. Die Möglichkeiten, um Werte für C_s und C_r aus den gegebenen Meßdaten e' , e'' , ... unter der Vorgabe von Randbedingungen zu erhalten, werden im folgenden diskutiert.

5.4. KOVARIANZBEZIEHUNGEN

Die Kovarianz $C_{s+r} = C_s + C_r$ des Geländes ist in einigen Beziehungen enthalten, die sich aus den Gl. (5.7) ergeben. Es gilt:

$$C_{e'} = C_s + C_r + C_{s'} + C_{r'} \tag{5.10a}$$

$$C_{e''} = C_s + C_r + C_{s''} + C_{r''} \tag{5.10b}$$

$$C_{e'e''} = C_s + C_r + C_{s's''} \tag{5.10c}$$

$$C_{e'''} = C_s + C_r + C_{s'''} + C_{r'''} \tag{5.10d}$$

$$C_{e'e'''} = C_s + C_r + C_{s's'''} \tag{5.10e}$$

$$C_{e''e'''} = C_s + C_r + C_{s''s'''} \tag{5.10f}$$

usw.

Gl. (5.10) formen Bedingungen, denen die Kovarianzfunktionen genügen müssen.

Die Berechnung der Kovarianzfunktionen der e' , e'' ist direkt möglich. Nach dem von zum Beispiel durch Kraus und Mikhail^x (1972) angegebenen Algorithmus ergeben sich empirische Kovarianzwerte für eine Reihe von Distanzklassen $d_i - \Delta d \leq d \leq d_i + \Delta d$. Durch diese diskreten Werte wird eine Funktion mit zwei Variablen gelegt, die zu einer positiv definiten Kovarianzmatrix \underline{Q} führt.

Nach Rummel^x (1976)¹⁾ ist eine solche Funktion zum Beispiel:

$$\begin{aligned} C(d) &= \frac{C_0}{1+d^2/C_1^2} & d \neq 0 \\ C(0) &= V & d = 0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Die Diskontinuität von $C(d)$ für $d = 0$ ergibt die Kovarianz der unkorrelierten Komponenten der Zufallsfunktion:

$$\begin{aligned} (V-C_0)_{e'} &= C_{r'} + C_r \\ (V-C_0)_{e''} &= C_{r''} + C_r \\ (V-C_0)_{e'e''} &= C_r \end{aligned} \quad (5.12)$$

Es gilt nun, für die lineare Prädiktion nach Gl. (5.8) und Gl. (5.9) die Kovarianzfunktion C_s zu bestimmen. Sind die statistischen Eigenschaften des Geländes bekannt, so liegt C_s vor. Da sich aus Gl. (5.12) auch $C_{r'}$, $C_{r''}$ ergeben, liefern Gl. (5.10 a,b,c) als Nebenprodukt noch die Kovarianzen $C_{s'}$, $C_{s''}$, deren Kenntnis jedoch für die Prädiktion nicht notwendig ist.

Ist über C_s keine Aussage zu machen, wohl aber über das Verhältnis $a(d)$ der Kovarianzen $C_{s'}$, $C_{s''}$:

$$a(d) = C_{s'} / C_{s''} \quad (5.13)$$

so ergibt sich aus Gl. (5.10. a,b) die theoretische Möglichkeit, C_s zu berechnen, da:

$$C_s = \left\{ (C_{e'} - C_{r'}) - (C_{e''} - C_{r''}) a(d) \right\} / (1-a(d)) \quad (5.14)$$

In der Praxis ist Gl. (5.14) jedoch nicht anwendbar, wenn $a(d)$ einen Wert nahe 1 hat. Überdies erhebt sich für die Praxis die Frage, inwieweit es sinnvoll sein kann, erst eine Reihe von Annahmen (über Unabhängigkeiten von s, s', s'' usw., über die Form von $C_{e'}, C_{e''}$, über $a(d)$) zu treffen, um dann C_s zu berechnen, statt direkt für C_s eine Funktion vorzugeben.

Für $a(d) = 1$ muß zur Berechnung von C_s die Gl. (5.10c) und somit eine Annahme über $C_{s'}, s''$ zu Hilfe genommen werden.

Ein Sonderfall liegt vor, wenn die zwei Messungsgruppen Fehler gleicher Korrelationslängen ($C_1' = C_1''$), aber verschiedener Größe haben ($C_0' \neq C_0''$). Die Messungen sollen also verschiedene Gewichte erhalten. Interpoliert man zwei Flächen, jede aus einer Gruppe der Messungen, und bildet dann das gewogene Mittel (Gewichte 1:p), so wird vorausgesetzt, daß:

$$s' = -p s'' \quad (5.15)$$

Es gilt daher:

$$\begin{aligned} C_{s'} &= p^2 C_{s''} \\ C_{s's''} &= -p C_{s''} = -\frac{1}{p} C_{s'} \end{aligned} \quad (5.16)$$

1) R. Rummel: Persönliche Mitteilung (Ohio State University)

Es ergibt sich weiters aus Gl. (5.10a,b) und (5.16) ein Ausdruck für p:

$$p = \frac{C_{e'} - C_{e'e''} - C_{r'} - C_r}{C_{e'e''} - C_{e''} + C_{r''} + C_r} \quad (5.17)$$

In der Praxis sind die Werte der Kovarianzen nur fehlerhaft bestimmt. Daher ist aus Gl.(5.17) der Wert für p unsicher. Darum ist eine direkte Annahme von p gerechtfertigt. Mit p ergibt sich C_s aus Gl. (5.10 a,c) mit:

$$C_s = \left\{ (C_{e'} - C_{r'}) + pC_{e'e''} \right\} / (p + 1) - C_r \quad (5.18)$$

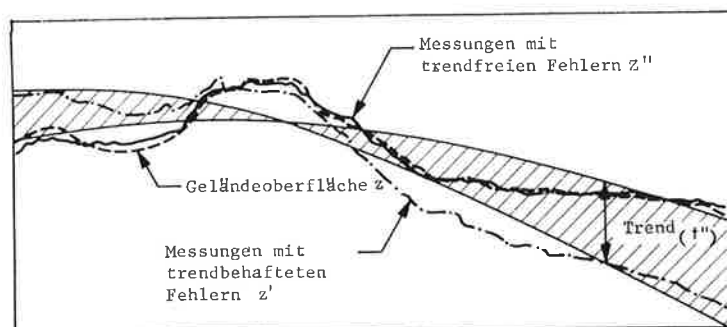
Die ursprünglich von Kraus^x (1973) formulierte Erweiterung der linearen Prädiktion auf zwei Messungsgruppen gleicher Genauigkeit und gleicher Korrelationslängen ergibt sich nun als Sonderfall der hier gegebenen allgemeineren Formulierung: Kraus erhält $p = 1$. Überdies gilt $C_r = 0$. Daher ermittelt Kraus^x (1973) die für die Prädiktion benötigte Funktion C_s aus:

$$C_s = \frac{C_{e'e''} + C_{e'} - C_{r'}}{2} \quad (5.19)$$

5.5. TREND

Die hier beschriebene Methode der linearen Prädiktion setzt Meßdaten voraus, die statistisch stationär und homogen sind. Aber weder die Geländehöhen, noch die Meßdaten sind stationär und homogen, d.h. ihr Mittelwert ist nicht konstant, und ihre Kovarianzfunktion ist nicht in allen Teilen gleichartig. Postuliert man aber, daß die Geländehöhen zum Teil trendartig variieren, und nur die Abweichungen vom Trend als Zufallsfunktion interpretiert werden, so können diese Abweichungen gesichert als stationär und homogen betrachtet werden.

Aus numerischen Untersuchungen ergibt sich, daß die lineare Prädiktion auch mit solchen genähert homogenen und stationären Daten möglich und gegenüber Abweichungen relativ unempfindlich ist. Eine befriedigende und einfache Methode der Trendberechnung folgt daher aus der Ermittlung eines überbestimmten Polynoms niedriger Ordnung (1.,2. oder 3.).



Figur 5.2: Erläuterung der Konzepte von Trends in zwei Messungsgruppen.

Die Eliminierung des Trends t der Geländehöhen hat ausschließlich den Zweck, die für die Prädiktion notwendige statistische Charakteristik zu sichern.

Haben die Meßfehler einen Trend t', t'' , so bedeutet dies eine geringe absolute Meßgenauigkeit. Trendeliminierung stellt hier vor allem die Verbesserung der absoluten Genauigkeit und in zweiter Linie die Vorbehandlung der Daten im Sinne statistischer Stationarität und Homogenität dar.

Ist nur eine einzige Gruppe von Messungen mit trendhaften Fehlern gegeben, so besteht keine Möglichkeit, den Trend des Phänomens und der Meßfehler zu trennen. Im Falle der Stereoradar- und Altimetriedaten jedoch besteht diese Möglichkeit, wenn angenommen werden kann, daß die eine Gruppe der Messungen trendfreie Fehler hat. Somit stellt ein überbestimmtes Polynom $pol''(x,y)$, berechnet aus den Altimetriedaten z'' , den Trend $t(x,y)$ des Geländes dar, während ein aus den Stereoradardaten bestimmtes Polynom $pol'(x,y)$ die Summe aus $t(x,y)$ und dem Trend $t'(x,y)$ der Meßfehler ergibt. Somit gilt (Fig.5.2):

$$\begin{aligned} t(x,y) &= pol''(x,y) \\ t'(x,y) &= pol'(x,y) - pol''(x,y) \\ t''(x,y) &= 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

5.6. ANDERE METHODEN ZUR VERSCHMELZUNG VON HÖHEN VERSCHIEDENER STATISTISCHER EIGENSCHAFTEN

Die Ermittlung eines digitalen Höhenmodells auf Grund von unabhängigen Gruppen von Datenpunkten verschiedener statistischer Eigenschaften ist ein Interpolationsproblem. So wie in allen Interpolationsaufgaben sind auch hier verschiedene Lösungen denkbar. Beschränkt man sich auf die flexiblen, computergerechten Methoden der punktweisen Interpolation, so sind bekannte Alternativen zur linearen Prädiktion vor allem die bi-lineare Interpolation, und die Methode der gleitenden Mittelwerte (Leberl^x, 1975f).

5.6.1 Bi-Lineare Interpolation

Für die Interpolation eines Punktes werden aus jeder Gruppe von Messungen die vier nächsten Datenpunkte gesucht und zur Berechnung eines bilinearen Polynoms herangezogen. Es werden somit zwei Höhenwerte erhalten, aus denen ein gewogenes Mittel berechnet wird, wobei die Unterschiede in der Genauigkeit der beiden Messungsgruppen berücksichtigt werden können.

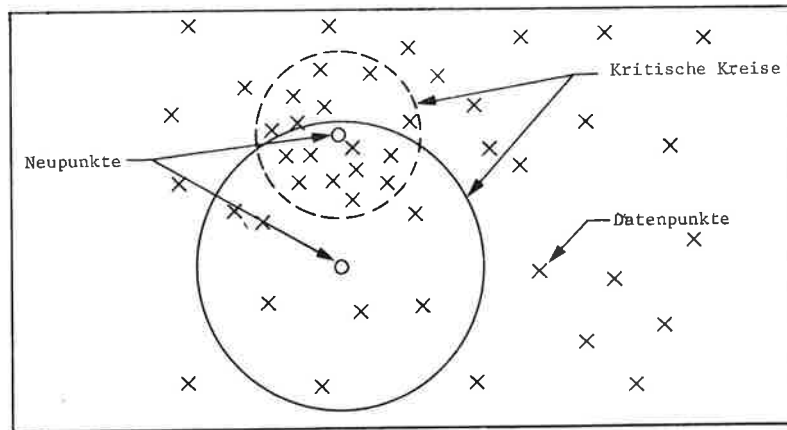
Diese Methode erscheint recht einfach, erfordert jedoch einen beachtlichen Aufwand für die Auswahl der vier nächsten Datenpunkte, falls diese kein regelmäßiges Gitter bilden. Die Anwendung dieser Methode stößt auf weitere Schwierigkeiten, wenn sich die Dichte der Datenpunkte in den zwei Messungsgruppen stark unterscheidet. Denn das Gewicht einer interpolierten Höhe ist nicht nur von der Genauigkeit der Datenpunkte, sondern auch von deren Dichte abhängig. Das DHM, welches nur aus sehr genauen, aber sehr weit voneinander liegenden Altimetrieprofilen abgeleitet wird, ist sehr ungenau. Auch ohne numerische Ergebnisse kann also geschlossen werden, daß eine direkte Anwendung der bi-linearen Interpolation nicht in der Lage ist, die hohe absolute Genauigkeit der Altimetriedaten mit der relativen Genauigkeit der Stereoradardaten vorteilhaft zu verbinden. Es müssen also die Meßdaten zur Trendeliminierung auch in dieser Methode vorbehandelt werden.

5.6.2 Gleitende Mittelwerte

Die Methode der gleitenden Mittelwerte beruht auf der Auswahl der n nächsten Datenpunkte aus den Stereohöhen und m Datenpunkte aus den Altimetriehöhen. Hierauf kann durch die n + m Punkte ein Polynom von der Ordnung (1,2 oder 3) berechnet werden (Figur 5.3). Den Punkten wird ein Gewicht w (d) entsprechend ihrem Abstand d vom zu interpolierenden Punkt, wie auch entsprechend ihrer Genauigkeit gegeben, wobei a_i den Gewichtskoeffizienten der Messungsgruppe (i) darstellt:

$$w_i(d) = a_i / (1 + d^k) \quad i = 1,2 \quad (5.21)$$

Im allgemeinen dürfte auch für diese Methode dasselbe gelten wie für die bi-lineare Interpolation. Die Verwendung von mehr als den vier nächsten Datenpunkten wird ein etwas günstigeres Ergebnis liefern, jedoch geht auch hier die hohe absolute Genauigkeit der Altimetriehöhen wegen ihrer geringen Dichte verloren, falls nicht die nur für die lineare Prädiktion notwendige Trendeliminierung vorgenommen wird.



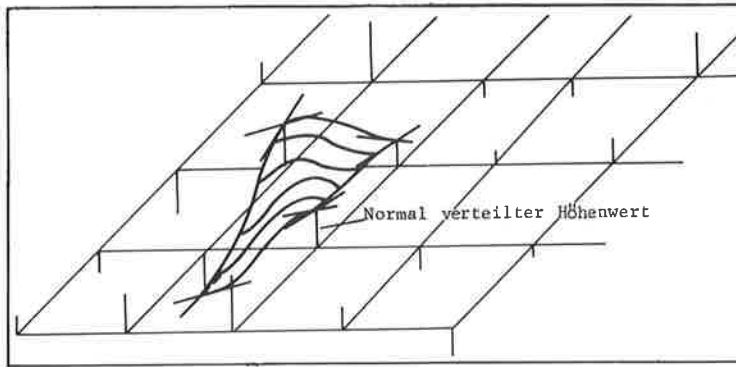
Figur 5.3: Definitionen zur Erklärung der Methode der gleitenden Mittelwerte für die Interpolation mittels zweier Messungsgruppen.

5.7. NUMERISCHE UNTERSUCHUNG - COMPUTER-GENERIERUNG VON HÖHENMESSDATEN

Die beschriebene Problemstellung und ihre Lösungen werden im folgenden numerisch illustriert. Zu diesem Zweck werden Radarstereohöhen und Altimetriemessungen im Computer simuliert. Ein Algorithmus wurde erstellt, der sowohl den Trend wie auch Signale erzeugt. Der wesentliche Unterschied zwischen Trend und Signalen liegt im Maßstab. Denn der in einem gegebenen Fall erscheinende Trend kann in einem kleineren Maßstab als Signal interpretiert werden.

Für den Trend und das Signal werden erst in den Schnittpunkten eines Gitters normalverteilte Höhenwerte erzeugt. Darauf werden mit benachbarten Höhenwerten in jedem Gitterpunkt die Tangenten in der Richtung der Gitterlinie berechnet (siehe Fig.5.4). Damit erhält man in jeder Gittermaschine vier Höhen- und acht Tangentenwerte. Diese 12 Werte definieren ein Polynom mit 12 Koeffizienten.

$$z = a_1 + a_2 + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6xy + a_7x^2y + a_8x^3y + a_9y^2 + a_{10}xy^2 + a_{11}y^3 + a_{12}xy^3 \quad (5.22)$$



Figur 5.4: Prinzipskizze zur Generierung einer Geländeoberfläche aus einem quadratischen Gitter von normalverteilten Höhen.

Für jede Gittermasche wird ein Polynom dieser Art bestimmt; die aus diesen Polynomstücken zusammengesetzte Fläche ist kontinuierlich. Als Interpolationsmethode für Flächen im dreidimensionalen Raum wurde die beschriebene Methode erstmals von Jancaitis und Junkins^x (1973) angegeben.

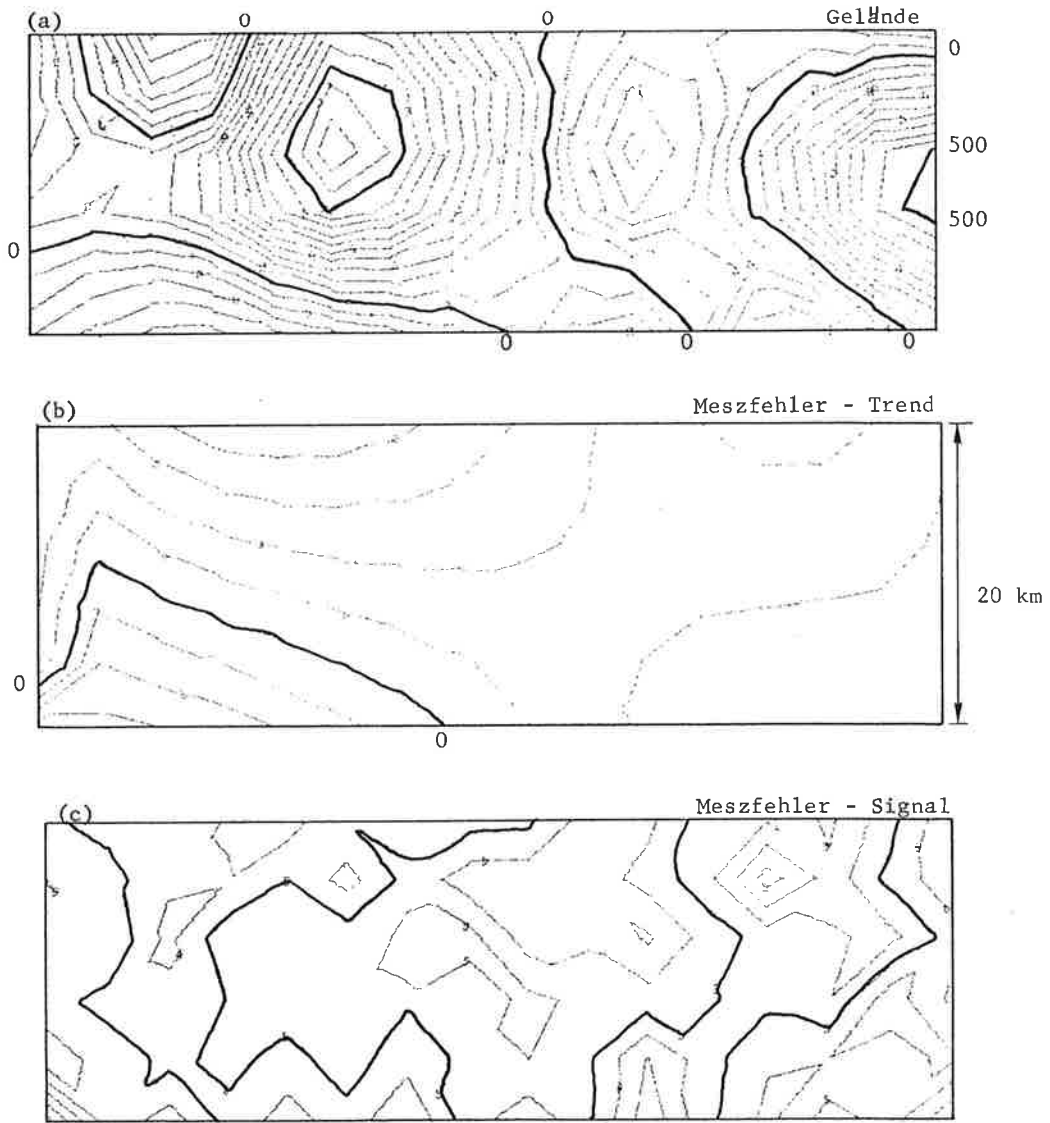
Eine Unterscheidung in Trend und Signal kann nun sehr einfach durch eine geeignete Wahl der Maschengrößen und Standardabweichung der normalverteilten Höhen erreicht werden. Messungen $z'(x,y)$, $z''(x,y)$ setzen sich aus den in Gl. (5.5) und (5.6) angegebenen Komponenten zusammen. Figur 5.5 zeigt Ausschnitte aus einer Darstellung von computergenerierten Geländehöhen und Messungsfehlern, die im folgenden zur Demonstration der Verschmelzung von Höhendaten verwendet werden. Die zur Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.1 angeführt.

5.8. NUMERISCHE UNTERSUCHUNG - ERGEBNISSE

Die Verbesserung der Höhengenaugigkeit durch eine sinnvolle Kombination von Radarstereo- und Altimetriedaten wird in Figur 5.6 gezeigt. In einem Netz von 75 Vergleichspunkten wurden Höhen nur aus Altimetrie- oder Stereodaten ermittelt (Abb.5.6, Kurven (z'), (z'')), und auch aus beiden Messungsgruppen gemeinsam entsprechend der beschriebenen Methoden für die Trendeliminierung und Prädiktion (Kurve (e' , e'')). Figur 5.7 zeigt die numerisch ermittelten und für die Prädiktion verwendeten Kovarianzfunktionen der beiden Messungsgruppen. Für die Altimetriedaten werden 2 parallele Profile entlang des Randes des Aufnahmegebietes verwendet.

<u>Gelände</u>	Trend t	Signal s
Maschenweite	60 km	10 km
Standardabweichung der normalverteilten Höhen	0 m	300 m
<u>Stereomessung</u>	Trend t'	Signal s'
Maschenweite	60 km	10 km
Standardabweichung der normalverteilten Höhen	100 m	40 m
<u>Altimetriemessung</u>	Trend t'' und Signal s'' werden Null gesetzt	
<u>Unkorrelierte Komponenten</u>		
r = 0 m;	r' = 20 m;	r'' = 5 m

Tabelle 5.1: Parameter zur Generierung der Höhendaten zur Veranschaulichung der Lösung des Problems der Verschmelzung von Radarstereo- und Altimetermessungen

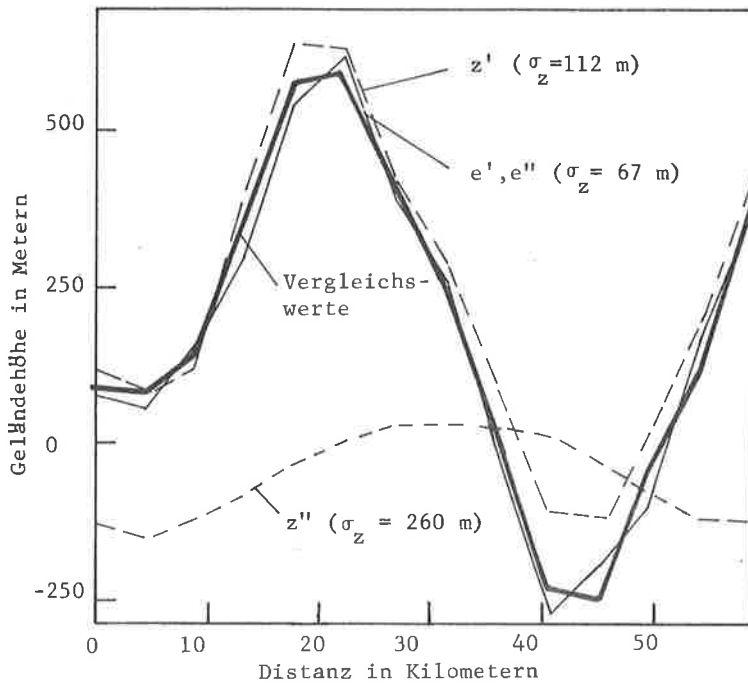


Figur 5.5: Schichtenlinien des simulierten Terrains und der Meßfehler. Schichtenlinienintervalle in (a), (b) 50 m; in (c) 25 m. In (b), (c) sind die betonten Linien in 0 m Höhe.

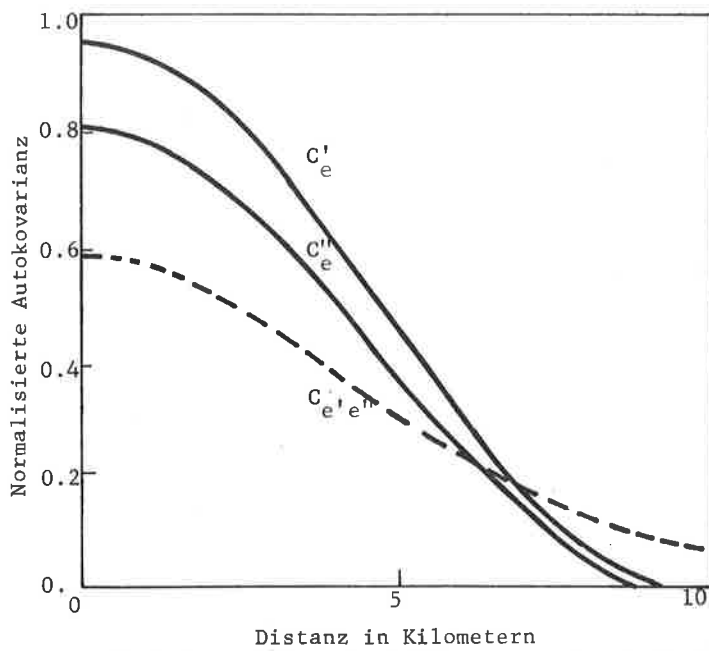
Ein Vergleich der verschiedenen Methoden der Vereinigung der Höhendaten findet sich in Tab. 5.2. Dieser Vergleich beruht nicht auf den Daten der Figuren 5.5 und 5.6, sondern auf zwei Gruppen von Messungen in quadratischen Gittern von 10 x 10 Punkten (Leberl^x, 1976 c). Die mittleren Unterschiede zwischen wahren und interpolierten Höhen in Vergleichspunkten sind in Tab.5.2 relativ zu den Werten der bi-linearen Interpolation angegeben. Danach ergeben sich für die lineare Prädiktion und die gleitenden Mittelwerte Fehler, die etwa 15 % kleiner als jene der bi-linearen Interpolation sein können.

Interpolationsmethode	Ergebnis
Bi-lineare Interpolation	1.00
Gleitende Mittelwerte	0.88
Lineare Prädiktion	0.86

Tabelle 5.2: Methodenvergleich für die Interpolation mittels zweier Messungsgruppen



Figur 5.6: Interpolationsergebnisse, dargestellt für ein Profil von Vergleichspunkten in der Mitte des Gebietes, entlang der Längsrichtung. Die σ -Werte beziehen sich auf das Gesamtergebnis, nicht auf das gezeigte Vergleichsprofil.



Figur 5.7: Auto- und Kreuzkovarianzen von e' , e'' der in Abb. 5.5 gegebenen Flächen.

Die Verwendung verschiedener Kovarianz- und Gewichtsfunktionen ergab, daß weder die Methode der Prädiktion noch der gleitenden Mittelwerte sehr empfindlich für diesen Parameter ist. Wesentlich ist die Eliminierung des Trends der Stereo-Messungsfehler $t'(x,y)$ unter Verwendung der Altimetriedaten.

5.9. ZUSAMMENFASSUNG

Da Radarstereomodelle stark verzerrt sein können, ist es naheliegend, die Verbindung der Stereodaten mit unabhängigen, absolut genauen Altimetrieprofilen zu untersuchen. Der vorliegende Abschnitt behandelt drei mögliche Methoden der Vereinigung von Messungsgruppen unterschiedlicher Charakteristik, die bi-lineare Interpolation, gleitende Mittelwerte sowie die lineare Prädiktion. Ein statistisches Modell der Geländehöhen und Messungsfehler, die beide trend- und signalartige Komponenten enthalten, dient als Basis für eine Erweiterung der linearen Prädiktion für die Anwendung auf zwei Messungsgruppen unterschiedlicher Genauigkeit. Dies ist die Weiterführung eines durch Kraus^x (1973) für photogrammetrische Höhenmodelle vorgeschlagenen Verfahrens zur Vereinigung von Messungsgruppen gleicher Genauigkeit. Es zeigt sich, daß im vorliegenden Fall von Höhen ungleicher statistischer Charakteristik Annahmen für die für die lineare Prädiktion benötigten Kovarianzfunktionen getroffen werden müssen. Eine empirische Ermittlung der Kovarianzdaten aus den Messungen ist im Gegensatz zum Fall der linearen Prädiktion mit einer Messungsgruppe nicht mehr ohne weiteres möglich.

Die theoretischen Begriffe werden abschließend numerisch veranschaulicht und die Verbesserung der Höhengenaugigkeit von Radaraufnahmen durch Benützung von Altimetriedaten demonstriert.

6. RADARGRAMMETRISCHE MONDKARTIERUNG MITTELS APOLLO-17-RADARSCHRÄGAUFNAHMEN

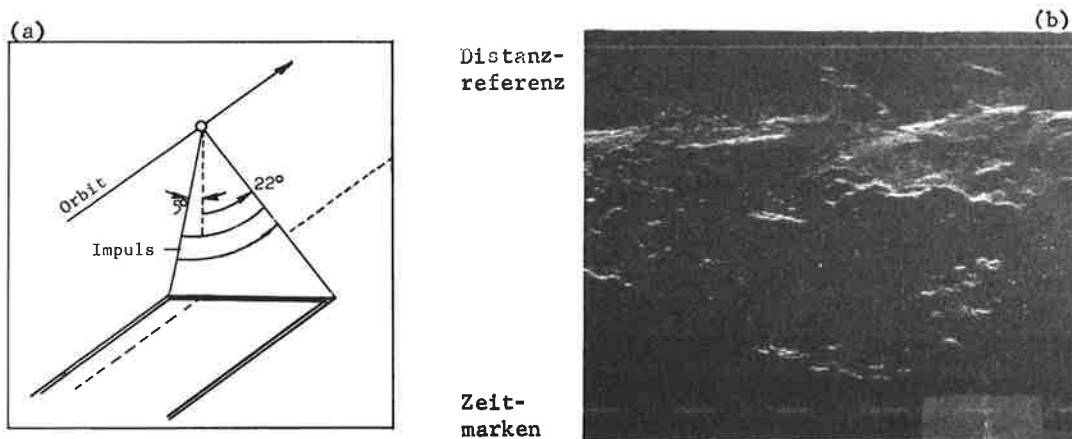
6.1. EINLEITUNG

Die ersten Satellitenradarschrägaufnahmen wurden 1972 in der den Mond umkreisenden bemannten Kommandosonde der Apollo 17 Mission erzeugt. Im vorliegenden Kapitel wird über die radargrammetrischen Untersuchungen mittels dieser Mondbilder berichtet, wobei auf die bisher nur in englischer Sprache publizierten Arbeiten verwiesen wird (Leberl, 1975e; 1976a). Einleitend wird der Radarsensor beschrieben, sodann das benützte Radarstereobildpaar. Die Auswertung erfolgte sowohl für das Radareinzelbild wie auch das Stereomodell. Es wird gezeigt, daß aus den Aufnahmen Kartierungen mit mittleren Fehlern von etwa ± 100 m in der Höhe und ± 250 m in der Lage abgeleitet werden können.

6.2. BESCHREIBUNG DES APOLLO 17 ALSE - RADARAUFNAHMESYSTEMS

Eines der wissenschaftlichen Experimente der letzten bemannten U.S. Raumfahrtmission zum Mond (Apollo 17 - Dezember 1972) was das Apollo Lunar Sounder Experiment (ALSE - zu deutsch etwa: Apollo Mondecholotungsexperiment). Der Zweck dieses Experimentes war in erster Linie, mittels Mikrowellenstrahlung geologische Strukturen innerhalb des Mondes, bis zu einer Tiefe von einigen Kilometern, aufzuspüren. Das hierfür verwendete Instrument war ein in der Apollo 17-Kommandokapsel montiertes Seitwärts-Radar-System mit synthetischer Apertur, das mit drei Wellenlängen, 60 m, 20 m (HF = High Frequency) und 2 m (VHF - Very High Frequency) arbeiten konnte. Seitwärtsradar durchdringt unter Umständen gewisse Oberflächenschichten und bildet somit verdeckte Objekte ab. Da die Durchdringungsfähigkeit mit der Wellenlänge zunimmt, wurden für ALSE drei ungewöhnlich lange Wellen verwendet. Für terrestrische Abbildungen der Oberfläche mit Seitwärtsradar werden meist Wellenlängen von 8 mm bis 25 cm benützt.

Das Verfahren hat eine größere Erfolgchance, wenn die Strahlung möglichst unter einem rechten Winkel auf die zu durchdringende Oberflächenschicht trifft, also die Erhebungswinkel klein sind.



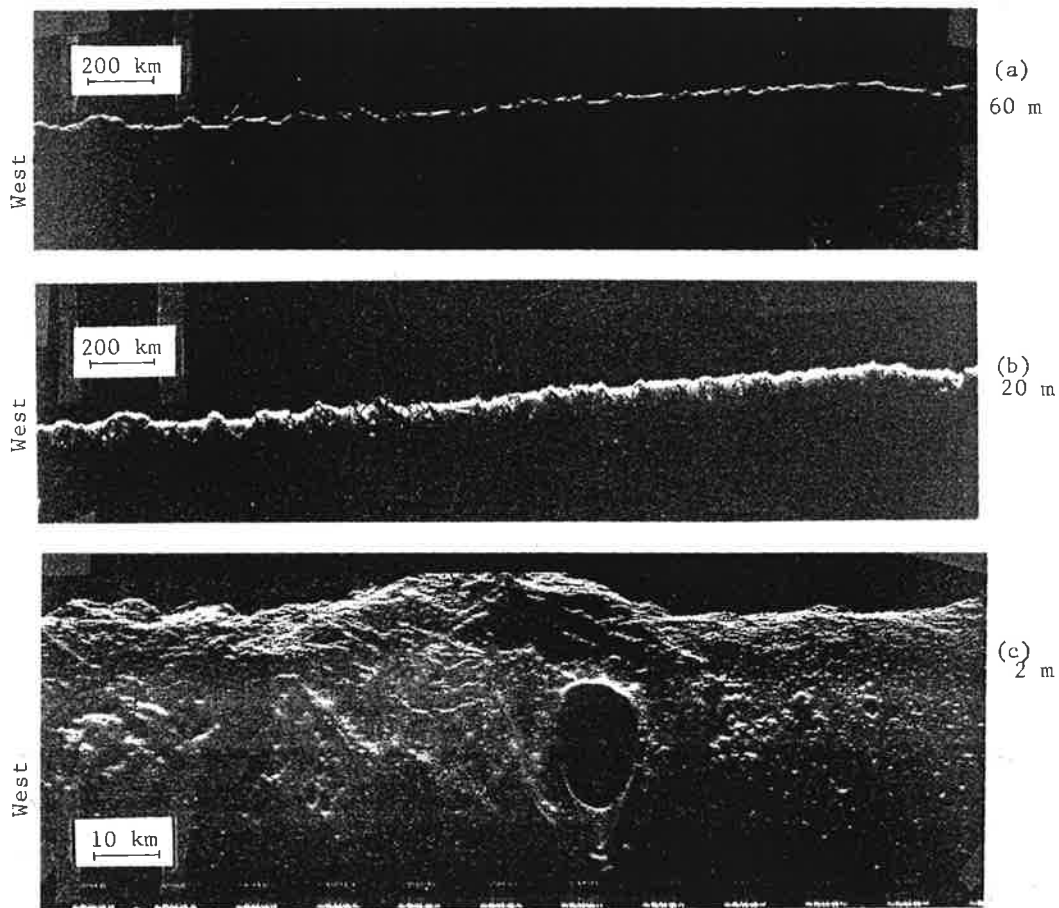
Figur 6.1: Abtastanordnung und Beispiel einer Radaraufnahme für das Apollo 17 ALSE VHF Seitwärtsradarsystem. (a) Abtastwinkel; (b) Aufnahme mit Distanzreferenzlinie und Zeitmarken.

Aus diesem Grund arbeitete das ALSE-System mit Erhebungswinkeln um 0° (siehe Fig.6.1). Dieses Radarsystem entspricht daher im wesentlichen einem Profilrekorder, der als ein Nebenprodukt auch eine Seitwärtsradaraufnahme erzeugt (Phillips^x u.a., 1973). Figur 6.2 zeigt Beispiele von HF- und

VHF-Radarbildern des Mondes.

Für die Abbildung der Oberfläche sind bekanntlich möglichst kurze Wellenlängen erwünscht, denn für diese sind die Reflexionen diffus (die Planetenoberfläche erscheint rauher) und das Auflösungsvermögen ist größer. Die VHF- (2 m) Wellenlänge ergab daher die besten Aufnahmen der Mondoberfläche (Fig.6.2c). Mit den 20 m und 60 m Wellenlängen wurden nur entlang der Nadirlinie des Sensors (dem Längsprofil) Reflexionen von Teilen der Oberfläche empfangen (Fig.6.2a,-b), nicht aber seitlich davon.

Die ALSE-VHF Radarbilder stellen aber nicht die Grenze der zur Zeit der Apollo 17 Mission bestehenden technologischen Möglichkeiten dar. Diese Bilder waren ein Nebenprodukt in einem Radarecholotungsprojekt, das System war nicht für die Erzeugung von Aufnahmen der Mondoberfläche entwickelt. Die Abbildung erfolgte auf beiden Seiten des Flugweges in jenem Bereich, der außerhalb des Radarnormalfalls liegt. In diesem Bereich ist die Bildauflösung gering, die geometrische Verformung groß, die Stereobetrachtung schwierig, und schon geringe Geländehöhen führen zu Mehrfachbildern ('Lay-overs').



Figur 6.2: Beispiele von Satellitenradarschrägaufnahmen des Mondes mit Wellenlängen von 60 m, 20 m, 2 m. (a) und (b) zeigen dasselbe Gebiet.

Überdies war die Kontrolle der Bildgeometrie für radargrammetrische Zwecke unzureichend. Im Sensor, in dem die Dopplersignallinien auf den Signalfilm aufgezeichnet wurden, und im Bildkorrelator, wo sie in einen Kartenfilm umgewandelt wurden, wurden keine geometrischen Kalibrierungen vorgenommen.

Die geometrischen Zeit- und Distanzmarken im Kartenfilm waren nicht deutlich definiert (Fig.6.1b) Die Auswertung der ALSE Radarbilder zeigt daher nicht die volle Leistungsfähigkeit der Satellitenradarkartierung auf. Sie demonstriert nur die Verwendbarkeit der ALSE-Daten für die Kartierung bisher nur wenig bekannter Gebiete des Mondes unter Benutzung satellitenradargrammetrischer Konzepte, die damit erstmals praktisch erprobt werden konnten.

6.3. BILDMATERIAL UND MESSUNGEN

Die radargrammetrische Untersuchung beschränkt sich auf die Auswertung der VHF (2 m) Radarbilder, welche während zweier aufeinanderfolgender Satellitenumläufe erzeugt wurden. Ausgewählt wurde ein Testgebiet um die Krater Maraldi und Mons Maraldi (19°N, 35°O) mit einer Ausdehnung von etwa 100 km x 40 km. Dieses ist gut geeignet, weil es in der Nähe des Apollo 17-Landeplatzes liegt und deshalb photogrammetrisch gut kartiert ist. Die Basis für Stereobetrachtung ist genügend groß und die Geländehöhenunterschiede erreichen 1000 m.

Figur 6.3 zeigt das Radarstereobildpaar um Mons und Krater Maraldi. Als Basis für eine Beurteilung der radargrammetrischen Auswertung wurde ein photogrammetrisches Stereobildpaar der Apollo 17 Mission verwendet. Figur 6.4 zeigt eines dieser Bilder.

Tabelle 1 enthält Daten über die Bilder und Messungen, Fig.6.5 zeigt die Konfiguration für das Radarstereobildpaar. Das ALSE Radarsystem konnte Radarechos empfangen, die vom Mond unter Erhebungswinkeln bis 22° zu beiden Seiten der Bahn reflektiert wurden (maximaler Erhebungswinkel + 22°, minimaler -22°). In der Regel wurden jedoch Messungen nur in Richtung rechts der Bahn ausgeführt, und links der Bahn nur mit Erhebungswinkeln bis etwa -5° abgebildet. Die Echos von der linken und rechten Seite der Bahn überlappen im Radarbild (s.Nadirnähe in Fig.6.3 a,-b).

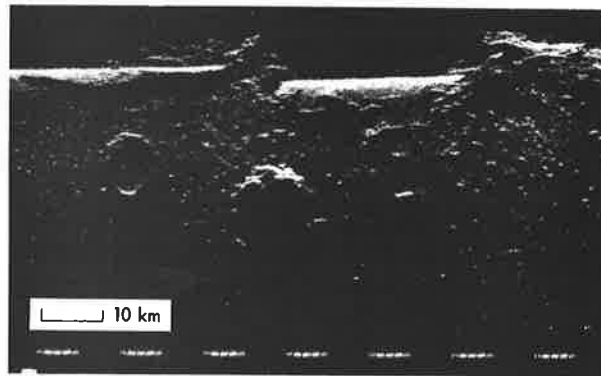
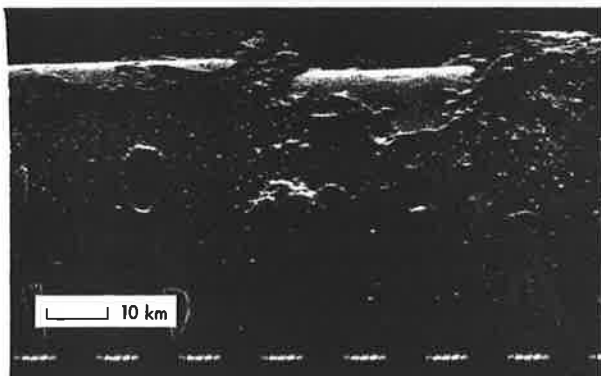
Der Bildmaßstab in Flugrichtung ist näherungsweise konstant (1:1 Million). Quer zur Flugrichtung gilt ein konstanter Maßstab für die Schrägdistanzen. Der Maßstab der Horizontal- oder Grunddistanzen ändert sich mit dem Erhebungswinkel. Für den Grunddistanz-Maßstab λ_g gilt:

$$\lambda_g = \lambda_s \sin \Omega \quad (6.1)$$

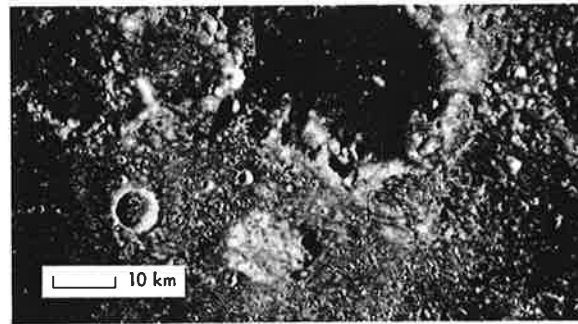
(λ_s = Maßstab der Schrägdistanzen, Ω = Erhebungswinkel). Für Erhebungswinkel $\Omega = 15^\circ$ ist in den ALSE-Aufnahmen λ_g gleich 1 000 000, also gleich dem Maßstab in Flugrichtung.

Orbit 25

Orbit 26



Figur 6.3: Stereobildpaar der Apollo 17 ALSE-VHF Radaraufnahmen des Kraters und Mons Maraldi, das für eine radargrammetrische Untersuchung ausgewählt wurde.



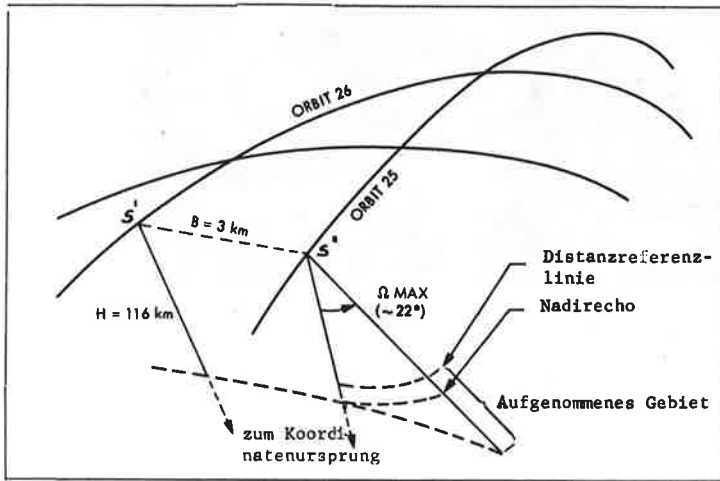
Figur 6.4: Ausschnitt der Apollo 17 Reihenmeßkammeraufnahme Nr. 1459, mit Krater und Mons Maraldi.

Tabelle 6.1: Radargrammetrische und photogrammetrische Parameter für Apollo 17 ALSE Aufnahmen über Krater und Mons Maraldi

Photogrammetrie		Radargrammetrie	
Kammerkonstante	75.842 mm	Bahnhöhe	116 km
Bildmaßstab	1:1 500 000	Stereobasis	3 km
Photographien	Nr. 1495,1497	Maximaler Erhebungswinkel	22°
Überlappung	60 %	Minimaler Erhebungswinkel	
Theor.Höhengenaugigkeit	30 m	Theoretisch	-22°
Mittl.Unterschiede zwischen Stereomodellen aus Komparator und Stereomessungen	30 m	Praktisch	- 5°
Mittl. Unterschiede zwischen Karte und Stereomodell		Abtastverzögerung	746.25 m
Planimetrie	300 m	Maßstab in Bahnrichtung	1:1 000 000
Höhe	100 m	Maßstab in Distanzrichtung (λ_s)	1:210 000
Durchmesser markierter Punkte	70 μ m	Wellenlänge	2 m
		Auflösung in Schrägdistanz	10 m
		Auflösung in Grunddistanz	30-150 m

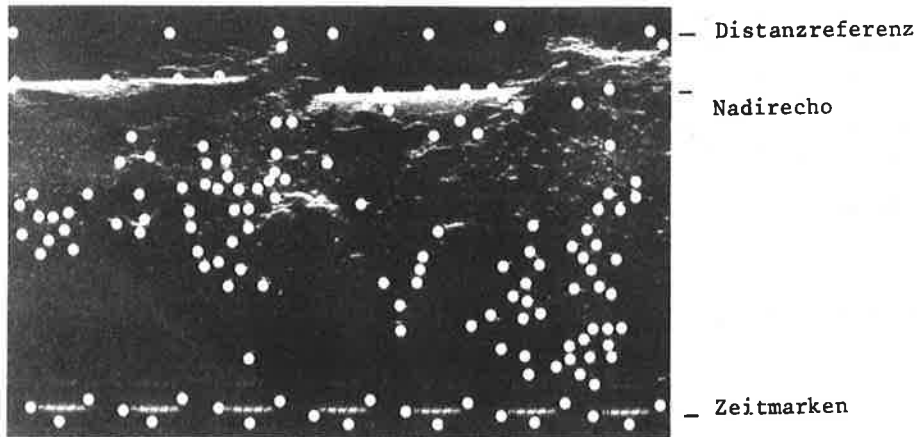
Im Radarstereomodell wurden etwa 70 Punkte identifiziert, die auch im photographischen Stereomodell erkennbar waren. Diese Punkte wurden am Center for Astrogeology des U.S.Geological Survey in Flagstaff, Arizona, mittels eines Punktübertragungsgerätes (PUG von Wild) unter 10-facher Vergrößerung künstlich markiert (Punkt Durchmesser 70 μ m). Die Bildkoordinaten der Punkte wurden dann in einem Mann-Monokomparator bei 10-facher Vergrößerung mit einer Genauigkeit von $\pm 4 \mu$ m (entspricht ± 4 m) gemessen. Für diese Punkte wurden auch in einem OMI Analytischen Plotter APC photogrammetrische Bildkoordinaten unter 14-facher Vergrößerung stereoskopisch ermittelt. Zusätzlich zu den markierten Punkten wurde sowohl im Radar- wie auch Photostereobildpaar ein digitales Höhenmodell (DHM) des Mons Maraldi gemessen. (Im Radarmodell bei 6-facher Vergrößerung, da eine weitere Ver-

größerung wegen der Körnigkeit des Bildes die Stereobetrachtung erschwert).



Figur 6.5: Abbildungskonfiguration für ALSE-VHF Radar, Umdrehungen Nr. 25, 26

Figur 6.6 zeigt die Verteilung der markierten Punkte im Radarbild. Die Zeitmarken und die Distanzreferenzlinie sind erforderlich, um die Komparatormessungen in Zeitmomente t und Schrägdistanzen r umzubilden. Sechs selenodätische Paßpunkte wurden mit einer Genauigkeit von ± 0.1 mm (± 25 m) der topographischen Karte 1:250 000 des Gebietes entnommen und für die absolute Orientierung des Radar- und photogrammetrischen Modells verwendet.



Figur 6.6: Verteilung der für die radargrammetrische Untersuchung gemessenen Punkte.

6.4. VORVERARBEITUNG DER MESSUNGEN

6.4.1 Photographie

Der erste Schritt war die photogrammetrische Berechnung der Koordinaten der Vergleichspunkte in einem lokalen Tangentialsystem. Die Genauigkeit der topographischen (Orthophoto-)Karte 1:250 000 wird von der U.S.Defense Mapping Agency in der Lage mit etwa ± 300 m und in der Höhe mit etwa ± 40 m angegeben, und ist somit für einen Genauigkeitsvergleich mit der Radarkartierung zu

ungenau. Überdies ist die Erkennbarkeit von Details in der Orthophotokarte wesentlich schlechter als im photogrammetrischen Stereomodell. Daher wurde eine genauere photogrammetrische Auswertung des Testgebiets ausgeführt.

Die photogrammetrische Bestimmung von Koordinaten der Details kann mittels Komparatormessungen oder Messungen im APC-Analytischen Plotter erfolgen. Nach der absoluten Orientierung ergeben sich zwischen den beiden Verfahren mittlere quadratische Differenzen von ± 30 m in allen Koordinatenrichtungen. Überraschenderweise ergeben sich aber gleiche mittlere Unterschiede zwischen den aus der Karte entnommenen und den photogrammetrisch erstellten Koordinaten im Betrage von ± 300 m in der Planimetrie und ± 100 m in der Höhe. Die Höhengenaugigkeit der Karte liegt daher unterhalb der Erwartung (von ± 40 m). Eine Ursache hiefür dürfte in der Auswirkung von Lagefehlern auf die Höhe liegen. Die Lagefehler sind wegen der schlechten Punktdefinitionen in der Mondkarte groß.

6.4.2 Radar

Die Komparatorkoordinaten x'_b, y'_b der Radarbilder müssen erst in Bildkoordinaten x_b, y_b und darauf in Schrägdistanz r und Zeit t der Abbildung umgewandelt werden. Hierzu wird die Bildkoordinatenachse x_b entlang der Distanzreferenzlinie und die y_b -Koordinate normal dazu angenommen. In die Meßpunkte auf der Distanzreferenzlinie wird eine Gerade interpoliert:

$$a_1 x'_b + a_2 y'_b + a_3 = 0 \quad (6.2)$$

mit deren Hilfe die Bildkoordinaten x_b, y_b berechnet werden:

$$y_b = (a_1 x'_b + a_2 y'_b + a_3) / (a_1^2 + a_2^2) \quad (6.3a)$$

$$x_b = (x'_b{}^2 + y'_b{}^2 + a_3^2 / a_2^2 + 2a_3 y'_b / a_2 - y_b^2)^{1/2} \quad (6.3b)$$

Aus den Bildkoordinaten werden mit den Gl. (3.1) und (3.2) die Zeit t und die Schrägdistanz r ermittelt.

Die Berechnung der Geraden (6.2) aus mehr als 2 Punkten der Distanzreferenzlinie führt zu einem Ausgleichsproblem. Im vorliegenden Fall folgen mittlere Abweichungen der Messungen von der Geraden im Betrage von ± 5 μ m.

Die Bildkorrelation (Umwandlung der Signal- in Kartenfilme) mußte mehrere Male wiederholt werden, da es nicht möglich war, zur gleichen Zeit gute Bildqualität und eine gute Abbildung der Distanzreferenzlinie zu erreichen. Daher wurde die Distanzreferenz in einem Bild inferiorer Qualität gemessen und mittels Paßpunkten in das Bild guter Qualität übertragen. Dieses Verfahren ermöglicht eine Bewertung der geometrischen Genauigkeit verschiedener optischer Korrelationen, die vom selben Signalfilm produziert wurden. Es stellte sich heraus, daß der Maßstab in Flug- (oder x-)Richtung in beiden Korrelationen um mehr als 1 % variieren konnte. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch für Maßstabsunterschiede in Überlappungszonen von Bildern aus verschiedenen Orbits erhalten. Dieses Ergebnis ist wesentlich schlechter als das von kommerziellen Radarbildern und Korrelationen (Leberl, 1974; Peterson, 1976).

Mit Hilfe der Zeitmarken können festgestellte Inkonsistenzen des x_b -Maßstabes eliminiert werden. Obwohl die ALSE-Zeitmarken denkbar ungünstig im Kartenfilm präsentiert werden (Fig.6.1b),

variiert ihr relativer Abstand um nur weniger als 0.5 %.

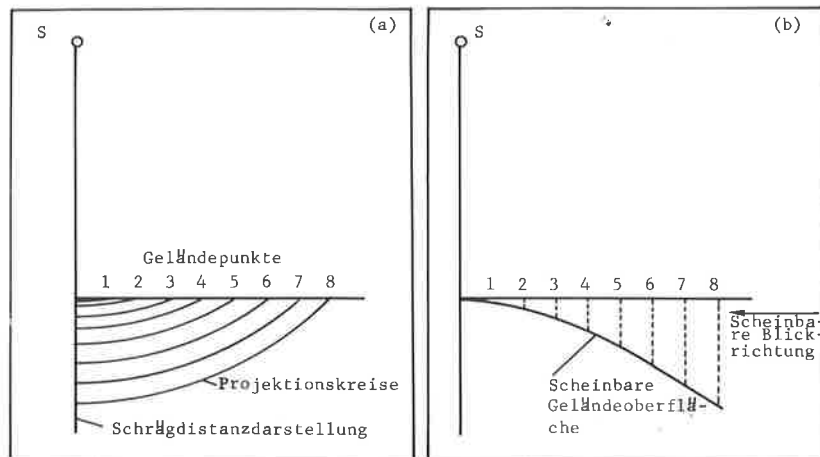
6.5. AUSWERTUNG DER EINZELAUFNAHMEN

6.5.1 Der optische Eindruck

Die einzelne ALSE-Radarschrägaufnahme wird als Abbildung empfunden, in der die Mondo-berfläche auf einen hyperbolischen Zylinder aufgewickelt ist. Die Ursache ist die Darstellung mit Schrägdistanzen. Nach Figur 6.7a wird das Radarbild in der Nähe des Nadirs zusehends komprimiert. Zwischen der Schrägdistanz r , Grunddistanz p_y und Höhe H besteht die Beziehung (s. Abb. 4.2):

$$r^2 = p_y^2 + H^2 \quad \text{oder} \quad r^2 - p_y^2 = H^2 \quad (6.4)$$

Diese kann für $H = \text{konst.}$ als Gleichung einer Hyperbel mit dem Mittelpunkt im Ort der Antenne angesehen werden. Trägt man die Schrägdistanz r (oder Bildkoordinate y_b) gegen die Grunddistanz p_y auf, so erhält man (für jeden Zeitpunkt t) eine Hyperbel (s. Fig. 6.7b). Werden diese Hyperbeln von einem unendlich fernen Beobachter betrachtet, so erhält dieser den optischen Eindruck eines auf einen hyperbolischen Zylinder gewickelten Geländes.



Figur 6.7: Verformung der Radarschrägaufnahme in Schrägdistanzdarstellung; (a) Bildkomprimierung in Nadirnähe; (b) Erklärung des optischen Eindruckes hervorgerufen durch ALSE Radarbilder.

6.5.2 Einzelbildauswertung - Erwartete Genauigkeit

Bevor die radargrammetrischen Ergebnisse der Einzelbildauswertung besprochen werden, muß die erwartete Genauigkeit abgeschätzt werden. Dabei kann hier auf eine Reihe früherer Arbeiten verwiesen werden (Leberl, 1970b; 1971a; 1975b), die Radar mit realer Apertur betrafen. Für Radar mit synthetischer Apertur wurden bisher noch keine Formeln für den Zusammenhang zwischen den Kartierungsfehlern und den Fehlern des Positions- und Geschwindigkeitsvektors abgeleitet.

Für die Ableitung dieser Formeln werden die einfachen Annahmen der Figur 4.2 verwendet, also geradlinige Satellitenbahn parallel zu \underline{x} , und Wahl eines tangentialen Koordinatensystems $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$. In diesem gilt für den Positionsvektor \underline{s} und Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}$:

$$\underline{s} = (s_x, s_y, s_z) = (s_x, 0, H); \quad \underline{\dot{s}} = (\dot{s}_x, \dot{s}_y, \dot{s}_z) = (\dot{s}_x, 0, 0)$$

Die Einzelbildauswertung hat die Bestimmung der Lagekoordinaten p_x, p_y zum Ziel:

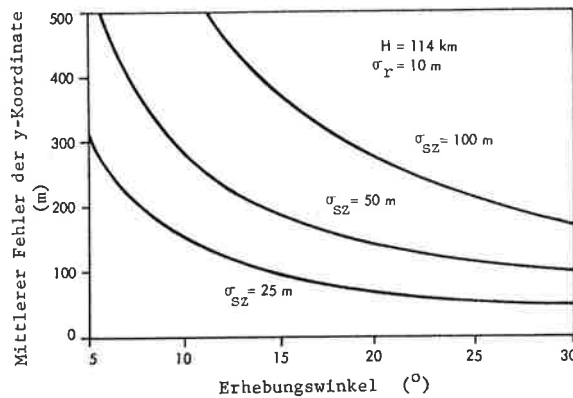
$$p_x = t \dot{s}_x = s_x \quad (6.5a)$$

$$p_y = (r^2 - H^2) \quad (6.5b)$$

Analog zur Ableitung für reale Apertur (Leberl, 1970b) erhält man für die Kartierungsfehler $\Delta p_x, \Delta p_y$ die folgenden Differentialformeln:

$$\Delta p_x = s_x - p_y \Delta \dot{s}_y + H \Delta \dot{s}_z \quad (6.6a)$$

$$\Delta p_y = s_y - \frac{H}{p_y} \Delta s_z + \frac{r}{p_y} \Delta r \quad (6.6b)$$



Figur 6.8: Erwartete Fehler der Radar-einzelbildauswertung -- Effekt des Reliefs

Der größte Einfluß wird von den Fehlern Δs_z (in der Höhe des Sensors über dem Objekt) und Δs_r (der Schrägdistanz r) ausgeübt. Der Fehler Δs_z beinhaltet die Variation der Geländehöhen. Geht man von den Differentialformeln (6.6) auf mittlere Fehler über, so werden zum Beispiel $\Delta p_y, \Delta r$ und Δs_z durch σ_{py}, σ_r und σ_{sz} ersetzt. Fig.6.8 zeigt den Zusammenhang der mittleren Fehler $\sigma_{py}, \sigma_r, \sigma_{sz}$ für die ALSE-Konfiguration. Aus der Figur ergibt sich, daß für die ALSE Abbildungskonfiguration mit Kartierungsfehlern in der Größenordnung von einigen Hundert Metern gerechnet werden muß.

6.5.3 Einzelbildauswertung - Rechenmethoden

Sind der Aufnahmezeitpunkt t und die Schrägdistanz r von Bildpunkten bekannt, so ergeben sich mehrere Möglichkeiten der Transformation in Objektkoordinaten. Die einfachste Methode ist die einer geradlinigen Satellitenbahn, welche nur für sehr kurze Stücke von Radaraufnahmen zulässig ist. Für diese Annahme gelten die Gl. (6.5a,b) für die Ermittlung lokaler rechtwinkliger p_x, p_y -Koordinaten. Diese müssen mit Hilfe von Paßpunkten in das Mondsystem (oder eine Abbildung desselben) transformiert werden. Bei Vorliegen von Überbestimmungen ergeben sich Unterschiede $\Delta p_x, \Delta p_y$ zwischen den radargrammetrischen und selenodätischen Paßpunktskoordinaten, welche zur Ermittlung

von Korrekturen für p_x, p_y durch Interpolation verwendet werden können.

Eine zweite Rechenmethode geht von den vorgegebenen Daten über die Satellitenbahn aus. Für jeden Punkt p wird mit Hilfe der Zeit t ein Positionsvektor \underline{s} und ein Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}$ interpoliert. Der Ortsvektor \underline{p} des Objektpunktes p ergibt sich aus den Gl. (3.28) bis (3.35) der Sektion 3.5. Sind Paßpunkte vorgegeben, so erhält man wiederum Unterschiede $\Delta p_x, \Delta p_y$, die zur Bestimmung von Korrekturen verwendet werden können.

Eine dritte Rechenmethode beruht auf einer Kalibrierung der Zeit- und Schrägdistanzmessung. Für jeden Paßpunkt A wird auf Grund von Gl. (3.56) und der vorgegebenen Satellitenbahn der zugehörige Aufnahmezeitpunkt \bar{t}_A und die Schrägdistanz \bar{r}_A berechnet. Diese werden mit den aus den Radaraufnahmen folgenden Werten t_A, r_A verglichen:

$$\Delta r = \bar{r}_A - r_A \quad (6.7a)$$

$$\Delta t = \bar{t}_A - t_A \quad (6.7b)$$

Die Unterschiede $\Delta r, \Delta t$ können nun zur Berechnung von Korrekturen für Schrägdistanzen r und Aufnahmezeitpunkte t aller Bildpunkte verwendet werden. Dies kann mit Hilfe der folgenden Polynome erfolgen:

$$r = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 r + a_s t r + a_6 t^2 r + \dots \quad (6.8a)$$

$$t = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \quad (6.8b)$$

Diese sind linear in der Distanzrichtung, denn es besteht kein Anlaß, nicht-lineare Variationen in dieser Richtung zu erwarten (Gracie u.a., 1970). In Flugrichtung jedoch verändern sich die Bildfehler wegen der verändernden Fehler der Positions- und Geschwindigkeitsvektoren. Daher müssen in den Korrekturpolynomen (wie in Gl. (6.8)) Glieder höherer Ordnung enthalten sein.

6.5.4 Einzelbildauswertung - Ergebnisse

Tabelle 6.2 enthält die mittleren Unterschiede zwischen rechtwinkligen radargrammetrischen und photogrammetrischen Objektkoordinaten, bei Verwendung verschiedener Rechenmethoden und verschiedener Paßpunktdichten. \underline{z} liegt in der lokalen Vertikalen im Punkt ($19^\circ N, 35.5^\circ O$), \underline{x} in der Ebene der Satellitenbahn.

Anzahl der Paßpunkte	Geradlinige Bahn Gl. (6.5)		Interpolative Koordinatenverbesserung		Parametrische Koordinatenverbesserung	
	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)
0			9700	2010	9700	2010
1					451	415
2	320	670	330	579	276	409
8	152	360	132	358	160	362

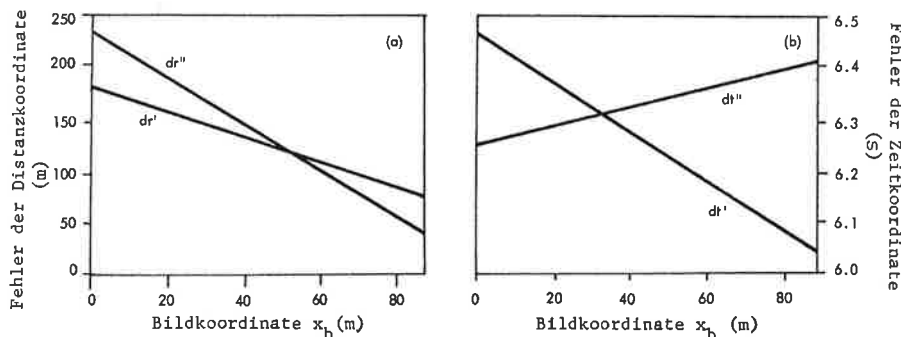
Tabelle 6.2: Ergebnisse der Einzelbildauswertung, angegeben in Metern, 49 Vergleichspunkte

σ_x (m)	σ_y (m)	Mittl. Gelände- relief (m)	Anzahl Ver- gleichspkte
660	2240	235	65
451	415	120	49
147	233	56	18

Tabelle 6.3: Auswirkung der Geländehöhen auf die Auswertegenauigkeit

Ohne Verwendung von Paßpunkten folgen Kartierfehler bis ± 10 km. Der Grund hierfür ist die unbekannt absolute Beziehung der Zeitmarken im Radarbild mit der Zeit der Aufnahme. Ein einzelner Paßpunkt genügt, um diese großen konstanten Fehler zu eliminieren. Die absolute Genauigkeit kann auch ohne Paßpunkte durch eine Kalibrierung der Zeitmarken verbessert werden.

Die Auswertegenauigkeit nimmt mit der Anzahl der Paßpunkte vor allem in Bahnrichtung (x) zu. Quer zur Bahnrichtung (y) sind die Verbesserungen geringer, da sie im wesentlichen durch das Geländere relief verursacht werden und einige wenige Paßpunkte dieses Relief nicht beschreiben können. Die Auswirkung der Geländehöhen ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Die Ergebnisse entsprechen der theoretischen Erwartung (vergleiche Fig.6.8) und den durch Tiernan u.a. (1976) bei der Berechnung von Punktkoordinaten mittels ALSE-VHF Bildern im Mare Serenitatis erhaltenen Ergebnissen. Dabei stiegen im Mare Serenitatis die Höhen nur bis etwa ± 27 m an. Tiernan u.a. (1976) erreichten eine Kartiergenauigkeit von ± 250 m quer zur Bahnrichtung.



Figur 6.9: Lineare Kalibrierungsfunktionen für (a) Schrägdistanzen r und (b) für Zeitmessung

Ein weiteres Ergebnis der auf einer Distanz- und Zeitkalibrierung beruhenden Rechenmethode sind Kurven, die die Fehler der Distanz- und Zeitmessung beschreiben (Fig.6.9). Aus diesen folgt, daß die Zeitmarken Fehler von mehr als 6 Sekunden besitzen. Dies ist die Ursache für die großen Kartierfehler beim Verfahren ohne Paßpunkte.

Ein Vergleich der Rechenmethode ergibt, daß im Falle einer großen Paßpunktdichte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Methoden bestehen. Sind jedoch wenige Paßpunkte gegeben, so scheint es sinnvoller, die Zeit t und Schrägdistanz r zu kalibrieren statt die radargrammetrischen Modellkoordinaten interpolativ zu verbessern.

6.6. STEREOAUSWERTUNG

6.6.1 Der optische Eindruck

Phillips u.a. (1973) beschrieben den visuellen Eindruck bei Betrachtung eines ALSE-Stereomodells in einer als Fig. 6.10 wiedergegebenen graphischen Darstellung. Es wird ein hyperbolischer Zylinder wahrgenommen, auf den das Geländere relief aufgewickelt ist. Phillips u.a. (1973) führten auch den Begriff der "Profilprojektion" ein, mit dem sie die Kartenprojektion benannten, die aus einer Orthogonalprojektion des wahrgenommenen Zylinders erhalten wird (z.B. in einer normalen photogrammetrischen Stereoauswertung der ALSE-Bilder).

Der optische Eindruck läßt sich rechnerisch wie folgt erklären. Die Schrägdistanzen r', r'' in zwei überlappenden Bildern bestimmen die Parallaxe Δp :

$$\Delta p = r' - r''$$

Der Ort aller Punkte gleicher Parallaxe Δp ist eine Hyperbel, auf der alle Punkte liegen, deren Abstände r', r'' von zwei festen Punkten (den Antennenorten s', s'' , siehe Fig. 6.11) eine konstante Differenz haben. Die Antennenorte s', s'' sind die Brennpunkte der Hyperbel. In der Hyperbelgleichung

$$\frac{p_y^2}{a^2} - \frac{p_z^2}{b^2} = 1 \quad (6.9a)$$

gilt mit den Bezeichnungen der Fig. 6.11:

$$a = \Delta p / 2 \quad b = \left(\frac{B^2}{4} - \frac{\Delta p^2}{4} \right)^{1/2}$$

Wird in Gl. (6.9a) Δp und p_y variabel und $p_z = H$, also konstant gesetzt, so ergibt sich

$$\Delta p^4 - 4\Delta p^2 p_y^2 + 4p_y^2 B^2 - \Delta p^2 (4H^2 + B^2) = 0 \quad (6.9b)$$

Gl. (6.9b) ist eine Hyperbel mit den Variablen $\Delta p^2 = u$, $p_y^2 = v$:

$$u^2 - 4uv - u(B^2 + 4H^2) + 4vB^2 = 0$$

Der visuelle Eindruck ist also nicht der eines hyperbolischen, sondern eines analog der "Superellipse" von Hein^x (1964) mit "superhyperbolisch" bezeichneten Zylinders.

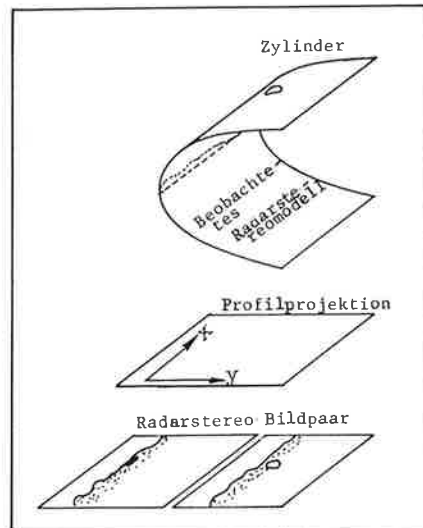
Nach Gl. (6.4) und Abb. 4.2 bestehen die Beziehungen:

$$r'^2 = (p_y^2 + H^2) \quad r''^2 = (p_y - B)^2 + H^2$$

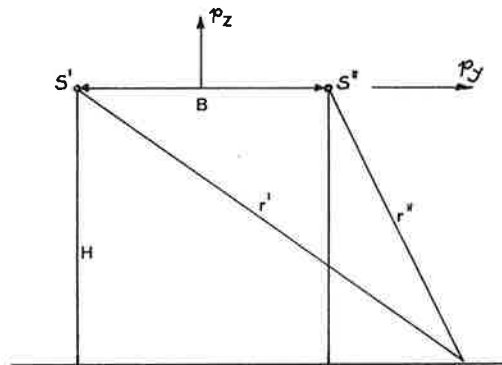
sodaß für die Parallaxe Δp folgt:

$$\Delta p = (p_y^2 + H^2)^{1/2} - ((p_y - B)^2 + H^2)^{1/2}$$

Hieraus ist ersichtlich, daß für $p_y = B/2$ die Parallaxe Δp verschwindet; $p_y \geq B/2$ ergibt ein stereoskopisches Modell ($\Delta p \geq 0$), und für $p_y < B/2$ ist das Modell pseudoskopisch ($\Delta p < 0$).



Figur 6.10: Stereomodell erscheint auf Zylinder aufgewickelt (nach Phillips^x u.a., 1973)



Figur 6.11: Definitionen zu Gl.6.9

6.6.2 Stereoauswertung - Erwartete Genauigkeit

In Kapitel 4 wurde durch Gl. (4.11) und durch die Figuren 4.8 bis 4.14 eine Beschreibung der zu erwartenden Stereokartiergenauigkeit mittels Radar mitgeteilt. Für den Fall der ALSE-Stereokonfiguration kann mit Hilfe von Fig. 4.9 eine ungefähre Schätzung der Genauigkeit erfolgen. Da die Konvergenz der Projektionsstrahlen etwas weniger als 2° beträgt, muß in Fig.4.9 extrapoliert werden. (Der dort betrachtete Bereich von Konvergenzwinkeln reichte nur von 9° bis 3°). Daher wurde mit demselben Computerprogramm, das auch die Daten für Fig. 4.9 errechnete, eine Genauigkeitsabschätzung für den speziellen Fall des ALSE-Stereomodells vorgenommen. Das Ergebnis ist in Fig. 6.12 dargestellt und zeigt die folgenden mittleren Koordinatenfehler im Stereomodell für Erhebungswinkel $\Omega = 10^\circ$: $\sigma_{py} = \pm 500$ m, $\sigma_{pz} = \pm 110$ m. σ_{px} ist vom Konvergenzwinkel nahezu unabhängig und kann nach Fig. 4.9a mit etwa ± 60 m erwartet werden.

6.6.3 Stereoauswertung - Rechenmethoden

Die stereoradargrammetrische Berechnung von selenodätischen Koordinaten für Punkte des vorgegebenen ALSE-Stereomodells erfolgte nach drei verschiedenen Methoden.

Die erste beruht auf der Annahme einer geradlinigen Satellitenbahn nach Fig.4.2 und den Gl. (4.9). Hiefür werden 2 Paßpunkte benötigt, mit welchen die Transformation der planimetrischen Koordinaten in ein Kartensystem erfolgen kann. Sind mehr Maßpunkte gegeben, so können Korrekturen für die radargrammetrischen Punkte aus den Klaffungen in den Paßpunkten interpoliert werden.

Die zweite Methode beruht auf Gl. (4.5a), in welche die Daten der Satellitenumlaufbahn als Beobachtungen eingeführt werden und die Quadratsumme der Beobachtungsfehler minimalisiert wird. Vor-gegebene Paßpunkte können zur Kalibrierung der Schrägdistanz- und Zeitmessung, und zur Interpolation von Korrekturen für die radargrammetrischen Stereomodellpunkte verwendet werden.

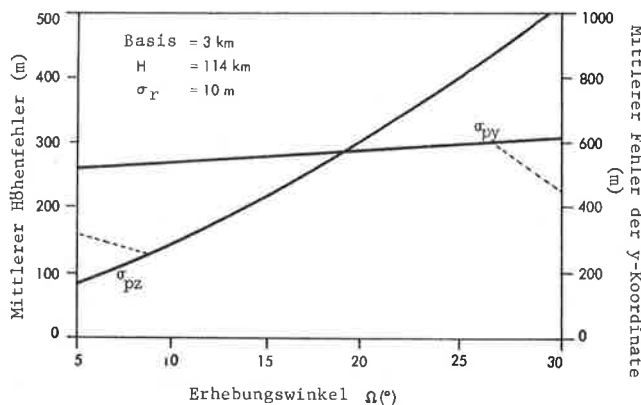
Die dritte Methode unterscheidet sich von der zweiten nur durch die Verwendung von Gl.(4.7a) an Stelle von G. (4.5a), sodaß die Quadratsumme der Abstände zwischen den Projektionskreisen minimalisiert wird. Hinsichtlich der Paßpunkte gelten dieselben Aussagen wie im zweiten Fall. Die für alle drei Verfahren erstellten Computerprogrammsysteme sind in Fortran V für die Univac 1108 des JPL erstellt. (Die Programme werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.)

6.6.4 Stereoauswertung - Ergebnisse

Tabelle 6.4 enthält die Resultate der Berechnung. Ebenso wie für die Einzelbildauswertung gilt auch für das Stereomodell, daß ohne Paßpunkte sehr große Fehler auftreten.

Das Stereomodell wird durch das in Gl. (4.7a) beschriebene Verfahren nur sehr ungenau bestimmt. Alle anderen Verfahren liefern bessere Resultate, unabhängig von der Anzahl der Paßpunkte. Liegen nur wenig Paßpunkte vor, so wird das Radarmodell mittels Gl. (4.5a) am genauesten bestimmt. Mit wachsender Anzahl von Paßpunkten liefert auch die vereinfachte Methode nach (Gl.4.9) gute Ergebnisse.

Die Höhe wird mit der theoretisch erwarteten Genauigkeit bestimmt, die höher ist als für die Lagekoordinaten.



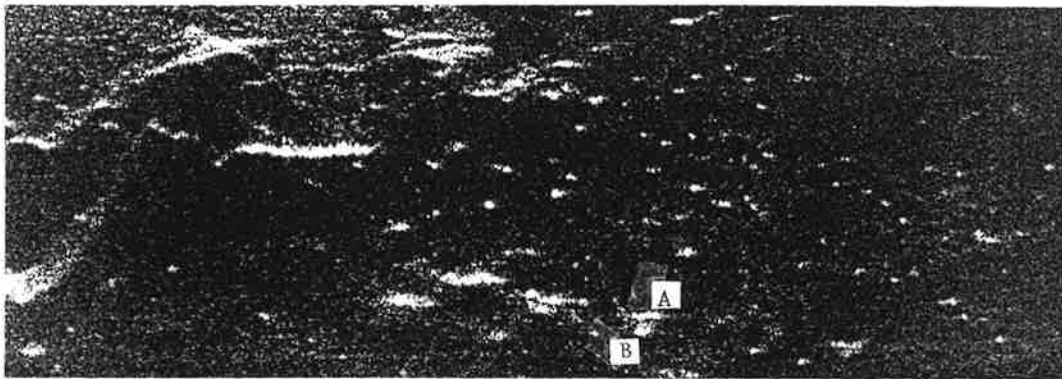
Figur 6.12: Theoretische Genauigkeitsabschätzung für ALSE Stereoradar

Bei Benutzung von 8 Paßpunkten verbleiben zufällige Fehler, ohne Paßpunkte sind signifikante Fehlertrends erkennbar.

Die geringste Genauigkeit besitzt erwartungsgemäß die quer zur Satellitenbahn liegende y-Koordinate. Auch für diese besteht gute Übereinstimmung mit der Genauigkeitsvorhersage.

Anzahl der Paßpunkte	Vereinfachte Formu- lierung Gl. (4.8)			Kleinste Quadrate (Gl.(4.5))			Kleinste Quadrate Gl.(4.7)		
	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
0				9500	2570	344	9350	4610	800
1				316	1260	332	489	2457	639
2	581	660	550	234	733	205	255	2144	744
8	130	506	121	173	510	109	227	2095	630

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Stereoauswertung



Nah

Fern

Figur 6.13: Radarbild einiger kleiner Mondkrater -- in einem Fall wird der Kraterboden mit B und der Rand mit A angegeben.

Die Genauigkeit der x-Koordinaten (in Richtung der Umlaufbahn) ist etwas geringer als in der Prognose. Dies dürfte durch die Form der verwendeten Objektpunkte bedingt sein, die naturgemäß kleine Mondkrater sein müssen. Figur 6.13 zeigt, daß diese im Radarbild in der y_b -Richtung gut, in der Flugrichtung aber schlecht definiert sind. Daher sind bei der Identifizierung von homologen Punkten im Radar- und photographischen Modell größere Fehler zu erwarten.

Die Frage der Gewichtssetzung für die verschiedenen Beobachtungsgrößen wurde experimentell studiert. Die besten Ergebnisse wurden erhalten, wenn Sensorkoordinaten und Schrägdistanzen etwa dasselbe Gewicht besitzen.

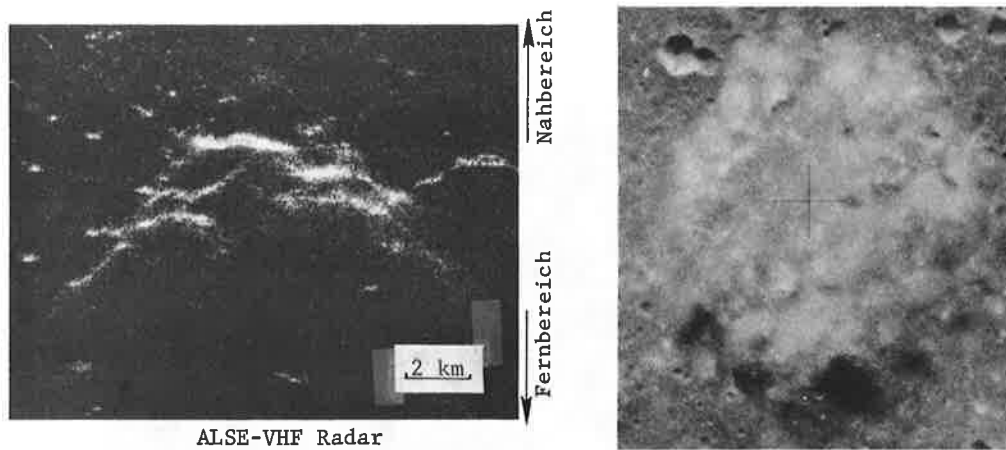
Krater	A	B	C	D	E	Mittl. quadr. Differenz
Photogrammetrie	173	327	58	297	216	
Radargrammetrie	140	210	110	330	100	
Unterschied	33	117	-52	-33	116	80

Tabelle 6.5: Ergebnis der Messung von Kratertiefen (Werte in Metern)

Für eine Reihe von Mondkratern wurde die Tiefe stereoradargrammetrisch und photogrammetrisch bestimmt. Tabelle 6.5 enthält die Differenzen für fünf Krater. Die mittlere quadratische Differenz liegt bei ± 80 m.

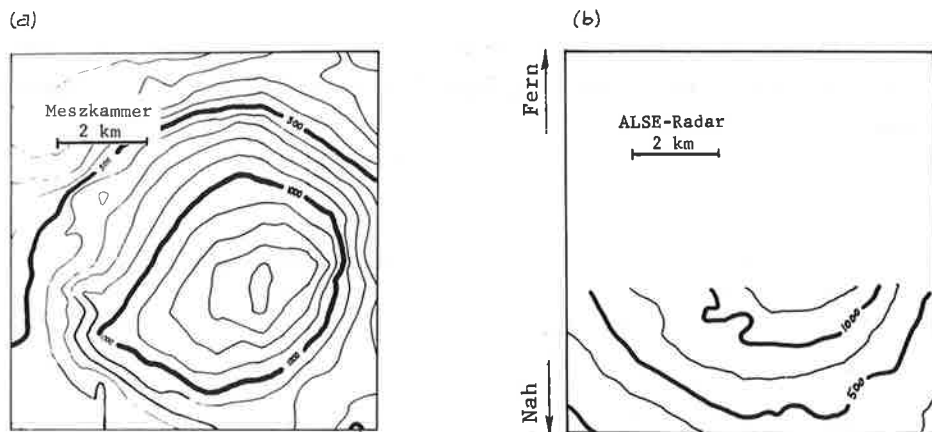
6.6.5 Radargrammetrische Schichtenlinien

Die am besten bestimmte Koordinate ist wegen der steilen Visurlinie des ALSE-Radars die Höhe. Die gute Höhengengenauigkeit ermöglicht es, eine Schichtenlinienkarte von kleinen Mondobjekten anzufertigen. Um dies zu demonstrieren, wurde ein digitales Höhenmodell (DHM) des Mons Maraldi photogrammetrisch und radargrammetrisch für geomorphologisch signifikante Punkte hergestellt (s. Fig. 6.14).



Figur 6.14: Radarbild und Meßkameraaufnahme (Ausschnitte) des Mons Maraldi

Die Schichtenlinien wurden durch Interpolation aus dem DHM abgeleitet. Im radargrammetrischen Höhenmodell sind keine Daten von der Rückseite des Berges enthalten, weil das VHF-Radarsystem (2 m Wellenlänge) keine signifikanten Reflexionen von diesem Teil empfing und der Großteil der langwelligen Strahlung durch Spiegelung an der Rückkehr verhindert wurde. Bei Verwendung kürzerer Wellenlängen wären mehr diffuse Reflexionen entstanden und wäre die Herstellung einer vollständigen Schichtlinienkarte des ganzen Berges möglich gewesen.



Figur 6.15: Schichtlinienpläne des Mons Maraldi, hergestellt mittels (a) Stereophotogrammetrie und (b) mittels Stereoradargrammetrie

Figur 6.15 zeigt die Ergebnisse der beiden Auswertungen (das Konturintervall ist 250 m, da die Radarhöhen einen mittleren Fehler von ± 100 m besitzen). Der Vergleich der Darstellungen (a) und (b) zeigt vor allem große Lageverschiebungen der radargrammetrischen Schichtenlinien, die durch die großen Lagefehler der Radardaten zu erklären sind.

6.7. ZUSAMMENFASSUNG

Die einzigen bisher für zivile Aufgaben hergestellten Satellitenradaraufnahmen entstanden im Rahmen des Apollo Lunar Sounder Experiments (ALSE) während der Apollo 17 Mission zum Mond. In zwei Satellitenumläufen wurden überlappende VHF-Seitwärtsradarbilder (Wellenlänge 2 m) erzeugt, von denen ein Ausschnitt über Mons und Krater Maraldi zur Anwendung satellitenradargrammetrischer Konzepte verwendet wurde. Für die Einzelbild- und auch Stereoauswertung wurden photogrammetrische Vergleichsdaten ermittelt.

Mehrere Methoden der Radarkartierung wurden numerisch untersucht. Dabei zeigte sich, daß in der Einzelbildauswertung die Unterschiede zwischen diesen Methoden mit wachsender Anzahl von Paßpunkten verschwinden. Die Genauigkeit der Punktbestimmung ist wegen der geringen Erhebungswinkel sehr vom Geländere relief abhängig. Im untersuchten Gebiet lag die Kartiergenauigkeit bei Verwendung von einigen Paßpunkten zwischen ± 250 m (flaches Gelände mit mittlerem Relief ± 56 m) und ± 2 km (mittlere Höhenunterschiede ± 250 m). Ohne Paßpunkte steigen die Kartierfehler bis zu ± 10 km an, weil die Zuordnung von Radarbildpunkten und Satellitenbahndaten mittels der Zeitmarken im vorgegebenen Fall nur sehr ungenau möglich ist.

Die Stereoauswertung nach Gl. (4.7 a) ergab schlechte Ergebnisse. Weitere Methoden nach Gl. (4.5a), (4.8) zeigten keine signifikanten Unterschiede, wenn genügend Paßpunkte vorliegen. Die Stereokartierung von Höhen- und Lageunterschieden wurde mit einer Genauigkeit von ± 100 m in der Höhe und ± 500 m in der Lage ausgeführt. Die absolute Lage- und Höhenkartierung (ohne Paßpunkte) erfolgte mit einer Genauigkeit von ± 350 m in der Höhe und ± 10 km in der Lage. Diese großen absoluten Fehler werden wie in der Einzelbildauswertung durch die ungenaue Zuordnung von Bildpunkten und Bahndaten durch die Zeitmarken verursacht.

Die trotz der geringen Schnittwinkel der Projektionsstrahlen (2°) erreichte gute Höhen genauigkeit ist durch die geringen Erhebungswinkel verursacht. Erhebungswinkel von 15° bis 50° werden für künftige Satellitenradarsysteme im Gegensatz zu den Erhebungswinkeln ($0^\circ - 85^\circ$) des Flugzeugradars zu erwarten sein.

Die erreichte Genauigkeit relativer Höhen ist größer als jene, die mit den Vidikon aufnahmen der Mariner-9 und ähnlicher Raumfahrtmissionen erreicht wurden (Blasius^x, 1973). Damit wird der hohe Wert des Stereoradar für planetare Erkundungen bestätigt.

7. THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN ZUR RADARBLOCKAUSGLEICHUNG

7.1. EINLEITUNG

Die Ausgleichung von Radarbildverbänden wurde bisher nur für planimetrische Punktbestimmung als Basis für die Bildplanerstellung mittels Flugzeugradar ausgeführt (Leberl, 1975c, 1975d; Leberl, Jensen u.a. 1976); überdies wurde ein Computerprogramm für die simultane räumliche Ausgleichung ursprünglicher Radarbildstreifen entwickelt (DBA Systems, 1974). Die räumliche Ausgleichung wurde von Dowideit (1975) experimentell untersucht. Die Radarblockausgleichung ist daher ein bisher wenig bearbeitetes Verfahren. Die Ursache liegt im Mangel an geeignetem Bildmaterial, in der verhältnismäßig jungen Geschichte des Seitwärtsradar, und schließlich in der Tatsache, daß die radargrammetrische Punktebestimmung (mittels Flugzeugradar) bisher nur in der Bildplanerstellung Anwendung gefunden hat.

Für die geplanten Satellitenradarprojekte wird eine Ausgleichung von Radarbildverbänden notwendig sein. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt fehlen vorbereitende Studien hierfür. Es liegt daher nahe, theoretische Überlegungen anzustellen, um eine Vorstellung von den Grenzen, Möglichkeiten und der Komplexität der Aufgabenstellung zu gewinnen. Solche Überlegungen sind zum Beispiel für das SEASAT-Projekt im Hinblick auf die Kartierung polaren Meereseises, und für eine Venus Orbital Imaging Radar (VOIR) Mission im Hinblick auf die Erstellung eines Festpunktnetzes sehr aktuell.

Im Falle der Kartierung eines ganzen Planeten, oder großer Teile seiner Oberfläche, ist die Wahl eines Koordinatensystems von Bedeutung, in dem die Radar-Koordinaten (in Flugrichtung, quer dazu, und in Höhe) nicht korreliert sind. Diese Frage wird im folgenden studiert.

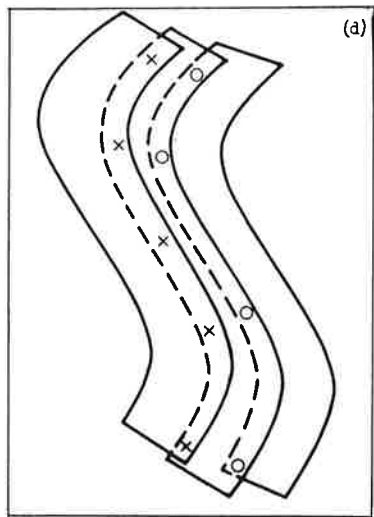
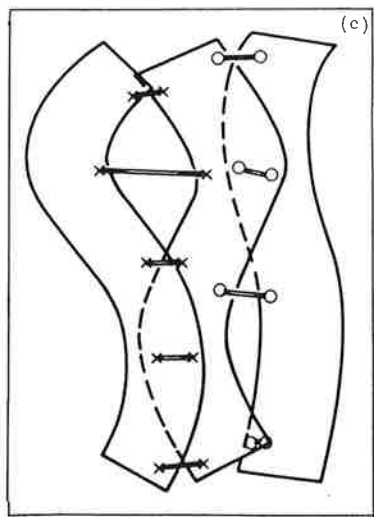
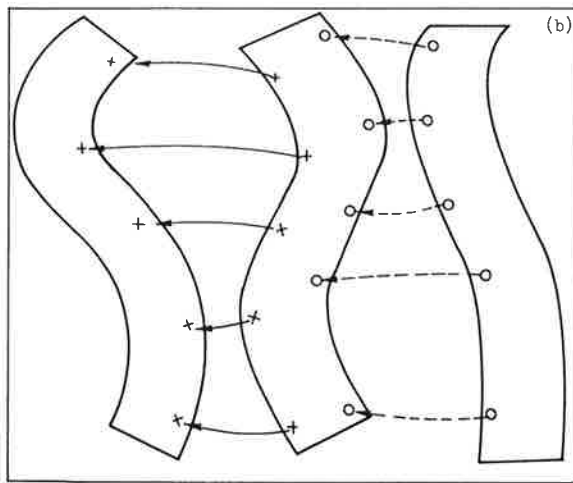
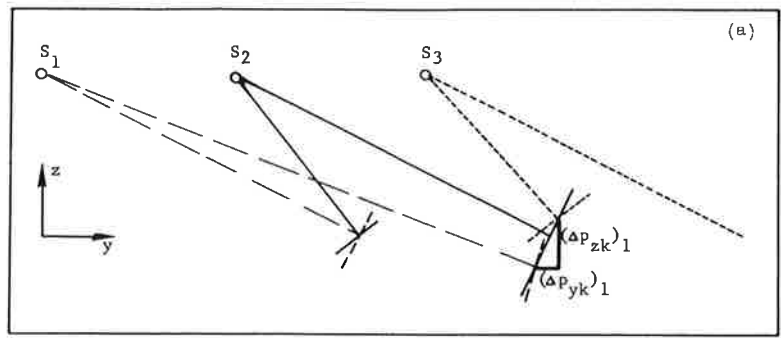
Ein weiteres Problem in der Radarblockausgleichung liegt in der Tatsache, daß die relative Orientierung ohne Einstelldaten nicht bestimmt ist. Auch mit Einstelldaten, die trendartige Fehler besitzen, können große Verformungen des Stereomodelles entstehen (siehe Kapitel 4), die sich im Radarblock fortpflanzen. Die aus der Photogrammetrie bekannte Genauigkeit der Blockausgleichung darf daher nicht ohne weiteres bei Radarblöcken erwartet werden.

Für die Berechnung von Radarblockausgleichungen können wie für photogrammetrische Blöcke verschiedene strenge und vereinfachende Lösungen angegeben werden. In der vorliegenden Arbeit werden in Analogie zur photogrammetrischen Blockausgleichung drei Methodengruppen behandelt: (a) die sequentielle Blockformung und interne sowie externe Ausgleichung; (b) die simultane Ausgleichung unabhängiger Stereomodelle; (c) die simultane Ausgleichung ursprünglicher Radarbildstreifen.

7.2. INTERNE UND EXTERNE BLOCKAUSGLEICHUNG

Die sequentielle Ausgleichung eines Radarblocks setzt sich aus zwei getrennten Schritten zusammen: zuerst wird ein Radarbildblock geformt, indem radargrammetrische Modelle sequentiell lückenlos aneinandertransformiert werden. Darauf werden mit Hilfe vorgegebener Paßpunkte der gebildete Gesamtblock in das Referenzsystem transformiert und die radargrammetrischen Koordinaten durch Interpolation verbessert (Schut^x, 1970; Leberl, 1975b,c).

Der Aufbau eines Radarblocks aus den einzelnen Bildstreifen erfolgt in Analogie zur photogrammetrischen Streifen- oder Blocktriangulierung. Dabei entsprechen die Radarbilder den photogrammetrischen Aufnahmen, und der Radarblock dem photogrammetrischen Streifen, oder das radargrammetrische Stereomodell dem photogrammetrischen Streifen, und die Radarblockausgleichung der photogrammetrischen Ausgleichung mit Streifen als kleinsten Einheiten.



Figur 7.1: Radarblockformung mittels (a) Folgebildanschluß oder (b) Stereomodellanschluß; (c) Ergebnis des Anschlusses mittels nicht flexibler Transformation; (d) Ergebnis mittels flexibler Transformation mit Biegefunktionen (Splines)

Für die Ausgleichung können verschiedene Methoden benützt werden: Die sequentielle Bildung des Radarblocks aus unabhängigen Stereomodellen; und die sequentielle Blockbildung, mit individuellen Radarbildstreifen.

7.2.1 Interne Ausgleichung mittels Verfahren des Stereomodellanschlusses

Aus dem ersten Stereobildpaar wird mittels Einstelldaten das erste Radarstereomodell gebildet (siehe Kapitel 4, Gl. 4.5a). Es werden dabei für alle k , gemeinsamen Bildpunkte der beiden Bildstreifen (1) und (2) räumliche Modellkoordinaten $p_{xk,1}$, $p_{yk,1}$, $p_{zk,1}$ ($k=1, \dots, k_1$) erhalten.

Entsprechend Figur 7.1a wird nun das zweite Stereomodell aus Bildstreifen 2 und 3 ermittelt. Im Falle einer Überlappung von mehr als 50 % ergibt sich für Punkte, die beiden Stereomodellen gemeinsam sind, ein zweites Paar Modellkoordinaten $p_{xk,2}$, $p_{yk,2}$, $p_{zk,2}$. Damit werden Klaffungen $(\Delta p_{xk})_1$, $(\Delta p_{yk})_1$, $(\Delta p_{zk})_1$ eingeführt:

$$(\Delta p_{xk})_1 = p_{xk,2} - p_{xk,1}$$

$$(\Delta p_{yk})_1 = p_{yk,2} - p_{yk,1}$$

$$(\Delta p_{zk})_1 = p_{zk,2} - p_{zk,1}$$

und mit diesen ein (verknüpftes) Polynom bestimmt:

$$\left. \begin{aligned} (\Delta p_{xk})_1 &= \{ a_{j1} + a_{j2}(p_x - x_j) + a_{j3}(p_x - x_j)^2 + a_{j4}(p_x - x_j)^3 \}_1 \\ (\Delta p_{yk})_1 &= \{ b_{j1} + b_{j2}(p_x - x_j) + b_{j3}(p_x - x_j)^2 + b_{j4}(p_x - x_j)^3 \}_1 \\ (\Delta p_{zk})_1 &= \{ c_{j1} + c_{j2}(p_x - x_j) + c_{j3}(p_x - x_j)^2 + c_{j4}(p_x - x_j)^3 \}_1 \end{aligned} \right| \quad (7.1)$$

$$x_j \leq p_x < x_{j+1}$$

$x_j, x_{j+1} \dots$ Nahtstellen des stückweisen Polynomes

Dies berücksichtigt nur die Längskoordinaten (x) der Punkte, was wegen der linearen Ausdehnung des Überlappungsgebietes benachbarter Stereomodelle zulässig ist. Durch die Gl.(7.1) werden unabhängige Korrekturen für die drei Koordinatenrichtungen angesetzt. Dies ist näherungsweise gerechtfertigt, weil nach Kapitel 3 und 4 Δp_x - und Δp_y -Fehler verschiedene, nicht miteinander im Zusammenhang stehende Ursachen haben. Die Unabhängigkeit von Δp_x und Δp_y wird auch durch praktische Erfahrungen bestätigt (v. Roessel und de Godoy, 1974; Leberl, 1975c). Ein großer Wert Δp_y kann allerdings einen kleinen Wert Δp_x verursachen. Aber dies wird in Analogie zur Blockausgleichung photogrammetrischer Streifen nicht berücksichtigt.

Um die Kontinuität der verknüpften Polynome zu erreichen, müssen für benachbarte Polynomstücke an den Nahtstellen $x = x_j$ die Funktionswerte (Klaffungen) und die erste Ableitung übereinstimmen. An der Nahtstelle x_{j+1} ist $p_x = x_{j+1}$. Im Polynomstück j ist der Wert der unabhängigen Variablen $(p_x - x_j) = (x_{j+1} - x_j) = \Delta$. Im Polynomstück $j+1$ ist $(p_x - x_{j+1}) = 0$. Die Kontinuitätsbedingungen lauten also:

$$\begin{aligned} a_{j1} + a_{j2}\Delta + a_{j3}\Delta^2 + a_{j4}\Delta^3 &= a_{(j+1),1} \\ a_{j2} + 2a_{j3}\Delta + 3a_{j4}\Delta^2 &= a_{(j+1),2} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Ähnliche Bedingungen können für die Koeffizienten der Δp_y - und Δp_z -Polynome formuliert werden. Nach Untersuchungen am ITC mit Interpolation in digitalen Höhenmodellen (nicht publiziert) ist es nicht wirtschaftlich, die Gl. (7.1) und (7.2) in einem Ausgleichungsverfahren zu lösen. Statt dessen erscheint eine Methode zweckmäßig, in der erst die Funktionswerte $\Delta p_x(x_j)$, $j=1,2,\dots$ und Tangenten $(d\Delta p_x(x)/dx)_{x=x_j}$ mittels gleitender Mittelwerte bestimmt, und erst dann die Polynomkoeffizienten aus den Randbedingungen jedes Polynomstückes berechnet werden (siehe Jancaitis und Junkins, 1973).

Ist Modell 2 an Modell 1 angeschlossen, so kann sequentiell in derselben Weise jedes weitere Modell mit dem bisherigen Radarblock verknüpft werden.

7.2.2 Interne Ausgleichung mittels des Verfahrens des Folgebildanschlusses

Die Blockbildung durch Folgebildanschluß ist theoretisch komplizierter als der Modellanschluß. Die numerische Berechnung ist jedoch einfach, da in den sequentiellen Lösungsschritten stets nur kleine Gruppen von Gleichungen, Unbekannten und Beobachtungen vorliegen.

Das Verfahren beruht auf der Darstellung der Sensorpositionen $\underline{s} = (s_x, s_y, s_z)$ als Zeitfunktion mittels verknüpfter Polynome. Es entspricht dem von Masry (1969), Derenyi (1970) und DBA Systems (1974) mitgeteilten System für kontinuierliche Aufnahmen:

$$\begin{aligned} s_x(t) &= a_{j1} + a_{j2}t + a_{j3}t^2 + a_{j4}t^3 \\ s_y(t) &= b_{j1} + b_{j2}t + b_{j3}t^2 + b_{j4}t^3 \\ s_z(t) &= c_{j1} + c_{j2}t + c_{j3}t^2 + c_{j4}t^3 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Die Koeffizienten $a_{j1} \dots c_{j4}$ sind nur für $t_j > t \geq t_{j-1}$ definiert. Die Verknüpfung benachbarter Polynome erfolgt so wie in Gl. (7.2) durch die Forderung nach Identität der Funktionswerte und ersten Ableitung. Z.B. gilt für $s_x(t)$:

$$\begin{aligned} a_{j1} + a_{j2}t_{j-1} + a_{j3}t_{j-1}^2 + a_{j4}t_{j-1}^3 &= \\ = a_{j-1,1} + a_{j-1,2}t_{j-1} + a_{j-1,3}t_{j-1}^2 + a_{j-1,4}t_{j-1}^3 & \end{aligned} \quad (7.4a)$$

$$a_{j2} + 2a_{j3}t_{j-1} + 3a_{j4}t_{j-1}^2 = a_{j-1,2} + 2a_{j-1,3}t_{j-1} + 3a_{j-1,4}t_{j-1}^2 \quad (7.4b)$$

Für den Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}} = (\dot{s}_x, \dot{s}_y, \dot{s}_z)$ gilt nach Gl. (7.3):

$$\begin{aligned} \dot{s}_x(t) &= a_{j2} + 2a_{j3}t + 3a_{j4}t^2 \\ \dot{s}_y(t) &= b_{j2} + 2b_{j3}t + 3b_{j4}t^2 \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\dot{s}_z(t) = c_{j2} + 2c_{j3}t + 3c_{j4}t^2$$

Soll auch der Geschwindigkeitsvektor eine kontinuierliche Zeitfunktion ohne Diskontinuitäten in der 1. Ableitung sein, so muß für die x-Werte zusätzlich zu (7.4a,b) die Bedingung bestehen:

$$a_{j3} + 3a_{j4}t_{j-1} = a_{j-1,3} + 3a_{j-1,4}t_{j-1} \quad (7.4c)$$

(Die für $s_x(t)$, $s_y(t)$, $s_z(t)$ erhaltenen verknüpften Polynome stellen eine Art von 'Spline-Funktion' dar (Waldhäusl^x, 1974; Leberl^x, 1970a)).

Der Folgebildanschluß der i-ten Aufnahme kann als überbestimmtes Ausgleichungsproblem formuliert werden. Hiefür sind die folgenden vier Gruppen von Beobachtungs- oder Bedingungsgleichungen gegeben:

(α) Für einen benützten Bildpunkt mit der Nummer k ($k = 1, \dots, k_i$) besteht eine Gruppe von Gleichungen (4.1) mit \underline{p}_k als Ortsvektor des Modellpunktes k:

$$\begin{aligned} |\underline{p}_k - \underline{s}_{ik}| &= r_{ik} \\ \dot{s}_{ik} \cdot (\underline{p}_k - \underline{s}_{ik}) &= \sin \tau (|\dot{s}_{ik}| |\underline{p}_k - \underline{s}_{ik}|) \end{aligned} \quad (7.6)$$

Werden darin die Sensorpositionen \underline{s}_{ik} und die Sensorgeschwindigkeiten \dot{s}_{ik} durch die verknüpften Polynome (7.3) und (7.5) ersetzt, so folgen Funktionen der beobachteten Aufnahmezeit t.

(β) Für die Koeffizienten der Polynome besteht je beobachtete Sensorposition eine Gleichung (7.3).

(γ) Zusätzlich gelten die Bedingungsgleichungen (7.4) für die Kontinuität der verknüpften Polynome in den Verknüpfungsstellen.

(σ) Schließlich muß der zu einem Bildpunkt k im Folgebild i gehörende Modellpunkt \underline{p}_k auf dem homologen Projektionskreis des vorhergehenden Bildstreifens (i-1) liegen:

$$\begin{aligned} |\underline{p}_k - \underline{s}_{i-1,k}| &= r_{i-1,k} \\ \dot{s}_{i-1,k} \cdot (\underline{p}_k - \underline{s}_{i-1,k}) &= \sin \tau (|\dot{s}_{i-1,k}| |\underline{p}_k - \underline{s}_{i-1,k}|) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Für den Anschluß des i-ten Bildes besteht somit eine Gruppe nichtlinearer Gleichungen, die für die Ausgleichung linearisiert werden müssen. Für Gl. (7.6) (in der \underline{s} und \dot{s} durch die Polynome der Gl. (7.3) und (7.5) ersetzt wurden) besteht für jeden der k_i Bildpunkte eine Linearform:

$$\underline{C}_i \cdot \underline{v}_i + \underline{D}_i \cdot \Delta \underline{u}_i + \underline{f}_i = 0 \quad (7.8a)$$

Die Linearisierung der Gl. (7.3) ergibt:

$$\underline{v}_i + \underline{D}_i \cdot \Delta \underline{u}_i + \underline{f}_i = 0 \quad (7.8b)$$

Die linearisierten Bedingungen (7.4) für die unbekanntenen Polynomkoeffizienten haben die Form:

$$\underline{D}_i \cdot \Delta \underline{u}_i + \underline{f}_i = 0 \quad (7.8c)$$

Die Schnittbedingungen (7.7) für homologe Projektionskreise enthalten als Unbekannte die Modellpunktskoordinaten \underline{p}_k ($k=1, \dots, k_i$). Sensorpositionen \underline{s}_{i-1} , Geschwindigkeiten \dot{s}_{i-1} und Schrägdistan-

zen r_{i-1} werden als fehlerfreie, gegebene Größen angesehen. Hiefür bestehen Linearformen vom Typ:

$$\underline{D}_i^v \cdot \Delta \underline{u}_i''' + \underline{f}_i^v = 0 \quad (7.8d)$$

Mit den in Tabelle 7.1 angeführten Symbolen folgt für die in den Gl. (7.8a bis d) auftretenden Elemente: \underline{v}_i^v ist der Vektor der $2k_i$ Verbesserungen für die k_i beobachteten Aufnahmezeitpunkte und Schrägdistanzen im Streifen i ; der Vektor $\Delta \underline{u}_i'$ der $(3k_i + 12j_i)$ Unbekannten setzt sich aus den $3k_i$ Komponenten der k_i Vektoren \underline{p}_k ($k=1, \dots, k_i$) der unbekannt Modellpunkte ($\underline{p}_k = \underline{p}_{k0} + \Delta \underline{p}_k$, $\underline{p}_{k0} \dots$ Näherungswert) und

Laufender Index für Radarbildstreifen	i
Anzahl von Radarbildstreifen	i_b
Laufender Index für Polynomstück	j
Anzahl von Polynomstücken im Streifen i	j_i
Laufender Index für Bildpunkt	k
Anzahl von Bildpunkten im Streifen i	k_i
Anzahl der Beobachtungen der Position \underline{s}	n_i
Anzahl Paßpunkte	l_g
Anzahl von Altimetriemessungen	m_i
Totalanzahl von Radarpunkten	l_p

Tabelle 7.1: Bedeutung der Indizes für Radarblockausgleichung

dem Vektor \underline{u}_i'' der $12j_i$ unbekannt Polynomkoeffizienten zusammen; der Vektor \underline{v}_i'' enthält die $3n_i$ Verbesserungen der beobachteten Sensorpositionen; schließlich enthält der Vektor $\Delta \underline{u}_i'''$ die $3k_i$ unbekannt Komponenten der k_i Vektoren \underline{p}_k der Modellpunkte. Es gilt also:

$$\Delta \underline{u}_i' = (\Delta \underline{u}_i''', \Delta \underline{u}_i'')$$

Die Vektoren \underline{f}_i' , \underline{f}_i'' , \underline{f}_i''' sind die Widersprüche der linearisierten Gleichungen. Die Elemente der Matrizen \underline{C}_i , \underline{D}_i' , \underline{D}_i'' , \underline{D}_i''' und \underline{D}_i'''' sind die Differentialquotienten der entsprechenden Beobachtungs- oder Bedingungsgleichungen in bezug auf die zugehörige Beobachtung oder Unbekannte.

Somit ergeben sich für den Folgebildausschluß $(4k_i + 3n_i + 6(j_i-1))$ Gleichungen mit $(12j_i + 3k_i)$ Unbekannten und $(2k_i + 3n_i)$ Beobachtungen. Die Gl. (7.8a,b,c und d) können in einer Gleichung zusammengefaßt werden:

$$\underline{E}_i \underline{v}_i + \underline{F}_i \Delta \underline{u}_i + \underline{f}_i = 0 \quad (7.9)$$

Die Lösung eines überbestimmten Systems (7.9) ergibt nach den Regeln der Ausgleichsrechnung die Lösung:

$$\Delta \underline{u}_i = -(\underline{F}_i^T (\underline{E}_i \underline{Q}_i \underline{E}_i^T)^{-1} \underline{F}_i)^{-1} \underline{F}_i^T (\underline{E}_i \underline{Q}_i \underline{E}_i^T)^{-1} \underline{f}_i \quad (7.10)$$

Darin bezeichnet \underline{Q} die Varianzen-Kovarianzen-Matrix der Beobachtungen.

Für ein Folgebild mit 5 Punkten, 30 vorgegebenen Sensorpositionen und Polynomen für $\underline{s}(t)$, die aus 5 Stücken bestehen, liegen 138 Gleichungen, 100 Beobachtungen und 75 Unbekannte vor.

Die für die Lösung des einfachen Problems des Folgebildanschlusses erforderliche große Anzahl von Gleichungen und Unbekannten gibt einen Hinweis auf den hohen Rechenaufwand für eine simultane Blockausgleichung. In den Gl. (7.9) werden die Sensorpositionen des vorigen Radarstreifens ($i-1$) festgehalten ('reiner' Folgebildanschluß), die für die Modellkoordinaten im gemeinsamen Gebiet benachbarter Stereomodelle erhaltenen Ergebnisse werden gemittelt.

7.2.3 Koordinatensysteme

Bisher wurden für die Methode des Folgebildanschlusses keine Annahmen über Unabhängigkeit von Beobachtungen getroffen. In der Varianz-Kovarianzmatrix \underline{Q}_i der Gl. (7.10) können Korrelationen zwischen beobachteten Werten der Satellitenposition berücksichtigt werden. Daher kann die Blockbildung in jedem geeignet erscheinenden Koordinatensystem, z.B. im planetozentrischen, ausgeführt werden.

Dies gilt jedoch nicht für den Modellanschluß. Hiefür können, wie im Unterabschnitt 7.2.1 ausgeführt, die Abhängigkeiten zwischen den drei Komponenten der Klaffungen überlappender Stereomodelle unter Umständen vernachlässigt werden, wenn die x-Koordinate in Richtung, y quer zur Satellitenbahn und z als Höhe eingeführt werden.

Im Falle der Kartierung ausgedehnter Teile einer Planetenoberfläche führt die Verwendung eines rechtwinkligen Koordinatensystems wegen der Meridiankonvergenzen dazu, daß die x-Koordinatenachse nicht zu allen Satellitenbahnen parallel sein kann. In diesem Falle kommt es also zu Korrelationen zwischen Δp_x , Δp_y und Δp_z . Wenn jedoch jeder Modellanschluß in einem lokalen Koordinatensystem berechnet wird, kann die Unabhängigkeit von Δp_x , Δp_y , Δp_z erreicht werden. Ein geeignetes lokales Koordinatensystem ergibt sich aus einer Zylinderprojektion, deren Referenzgroßkreis entlang dem anzuschließenden Stereomodelle verläuft.

7.2.4 Externe Radarblockausgleichung

Als externe Ausgleichung eines Radarbildverbandes wird die Umbildung der Blockkoordinaten mit Hilfe von geodätischen Paßpunkten bezeichnet. Es liegt also die Aufgabe vor, ungleichartige Koordinaten im Sinne von Pinkwart^x(1936), Schut^x(1970), Schatz^x(1970) ineinander zu transformieren. In der Folge werden hiefür die Verfahren der Interpolation mittels der Methode des gewogenen Mittels und der linearen Prädiktion für eine sphärische Referenzfläche angeführt.

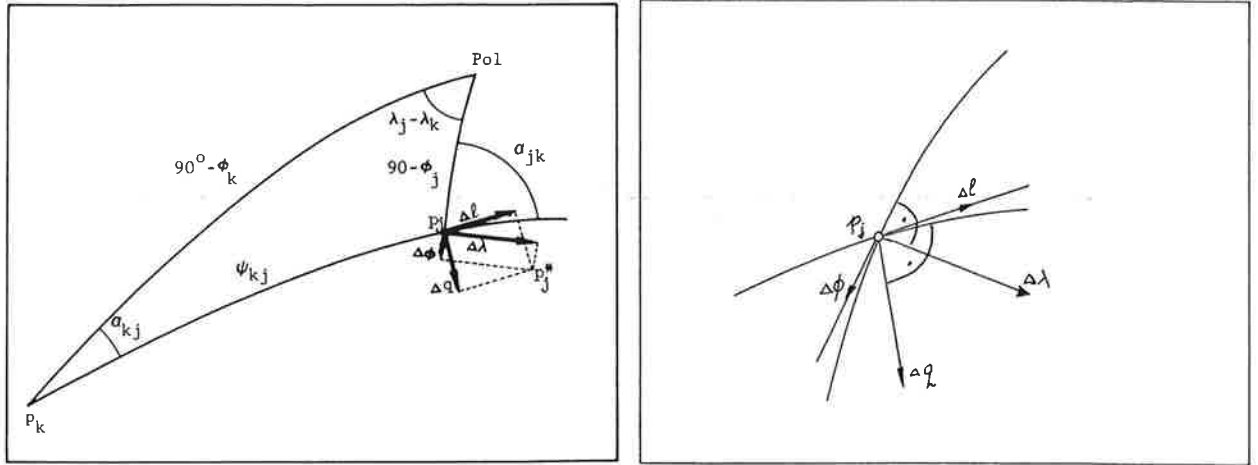
Ausgangsdaten beider Verfahren sind die Radarblockkoordinaten p_k ($k=1, \dots, m$) sowie die Paßpunktkoordinaten g_j ($j=1, \dots, n$). Die Blockbildung sei mit Hilfe von Einstelldaten erfolgt. Daher kann angenommen werden, daß sich einander entsprechende g_j und p_j -Koordinaten nur wenig unterscheiden. Ist dies nicht der Fall, so kann mit einer linearen dreidimensionalen Transformation dieser Zustand erreicht werden. Die Differenzen werden in der Folge mit

$$\Delta p_j = g_j - p_j = (\Delta p_{xj}, \Delta p_{yj}, \Delta p_{zj}) \quad j=1, \dots, n \quad (7.11)$$

bezeichnet.

(i) Gewogenes Mittel

Lage und Höhe werden unabhängig korrigiert. Die planetozentrischen Koordinaten \underline{p}_j , und die Differenzen $\Delta \underline{p}_j$, werden daher erst in planetographische Breite ϕ_j , Länge λ_j und Höhe h_j , sowie $\Delta \phi_j, \Delta \lambda_j$, und Δh_j transformiert.



Figur 7.2: Transformation der Fehler der geographischen Länge und Breite in eine longitudinale und transversale Komponente (nach Moritz^x, 1973).

Für die Berechnung der $\Delta \phi_k$, $\Delta \lambda_k$ der radargrammetrischen Punkte \underline{p}_k werden die in Paßpunkten gegebenen Werte $\Delta \phi_j$, $\Delta \lambda_j$ in transversale (Δq) und longitudinale ($\Delta \ell$) Komponenten (normal und in Richtung der Tangente an den Großkreis (p_k, p_j) in p_j) umgewandelt (Moritz^x, 1973). Nach Figur 7.2 gilt also für den Neupunkt \underline{p}_k und den Paßpunkt \underline{g}_j :

$$\Delta \ell_{jk} = \Delta \phi_j \cos \alpha_{jk} + \Delta \lambda_j \sin \alpha_{jk} \quad (7.12a)$$

$$\Delta q_{jk} = -\Delta \phi_j \sin \alpha_{jk} + \Delta \lambda_j \cos \alpha_{jk} \quad (7.12b)$$

Winkel α_{jk} kann aus $\phi_j, \phi_k, \lambda_j, \lambda_k$ berechnet werden:

$$\sin \alpha_{jk} = \cos \phi_k \sin (\lambda_j - \lambda_k) / \sin \psi_{jk} \quad (7.13)$$

$$\cos \psi_{jk} = \cos \phi_j \cos \phi_k (\lambda_j - \lambda_k) + \sin \phi_j \sin \phi_k \quad (7.14)$$

Für den (radargrammetrischen) Neupunkt gilt:

$$\sin \alpha_{kj} = \cos \phi_j \sin (\lambda_j - \lambda_k) / \sin \psi_{jk} \quad (7.15)$$

Die Werte $\Delta \ell_{jk}, \Delta q_{jk}$ werden nun mittels der Inversion der Gl. (7.12a,b) in $\Delta \phi, \Delta \lambda$ -Komponenten zurücktransformiert, wobei jedoch der Winkel α_{jk} durch den im Neupunkt geltenden Wert α_{kj} ersetzt wird. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{kj} &= \cos \alpha_{kj} \Delta \ell_{jk} - \sin \alpha_{kj} \Delta q_{jk} \\ \Delta \lambda_{kj} &= \sin \alpha_{kj} \Delta \ell_{jk} + \cos \alpha_{kj} \Delta q_{jk} \end{aligned} \quad (7.16)$$

Aus allen $\Delta \phi_{kj}, \Delta \lambda_{kj}$, -Werten ($j=1, \dots, n$) wird nun ein gewogenes Mittel gebildet:

$$\Delta\phi_k = \left\{ \sum_{j=1}^n (\cos \alpha_{kj} \Delta\ell_{jk} - \sin \alpha_{kj} \Delta q_{jk}) / \psi_{jk}^c \right\} / \sum_{j=1}^n (1/\psi_{jk})^c \quad (7.17a)$$

$$\Delta\lambda_k = \left\{ \sum_{j=1}^n (\sin \alpha_{kj} \Delta\ell_{jk} + \cos \alpha_{kj} \Delta q_{jk}) / \psi_{jk}^c \right\} / \sum_{j=1}^n (1/\psi_{jk})^c \quad (7.17b)$$

Darin bezeichnet c einen geeignet zu wählenden Faktor der Gewichtsfunktion $1/\psi^c$.

Für die Höhe h_k folgt in analoger Weise:

$$\Delta h_k = \left\{ \sum_{j=1}^n (\Delta h_j / \psi_{jk}^c) \right\} / \sum_{j=1}^n (1/\psi_{jk})^c \quad (7.17c)$$

(ii) Lineare Prädiktion

Im Falle der linearen Prädiktion folgt die Interpolation der $\Delta\phi_k$, $\Delta\lambda_k$, Δh_k Korrekturen der radargrammetrischen Punkte p_k , $k=1, \dots, m$ mit Hilfe der Gl. (7.18), die den Gl. (5.8) entsprechen:

$$\Delta\phi_k = \underline{c}_\phi \cdot \underline{C}^{-1} \cdot \underline{e} \quad (7.18a)$$

$$\Delta\lambda_k = \underline{c}_\lambda \cdot \underline{C}^{-1} \cdot \underline{e} \quad (7.18b)$$

$$\Delta h_k = \underline{c}_h \cdot \underline{C}^{-1} \cdot \underline{e} \quad (7.18c)$$

Die Komponenten des Vektors \underline{e} sind die $\Delta\phi_j$, $\Delta\lambda_j$, Δh_j Werte in den Paßpunkten. Die Matrix \underline{C} mit der Dimension $3n \times 3n$ enthält die Kovarianzen zwischen den n Paßpunkten \underline{g}_j , $j=1, \dots, n$. Daher gilt hierfür in bekannter Schreibweise:

$$\underline{C} = \begin{vmatrix} \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi\lambda} & \underline{C}_{\phi h} \\ \underline{C}_{\lambda\phi} & \underline{C}_{\lambda\lambda} & \underline{C}_{\lambda h} \\ \underline{C}_{h\phi} & \underline{C}_{h\lambda} & \underline{C}_{hh} \end{vmatrix} \quad (7.19)$$

($\underline{C}_{\phi\phi}$ ist die Kovarianz-Matrix der $\Delta\phi$ -Korrekturen der Paßpunkte usw.).

Der Vektor \underline{c}_ϕ (bzw. \underline{c}_λ , \underline{c}_h) enthält die Kovarianzen zwischen den zu ermittelnden Werten $\Delta\phi_k$ (bzw. $\Delta\lambda_k$, Δh_k) in den Neupunkten und den gegebenen Werten in den Paßpunkten. Daher gilt z.B.:

$$\underline{c}_\phi = (\underline{C}_{\phi\phi}(\underline{p}_k, \underline{g}_1), \dots, \underline{C}_{\phi\phi}(\underline{p}_k, \underline{g}_n), \dots, \underline{C}_{\phi h}(\underline{p}_k, \underline{g}_n)) \quad (7.20)$$

Die Kovarianzfunktionen $\underline{C}_{\phi\phi}$, $\underline{C}_{\lambda\lambda}$, $\underline{C}_{\phi\lambda}$ etc. müssen aus den longitudinalen und transversalen Komponenten $\Delta\ell_j$, Δq_j der Diskrepanzen in Gl. (7.12) in zwei Schritten ermittelt werden. Erst werden die Kovarianzen $\underline{C}_{\ell,\ell}$, $\underline{C}_{\ell,q}$, $\underline{C}_{q,q}$ mit Hilfe der Standardalgorithmen für die Kovarianzfunktionen bestimmt (Kraus und Mikhail^x, 1972). Aus diesen werden dann die Werte $\underline{C}_{\phi\phi}$, $\underline{C}_{\lambda\lambda}$, $\underline{C}_{\phi\lambda}$ berechnet. Nach Moritz^x (1973) bestehen für das Punktepaar p_i , p_j die Gl.:

$$\begin{aligned} \underline{C}_{\phi_i\phi_j} &= \underline{C}_{\ell_i\ell_j} \cos \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} + \underline{C}_{q_iq_j} \sin \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} - \underline{C}_{\ell_iq_j} \cos \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} - \\ &\quad - \underline{C}_{q_i\ell_j} \sin \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} \end{aligned} \quad (7.21a)$$

$$C_{\lambda_i \lambda_j} = C_{l_i l_j} \sin \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} + C_{q_i q_j} \cos \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} - C_{l_i q_j} \sin \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} - C_{q_i l_j} \cos \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} \quad (7.21b)$$

$$C_{\phi_i \lambda_j} = C_{l_i l_j} \cos \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} - C_{q_i q_j} \sin \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} + C_{l_i q_j} \cos \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} - C_{q_i l_j} \sin \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} \quad (7.21c)$$

$$C_{\lambda_i \phi_j} = C_{l_i l_j} \sin \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} - C_{q_i q_j} \cos \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} - C_{l_i q_j} \sin \alpha_{ij} \sin \alpha_{ji} + C_{q_i l_j} \cos \alpha_{ij} \cos \alpha_{ji} \quad (7.21c)$$

Die Kovarianzfunktion C_{hh} folgt direkt aus den Höhenfehlern Δh_k der Paßpunkte. Wird die externe Blockausgleichung nur für ein kleines Gebiet ausgeführt, so kann die Berücksichtigung der sphärischen Krümmung des Planeten entfallen. Anstelle der planetographischen Koordinaten sind in diesem Falle ebene rechtwinkelige Koordinaten zu verwenden. Dies führt zur einfachen Kovarianzberechnung und Interpolation eines ebenen Vektorfeldes, die u.a. durch Kraus und Mikhail^x (1972) am Beispiel der externen photogrammetrischen Lageblockausgleichung beschrieben und demonstriert wurde.

7.3. SIMULTANE AUSGLEICHUNG UNABHÄNGIGER STEREOMODELLE

Liegen unabhängige Radarstereomodelle vor, die unter Verwendung von Paßpunkten simultan in einen Radarblock transformiert werden sollen, so ergibt sich eine der photogrammetrischen Blockausgleichung mit Aeropolygonstreifen ähnliche Aufgabe. Die Radar-Stereomodelle überdecken einander, sodaß es möglich wird, Klaffungen in der Blockausgleichung zur Berechnung von Streifenkorrekturen heranzuziehen. Eine effektive mathematische Beschreibung der Streifendeformationen ist mit Hilfe von stückweisen Polynomen möglich, die den in den vorigen Abschnitten beschriebenen entsprechen. Die Streifen können aber auch in kleinere Einheiten unterteilt und diese als unabhängige Modelleinheiten zu einem Block vereinigt werden.

7.3.1 Nochmals stückweise Polynome

Die stückweisen oder verknüpften Polynome für den sequentiellen Stereomodellanschluß (Unterabschnitt 7.2.1) und den Folgebildanschluß waren Sonderfälle für die Lösung der beschriebenen Problemstellungen. Diese Polynome können zwar auch für die simultane Ausgleichung verwendet werden, aber nur unter vereinfachenden Annahmen. Im Allgemeinfeld der simultanen Ausgleichung unabhängiger Stereomodelle sind die Klaffungen nicht nur eine Funktion der x-, sondern auch der y- und z-Koordinaten. Dies wird in der Folge untersucht.

Die Streifenkoordinaten der Punkte p_k im Stereomodell mit Nummer i seien mit p_{xki}^\bullet , p_{yki}^\bullet , p_{zki}^\bullet bezeichnet. Da die Stereomodelle mittels Einstelldaten gebildet werden, ist der Zusammenhang zwischen Streifen- und planetarischen Koordinaten bekannt. Im folgenden wird aber ein Streifenssystem (z.B. schiefachsige Zylinderprojektion) benutzt, um weitgehend unabhängige Streifendeforma-

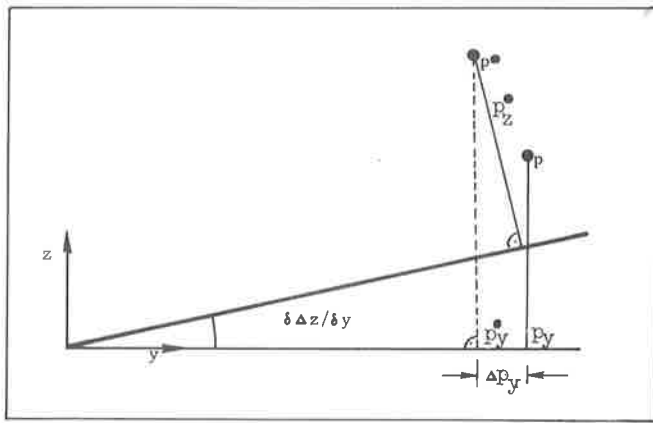
tionen Δp_{xki} , Δp_{yki} , Δp_{zki} annehmen zu können. Jede Komponente kann daher als Funktion der p_x^\bullet , p_y^\bullet - Koordinaten angesetzt werden. Es gilt z.B. für Δp_{zki} der Ausdruck:

$$\Delta p_{zki} = \left\{ c_{j1} + c_{j2} p_{xk}^\bullet + c_{j3} (p_{xk}^\bullet)^2 + c_{j4} (p_{xk}^\bullet)^3 + \dots + c_{j(n_x+1)} p_{yk}^\bullet + c_{j(n_x+2)} p_{yk}^\bullet p_{xk}^\bullet + \right. \\ \left. + c_{j(n_x+3)} p_{yk}^\bullet (p_{xk}^\bullet)^2 + c_{j(n_x+4)} p_{yk}^\bullet (p_{xk}^\bullet)^3 + \dots \right\}_i$$

oder:

$$\Delta p_{zki} = \sum_{m=0}^{m_z} \left\{ \sum_{\ell=1}^{n_x} c_{ij(4m+\ell)} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-1} (p_{yki}^\bullet)^m \right\} \quad (7.22)$$

in dem $j=1, \dots, m_j$ den Index des Polynomstückes bezeichnet.



Figur 7.3: Stereomodelldeformation in Querrichtung als Folge des Höhenfehlers.

Die Δp_y -Deformation wird nach Figur 7.3 von Δp_z beeinflusst; daher gilt:

$$\Delta p_{yki} = \sum_{m=0}^{m_y} \left\{ \sum_{\ell=1}^{n_x} b_{ij(4m+\ell)} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-1} (p_{yki}^\bullet)^m \right\} - \\ - p_{zki}^\bullet \left\{ \sum_{m=1}^{m_z} \sum_{\ell=1}^{n_x} m c_{ij(4m-\ell)} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-1} (p_{yki}^\bullet)^{m-1} \right\} \quad (7.23)$$

Aus ähnlichen Überlegungen ist Δp_x von Δp_y , Δp_z abhängig.

$$\Delta p_{xki} = \left\{ \sum_{\ell=1}^{n_x} a_{ij\ell} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-1} \right\} - p_{yki}^\bullet \left\{ \sum_{m=0}^{m_y} \sum_{\ell=2}^{n_x} (\ell-1) b_{ij(4m+\ell)} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-2} (p_{yki}^\bullet)^m \right\} - \\ - p_{zki}^\bullet \left\{ \sum_{m=0}^{m_z} \sum_{\ell=2}^{n_x} (\ell-1) c_{ij(4m+\ell)} (p_{xki}^\bullet)^{\ell-2} (p_{yki}^\bullet)^m \right\} \quad (7.24)$$

Die Kontinuität benachbarter Polynomstücke wird für die Nahtstelle $x=x_j$ durch gleiche Funktions-

werte und erste Ableitungen der Polynome erreicht. Für Δp_z folgt zum Beispiel:

$$\sum_{m=0}^m \sum_{\ell=1}^n c_{j(4m+\ell)} (x_j^\bullet)^{\ell-1} (y^\bullet)^m = \sum_{m=0}^m \sum_{\ell=1}^n c_{j+1,4m+\ell} (x_{j+1}^\bullet)^{\ell-1} (y^\bullet)^m \quad (7.25a)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^m \sum_{\ell=2}^n (\ell-1) c_{j(4m+\ell)} (x_j^\bullet)^{\ell-2} (y^\bullet)^m = \\ & = \sum_{m=0}^m \sum_{\ell=2}^n (\ell-1) c_{(j+1)(4m+\ell)} (x_{j+1}^\bullet)^{\ell-2} (y^\bullet)^m \end{aligned} \quad (7.25b)$$

Jeder Stereomodelstreifen wird bis jetzt in seinem eigenen Koordinatensystem beschrieben. Die Modellkoordinaten müssen daher noch in ein planetographisches System transformiert werden. Dies erfolgt mit Hilfe von Gleichungen von der Form:

$$\phi_{ki} = f_\phi (p_{xki}^\bullet + \Delta p_{xki}, p_{yki}^\bullet + \Delta p_{yki}, p_{zki}^\bullet + \Delta p_{zki}) \quad (7.26a)$$

$$\lambda_{ki} = f_\lambda (p_{xki}^\bullet + \Delta p_{xki}, p_{yki}^\bullet + \Delta p_{yki}, p_{zki}^\bullet + \Delta p_{zki}) \quad (7.26b)$$

$$h_{ki} = p_{zki}^\bullet + \Delta p_{zki} \quad (7.26c)$$

In diesen bezeichnen Δp_{xki} , Δp_{yki} , Δp_{zki} die in Gl. (7.22), (7.23), (7.24) angegebenen Streifendeformationen.

Planetographische Koordinaten aus verschiedenen Stereomodellen müssen identisch sein, sodaß für Punkte im gemeinsamen Gebiet benachbarter Modelle die Beziehungen:

$$\phi_{k,i} = \phi_{k,i+1} \quad ; \quad \lambda_{ki} = \lambda_{k,i+1} \quad ; \quad h_{k_i} = h_{k,i+1} \quad (7.27)$$

und für Paßpunkte $\underline{g} = (\phi_g, \lambda_g, h_g)$ die Beziehungen

$$\phi_g = \phi_{k,i} \quad ; \quad \lambda_g = \lambda_{k,i+1} \quad ; \quad \text{usw.} \quad (7.28)$$

bestehen. Die Gl. (7.27) und (7.28) sind nichtlineare Bedingungen für die unbekanntenen Polynomkoeffizienten der Gl. (7.22) bis (7.24). Für die gemeinsame Ausgleichung aller Modellstreifen müssen die Gl. (7.27), (7.28) linearisiert werden. Zusätzliche Bedingungsgleichungen ergeben sich aus den Gl. (7.25). Die Gl. (7.22) bis (7.24) sind hingegen Beobachtungsgleichungen für p_x^\bullet , p_y^\bullet , p_z^\bullet . Die Aufgabe führt somit zum allgemeinen Ausgleichungsfall vermittelnder Beobachtungen mit Bedingungen. Für i Radarbildstreifen ergeben sich $(i-1)$ Stereomodelle und je j_i Polynomstücke je Stereomodell. Mit $m_y = m_z = 0$, $n_x = 4$, k_p Verknüpfungspunkten für benachbarte Stereomodelle, und k_g Paßpunkten liegen $(6i_b j_i - 6j_i + 6i_b k_p - 12k_p + 3k_g - 6i_b + 6)$ Gleichungen, $(12i_b j_i - 12j_i + 3i_b k_p - 6k_p)$ Unbekannte und $(6i_b k_p - 12k_p + 3k_g)$ Beobachtungen vor.

Für einen Block mit 10 Bildstreifen ($i_b = 10$), eine Beschreibung der Modelldeformationen mit $j_i=2$ stückweisen Polynomen, 10 Verknüpfungspunkten pro Modellpaar und 10 Paßpunkten gibt es 564 Gleichungen, 510 Beobachtungen und 456 Unbekannte.

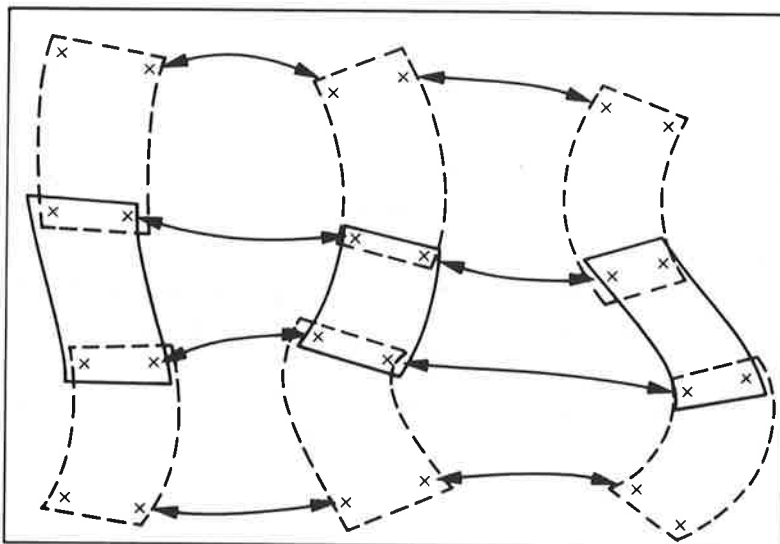
Die beschriebene Methode zur Ausgleichung unabhängiger Radarstereomodelle unterscheidet sich von der herkömmlichen photogrammetrischen Blockausgleichung mit Streifen als Einheiten durch die für die Beschreibung der Modelldeformationen verwendeten Polynome. Außerdem ist die angegebene Radar-Streifenausgleichung für große Gebiet vorgesehen. Dies führt wegen der Meridiankonvergenz zu Abhängigkeiten unter den Komponenten der Streifendeformationen. Der vorliegende Ansatz berücksichtigt diese Abhängigkeiten.

Für genügend kleine Gebiete kann die Transformation (7.26) wegfallen und angenommen werden, daß rechtwinkelige kartesische, untereinander parallele Modellkoordinatensysteme vorliegen. Wird weiters $m_x = m_y = m_z = 0$, $n_x = 3$ gesetzt, so ergibt sich ein zur photogrammetrischen Streifenausgleichung mittels Splines 2.Ordnung (Waldhäusl^x, 1974) identisches Ausgleichungsverfahren.

Die Anzahl der Unbekannten kann reduziert werden, wenn die Bedingungen über die Kontinuität der stückweisen Polynome (in Form der Gl. (7.25)) eliminiert werden können. Ein Verfahren hiezu ist die geeignete Wahl von Hilfsunbekannten, zum Beispiel von Funktionswerten und Tangenten der Polynome in den Verknüpfungsstellen (Waldhäusl^x, 1974; Leberl, 1975c, siehe Kapitel 8).

7.3.2 Unterteilung in kleinere Einheiten

Es ist auch möglich, ein streifenförmiges Radarstereomodell in kleinere Stücke zu unterteilen (wie es in Figur 7.4 dargestellt wird) und jedes Stück als Einheit in die Blockausgleichung einzuführen. Der Vorteil dieses Vorgehens wäre Anwendbarkeit der Standardcomputerprogramme der photogrammetrischen Blockausgleichung auf Radardaten. Dieser Vorschlag wurde erstmals durch Case^x (1967) für Streifenphotographie publiziert. Dabei wurden nicht die daraus gebildeten Stereomodelle, sondern die ursprünglichen Bildstreifen betrachtet. Case bezeichnete die neuen, aus der Unterteilung der Streifen erhaltenen Einheiten als "equivalent frame photograph" (Äquivalente Meßkammeraufnahme). Die Unterteilung in kleinere Einheiten kann sowohl für die ursprünglichen Radarbildstreifen als auch für das Stereomodell erfolgen. Für die Blockbildung können die photogrammetrischen Methoden der planimetrischen und räumlichen Blockausgleichung mittels individueller Drehstreckungen (planimetrisch: ANBLOCK) angewendet werden.



Figur 7.4: Prinzipskizze der Unterteilung des Radarstereomodelles oder Bildes in kleinere Einheiten und Ausgleichung dieser Einheiten.

7.4. SIMULTANE AUSGLEICHUNG URSPRÜNGLICHER BILDSTREIFEN

Das radargrammetrische Äquivalent zur photogrammetrischen Bündelausgleichung geht von der Erfüllung aller Schnittbedingungen der Radarprojektionskreise aus.

Rechnerische Hilfsmittel für dieses Verfahren wurden in vorhergehenden Abschnitten, insbesondere beim Folgebildanschluß, behandelt. Der wesentliche Unterschied zum Folgebildanschluß liegt in der Tatsache, daß die ("Folge"-) Bildanschlüsse nunmehr gemeinsam für alle i_b Bildstreifen berechnet werden müssen.

Für jeden Bildstreifen $i(i=1, \dots, i_b)$ wird eine Gruppe von linearisierten Gleichungen (7.8a) erhalten (k_i Bildpunkte im Bildstreifen i führen auf $2k_i$ Gleichungen). Die Sensorposition $\underline{s}(t)$ wird durch stückweise polynomiale Zeitfunktionen beschrieben, der Geschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{s}}(t)$ als 1. Ableitung von \underline{s} . Die Gl. (7.8b) sind Verbesserungsgleichungen für die Beobachtungen von $\underline{s}(t)$, die Gl. (7.8c) sind die Kontinuitätsbedingungen für die stückweisen Polynome.

Für jeden Paßpunkt $g_\ell (\ell = 1, \dots, \ell_g)$ gilt eine Beziehung:

$$\underline{g}_\ell + \underline{v}_{g_\ell} = (\underline{p}_\ell)_0 + \Delta \underline{p}_\ell \quad (7.29)$$

in welcher \underline{g}_ℓ den geodätischen Paßpunkt, \underline{v}_{g_ℓ} die Verbesserungen, $(\underline{p}_\ell)_0$ den Näherungswert der radargrammetrischen Berechnung und $\Delta \underline{p}_\ell$ die unbekanntenen Zuschläge zu den Näherungswerten der Paßpunktkoordinaten bezeichnen.

Das Computerprogramm von DBA-Systems (1974) betrifft die erläuterte Blockausgleichungsmethode, allerdings ohne Beachtung des Zusammenhanges zwischen Sensorposition $\underline{s}(t)$ und Orientierung der Radarabtastrfläche (die im Fall der synthetischen Apertur durch den Geschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{s}}(t)$ definiert wird).

Zusätzlich zu den Verbesserungsgleichungen (7.8a,b,c) und (7.29) werden bei DBA-Systems (1974) Parameter zur Beschreibung von Fehlern der inneren Geometrie eingeführt. Dies erfolgt für Schrägdistanz r und Aufnahmezeit t durch den Ansatz:

$$r_{ki} + v_{rki} = (r_{ki})_0 + \Delta r_{ki} = (r_{ki})_0 + a_r r_{ki} + b_r r_{ki}^2 + c_r r_{ki}^3 \quad (7.30)$$

$$t_{ki} + v_{tki} = (t_{ki})_0 + \Delta t_{ki} = (t_{ki})_0 + a_t r_{ki} + b_t r_{ki}^2 + c_t r_{ki}^3 \quad (7.31)$$

Die Koeffizienten $a_r, b_r, c_r, a_t, b_t, c_t$ beschreiben invariable systematische, nichtlineare Fehler der Schrägdistanz- und Zeitmessung. Gracie u.a. (1970) stellten zwar fest, daß vom System her nichtlineare innere Orientierungsfehler nicht zu erwarten sind. Durch die Gl. (7.30), (7.31) wird jedoch (entsprechend der photogrammetrischen Bündel- (und Modell-) Ausgleichung mit zusätzlichen Parametern) die Flexibilität und Genauigkeit der Methode vergrößert und eine Selbstkalibrierung des Systems bewirkt. Die Koeffizienten der Polynome (7.30), (7.31) können auch nach Ebner^x, (1973) als Beobachtungen ($a_r = b_r = c_r = a_t = b_t = c_t = 0$) in die Ausgleichung eingeführt werden.

Somit ergeben sich zusätzlich zu den schon angeführten Verbesserungs- und Bedingungsungleichungen noch die aus Gl. (7.30) und (7.31) folgenden Verbesserungsgleichungen je Bildstreifen:

$$\underline{v}_i + D_i^v \Delta \underline{u} + \underline{f}_i^v = 0 \quad (7.32)$$

Darin bezeichnet $\Delta \underline{u}$ den Vektor der unbekanntenen Koeffizienten der Kalibrierungspolynome.

Eine Anzahl von m_i unabhängigen Altimetriemessungen h_m ($m=1, \dots, m_i$) legen in jedem Bildstreifen den Abstand zwischen Sensor und Nadir fest. Im Fall einer kreisförmigen Umlaufbahn um einen sphärischen Planeten vom Radius R gilt:

$$|s_m| = R + h_m \quad m=1, \dots, m_i \quad (7.33)$$

Gl. (7.33) liefert eine weitere Verbesserungsgleichung je Altimetriemessung, wobei ein systematischer Meßfehler mit Δh eingeführt werden kann:

$$h_m + (v_h)_m = (h_m)_0 + \Delta h + |s_m| - R \quad (7.34)$$

Nach Linearisierung folgt für jeden Bildstreifen eine Gl.:

$$\underline{v}_{hi} - \Delta h + \underline{D}_i^v \Delta \underline{u}_i'' + \underline{f}_{hi}^v = 0 \quad (7.35)$$

Vektor $\Delta \underline{u}_i''$ enthält die unbekanntenen Koeffizienten der Polynome zur Darstellung der Sensorposition und Vektor \underline{v}_{hi} die Verbesserungen $(v_{hi})_m$ aller m_i Altimeter-Beobachtungen im Streifen i .

Sind die Altimeterdaten für eine exzentrische Umlaufbahn um einen ellipsoidischen Satelliten gegeben, so folgen für die Gl. (7.34), (7.35) wesentlich kompliziertere Beziehungen, die hier nicht behandelt werden.

Es sei ein Block mit i_b Bildstreifen gegeben, für welche die Sensorposition in je (j_i) Polynomstücken beschrieben wird. Je Bildstreifen seien k_i Bildpunkte, l_g Paßpunkte, l_p radargrammetrischen Punkte und m_i Altimetermessungen gegeben und je Bild n_i Beobachtungen des Positionsvektors \underline{s} erfolgt. Dann gibt es:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i_b} (2k_i + 3n_i + 2(j_i-1) + 2k_i + m_i) + 3l_g & \text{ Gleichungen} \\ \sum_{i=1}^{i_b} (2k_i + 3n_i + m_i) + 3l_g & \text{ Beobachtungen} \\ \sum_{i=1}^{i_b} (12j_i) + 3l_g + 3l_p + 7 & \text{ Unbekannte} \end{aligned}$$

Um eine Vorstellung von der Anzahl von Gleichungen, Beobachtungen und Unbekannten zu erhalten, wird ein kleiner Block von 10 Radarbildern mit 60 % Überlappung angenommen ($i_b = 10$). Jeder Bildstreifen sei 200 km lang, sodaß er in etwa 30 Sekunden von einem Satelliten aufgenommen wird ($|\dot{s}| \approx 7$ km/Sekunde). Die Sensorposition wird jede Sekunde gemessen ($n_i=30$, $m_i=30$). Für jeden Streifen werden 5 Verknüpfungspolynome angesetzt ($j_i=5$). Schließlich werden in jedem Streifen 5 radargrammetrische Verknüpfungspunkte im gemeinsam überdeckten Gebiet der Stereomodelle gemessen ($k_i=5$), wovon 4 gleichzeitig auch Paßpunkte sind. Mit diesen Annahmen ergeben sich 1492 Gleichungen, 1312 Beobachtungen und 647 Unbekannte. Diese Zahlen zeigen den für die simultane Radarblockausgleichung erforderlichen Aufwand. Die Anzahl der Gleichungen und Unbekannten kann geringfügig verringert werden, wenn die Bedingungsgleichungen (7.8c) durch Einsetzen in die Verbesserungsgleichungen eliminiert werden. Aber die numerische Lösung des Problems bleibt trotzdem aufwendig.

7.5. ZUSAMMENFASSUNG

Für die bisher wenig beachtete räumliche Radarblockausgleichung werden verschiedene Verfahren angegeben. Diese werden analog zur photogrammetrischen Blockausgleichung in drei Gruppen eingeteilt: in sequentielle Verfahren der Blockbildung und der "externen" Ausgleichung; in Verfahren der gemeinsamen (simultanen) Ausgleichung unabhängiger Stereomodellstreifen; und in Verfahren zur Ausgleichung der ursprünglichen Bildstreifen.

Die sequentiellen Methoden benötigen einen geringen numerischen Aufwand, da Stereomodelle oder Bildstreifen nacheinander bearbeitet und viele Beziehungen zwischen Radarbilddaten vernachlässigt werden. Die Radarblockbildung kann durch sequentielle Modellanschlüsse oder Folgebildanschlüsse erfolgen. Die externe Radarblockausgleichung besteht in der Interpolation von Korrekturen für die Blockkoordinaten auf Grund der in Paßpunkten festgestellten Widersprüche und entspricht der externen photogrammetrischen Blockausgleichung. Für Satellitenprojekte, in denen größere Gebiete bearbeitet werden als in der Luftbildmessung, muß die sphärische Krümmung des Planeten in der externen Blockausgleichung durch Anpassungen der Interpolationsalgorithmen (z.B. der linearen Prädiktion) erfolgen.

Die gemeinsame Ausgleichung unabhängiger Stereomodellstreifen wird durch die Notwendigkeit erschwert, Koordinatensysteme zu benutzen, in denen die Stereomodelldeformationen in den drei Koordinatenrichtungen weitgehend unabhängig sind. Die Modelldeformationen müssen daher in Modellkoordinatensystemen angesetzt und dann in das Blockkoordinatensystem transformiert werden.

Die simultane Ausgleichung der ursprünglichen Bildstreifen beruht auf der einfachen Bedingung, daß der Objektpunkt auf einem Kreis um die Sensorposition liegt. Allerdings folgen bereits für kleine Radarbildverbände Gleichungssysteme mit einer Vielzahl von Unbekannten. Ein Vergleich des Aufwandes für die simultane Ausgleichung unabhängiger Modelle und ursprünglicher Bildstreifen ergibt, daß erstere zu wesentlich kleineren Gleichungssystemen führt.

Aus den ausgeführten Untersuchungen folgen keine Angaben über die Genauigkeiten der verschiedenen Methoden, da der notwendige Aufwand im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht bewältigt werden konnte. Diese Daten wären jedoch notwendig, um verbindliche Aussagen über Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden machen zu können. Entsprechende Untersuchungen werden daher angeregt.

8. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR RADARBLOCKAUSGLEICHUNG

8.1. EINLEITUNG

Im vorliegenden Kapitel werden numerische Arbeiten über die planimetrische Ausgleichung von Flugzeugradaraufnahmen (Leberl, 1975c, 1975d; Leberl, Jensen u.a. 1976) analysiert und Schlußfolgerungen für Satellitenradar abgeleitet.

Zwei Publikationen zur Radarblockausgleichung von DBA-Systemen (1974) und Dowideit (1975) behandeln die Ausgleichung von Flugzeugradarbildern. Die erste Arbeit (DBA-Systemen) hatte nur die Entwicklung eines Computerprogramms zum Ziele, nicht aber Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Genauigkeit, Blockgröße, Aufwand und Projektparametern. Da die finanziellen Mittel für diese Arbeit erschöpft sind, ist in nächster Zukunft nicht mit numerischen Ergebnissen aus Untersuchungen mittels dieses Programms zu rechnen.

Dowideits (1975) Studie gibt erstmals eine numerische Analyse der radargrammetrischen Ausgleichung ursprünglicher Bildstreifen. Da diese zum Zeitpunkt der Vorlage dieses Berichts noch nicht abgeschlossen war und die genannte Referenz (Dowideit, 1975) nur einen Zwischenbericht (ohne Ergebnisse) darstellt, kann darauf nicht eingegangen werden.

In der folgenden Übersicht über numerische Radarblockausgleichungen wird erst ein Vergleich zwischen dem sequentiellen und simultanen planimetrischen Verfahren mittels simulierter Daten ausgeführt. Darauf werden die Berechnungen für zwei operationelle Radarprojekte diskutiert, welche die Radarkartierung der kolumbianischen Amazonasprovinz (Leberl, 1975c) und des Apalachengebietes in den Vereinigten Staaten (Leberl, Jensen u.a. 1976) betreffen. Aus den Ergebnissen werden Hinweise für die Satellitenradargrammetrie erkannt.

8.2. SIMULTANE UND SEQUENTIELLE PLANIMETRISCHE RADARBLOCKAUSGLEICHUNG

Für den Vergleich der Leistungsfähigkeit der sequentiellen Radarblockbildung (und Ausgleichung) und der simultanen Methoden werden einander überdeckende Radarstereomodelle flachen Geländes (oder einzelne Radarschrägaufnahmen in Grunddistanzdarstellung) benützt. Dabei werden kleine Aufnahmegebiete vorausgesetzt, sodaß die Planetenkrümmung vernachlässigt werden kann. Mit diesen Annahmen kann die im vorigen Abschnitt eingeführte Transformation der Modellkoordinaten p_x^\bullet , p_y^\bullet , p_z^\bullet in ein planetozentrisches Koordinatensystem entfallen. Die vereinfachenden Annahmen haben keinen Einfluß auf die Gültigkeit des Genauigkeitsvergleiches.

8.2.1 Untersuchte Simultanmethoden

(i) Stückweise Polynome

In der allgemeinen Darstellung der planimetrischen Radarmodellverformungen durch stückweise Polynome in Gl. (7.24) werden folgende Vereinfachungen eingeführt: Flaches Gelände ($p_z = 0$); kleine Streifendeformationen, (Abhängigkeiten zwischen Δp_x , Δp_y vernachlässigbar); $m_y = 0$; $n_x = 2$; (Koordinatensysteme x, y, z und $x^\bullet, y^\bullet, z^\bullet$ nahezu zusammenfallend). Damit folgt aus den Gl. (7.23) und (7.24):

$$\begin{aligned} \Delta p_{xki} &= a_{ij1} + a_{ij2} p_{xki} \\ \Delta p_{yki} &= b_{ij1} + b_{ij2} p_{xki} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \Delta p_{xki} \\ \Delta p_{yki} \end{aligned}} \right| (8.1)$$

$$x_{(j-1)i} \leq p_{xki} < x_{ji} \quad j = 1, \dots, j_i$$

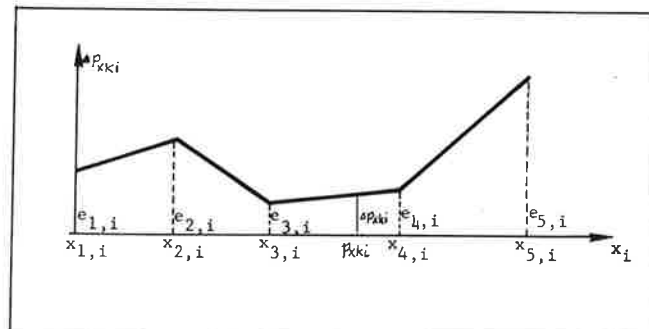
(j_i ... Anzahl der Polynomstücke)

Die Kontinuitätsbedingungen (7.25) werden für Δp_z angegeben und gelten in analoger Form für Δp_x , Δp_y . Diese gehen in die einfachen Beziehungen (8.2.) über:

$$\begin{aligned} a_{i(j-1)1} + a_{i(j-1)2} x_{ji} &= a_{ij1} + a_{ij2} x_{ji} \\ b_{i(j-1)1} + b_{i(j-1)2} x_{ji} &= b_{ij1} + b_{ij2} x_{ji} \end{aligned} \quad (8.2)$$

Gl. (8.1), (8.2) stellen verknüpfte lineare Polynome dar, die in Fig. 8.1 dargestellt sind (Spline-Funktion erster Ordnung). Bezeichnet man die Funktionswerte von Δp_x nach Fig. 8.1 in den Verknüpfungsstellen mit e_{ji} (und von Δp_y mit f_{ji}), so kann das verknüpfte lineare Polynom wie folgt angeschrieben werden:

$$\begin{aligned} \Delta p_{xki} &= e_{(j-1)i} (1-A) + e_{ji} A \\ \Delta p_{yki} &= f_{(j-1)i} (1-A) + f_{ji} A \end{aligned} \quad (8.3)$$



Figur 8.1: Definition von Hilfsunbekannten e_{ji} für eine Biegefunktion (Spline-Polynom) erster Ordnung.

wobei

$$A = (p_{xki} - x_{(j-1)i}) / (x_{ji} - x_{(j-1)i})$$

$$x_{(j-1)i} \leq p_{xki} < x_{ji}$$

Aus einem Vergleich der Gl. (8.3) mit Gl. (8.1), (8.2) folgt, daß die Einführung der neuen Unbekannten e_{ji} , f_{ji} es ermöglicht, die Verknüpfungspolynome mit der Hälfte der Gleichungen und Unbekannten zu beschreiben, die im Falle des herkömmlichen Ansatzes mit Gl. (8.1), (8.2) notwendig wären.

Die ausgeglichenen Radarblockkoordinaten p_{xk} , p_{yk} ergeben sich als Summe einer linearen, konformen Transformation (Drehstreckung) jedes Radarmodellstreifens und der Streifendeformationen Δp_{xk} , Δp_{yk} nach:

$$\begin{aligned} p_{xk} &= a_i p_{xki} + b_i p_{yki} + \Delta p_{xki} \\ p_{yk} &= -b_i p_{xki} + a_i p_{yki} + \Delta p_{yki} \end{aligned} \quad (8.4)$$

wobei a_i, b_i die Koeffizienten der Drehstreckung des Streifens i bezeichnen.

(ii) ANBLOCK: Drehstreckung als Elementartransformation

Wird jeder Radarstereomodellstreifen in mehrere überlappende Stücke mit Index $j=1, \dots, j_i$ unterteilt, so erhält man statt des aus Streifen bestehenden Radarblocks einen aus kleinen Stereomodell-einheiten bestehenden, der dem herkömmlichen photogrammetrischen Modellblock ähnlich ist (vergl. Abb. 7.4). Eine planimetrische Ausgleichung kann daher nach dem photogrammetrischen ANBLOCK-Verfahren erfolgen. Hiefür gilt:

$$\begin{aligned} p_{xk} &= a_{ji} p_{xki} + b_{ji} p_{yki} + c_{ji} \\ p_{yk} &= -b_{ji} p_{xki} + a_{ji} p_{yki} + d_{ji} \end{aligned} \quad (8.5)$$

(iii) Elementartransformation mit differentiellen Maßstabsunterschied

Die Drehstreckung (8.5) kann durch eine Transformation mit einem zusätzlichen fünften Parameter für einen Maßstabsunterschied in x und y ersetzt werden:

$$\begin{aligned} p_{xk} &= a_{ji} p_{xki} + b_{ji} p_{yki} + c_{ji} \\ p_{yk} &= -b_{ji} p_{xki} + a_{ji} p_{yki} + d_{ji} + e_{ji} p_{yki} \end{aligned} \quad (8.6)$$

8.2.2 Untersuchte sequentielle Methode

Die Lagekoordinaten des Radarblocks werden durch sequentiellen Modellanschluß gewonnen. Statt jedoch explizit stückweise Polynome und Kontinuitätsbedingungen an den Verknüpfungsstellen anzusetzen, werden ähnlich wie im Simultanfall der stückweisen Polynome neue Unbekannte e_{ji}, f_{ji} und e'_{ji}, f'_{ji} gewählt (Fig. 8.2). Mit $\Delta_i = x_{(j+1)i} - x_{ji}$ wird die Länge des Definitionsbereiches eines Polynomstückes bezeichnet. Die Funktionswerte $e_{ji}, e_{(j-1)i}$ und Tangenten $e'_{ji}, e'_{(j-1)i}$ in den Verknüpfungsstellen $j, j-1$ bestimmen die 4 Koeffizienten $a_{ji1}, a_{ji2}, a_{ji3}, a_{ji4}$ des Polynomstückes j (für Δp_{ki} , vergl. Gl. (7.1)). Es gilt nach Gl. (7.1) in den Verknüpfungsstellen $j-1$ und j :

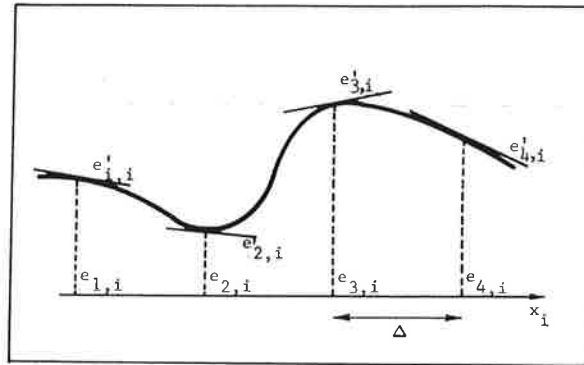
$$\begin{aligned} e_{(j-1)i} &= a_{ji1} \\ e'_{(j-1)i} &= a_{ji2} \\ e_{ji} &= a_{ji1} + a_{ji2} \Delta + a_{ji3} \Delta^2 + a_{ji4} \Delta^3 \\ e'_{ji} &= a_{ji2} + 2a_{ji3} \Delta + 3a_{ji4} \Delta^2 \end{aligned}$$

Umformung liefert:

$$a_{ji1} = e_{(j-1)i}$$

$$\begin{aligned}
 a_{ji2} &= e'_{(j-1)i} \\
 a_{ji3} &= (3(e_{ji} - e_{(j-1)i}) - 2e'_{(j-1)i} - e'_{ji})/\Delta^2 \\
 a_{ji4} &= ((e'_{(j-1)i} + e'_{ji}) + 2(e_{(j-1)i} - e_{ji}))/\Delta^3
 \end{aligned}
 \tag{8.7}$$

mit $j = 1, \dots, j_i$ (j_i = Anzahl der Polynomstücke).



Figur 8.2: Definition von Hilfsunbekannten e_{ji} , e'_{ji} für Biegefunktionen dritter Ordnung

Ähnliche Ausdrücke gelten für $b_{ji1} \dots b_{ji4}$; Δp_{xji} , Δp_{yji} ergeben sich aus Gl. (7.1) und es gilt für p_{xk} , p_{yk} die Gl. (8.4).

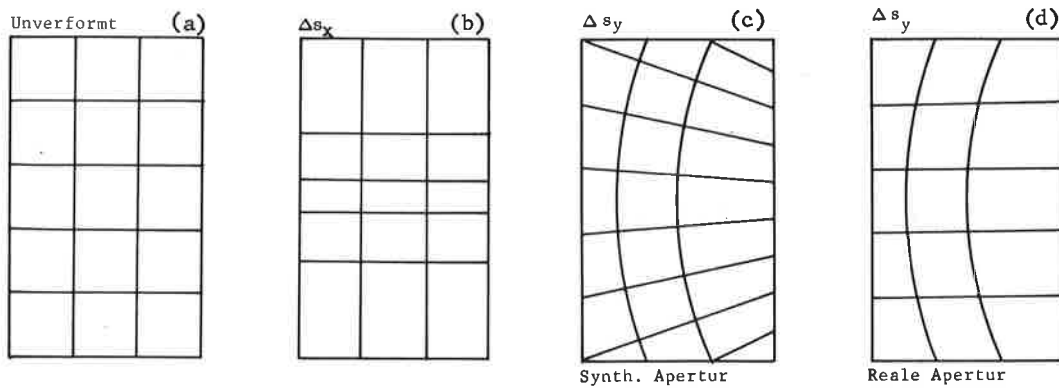
Die sequentielle Methode besteht nun aus folgenden Schritten: a) Drehstreckung des Modells j in das System des Modells $j-1$; b) Berechnung der Klaffungen in gemeinsamen Punkten der benachbarten Modelle; c) Berechnung der Funktionswerte e, f und Tangenten e', f' unter Verwendung eines lokalen Regressionspolynoms in jeder Verknüpfungsstelle; d) Berechnung der Polynomkoeffizienten a_{ji1}, \dots, a_{ji4} nach Gl. (8.7); e) Berechnung der Korrekturwerte $\Delta p_k = (\Delta p_{xk}, \Delta p_{yk})$ nach Gl. (7.1); f) Anbringen der Korrekturwerte Δp_k an die Punkte des vorläufig (mittels Drehstreckung) angeschlossenen Modelles.

Nach der Blockbildung ergeben sich Diskrepanzen zwischen Paßpunkts- und Blockkoordinaten. Auf Grund dieser Diskrepanzen in den Paßpunkten werden mittels linearer Prädiktion (siehe Gl. 5.8) in allen radargrammetrischen Punkten Korrekturen interpoliert.

8.2.3 Numerischer Methodenvergleich - Meßdaten

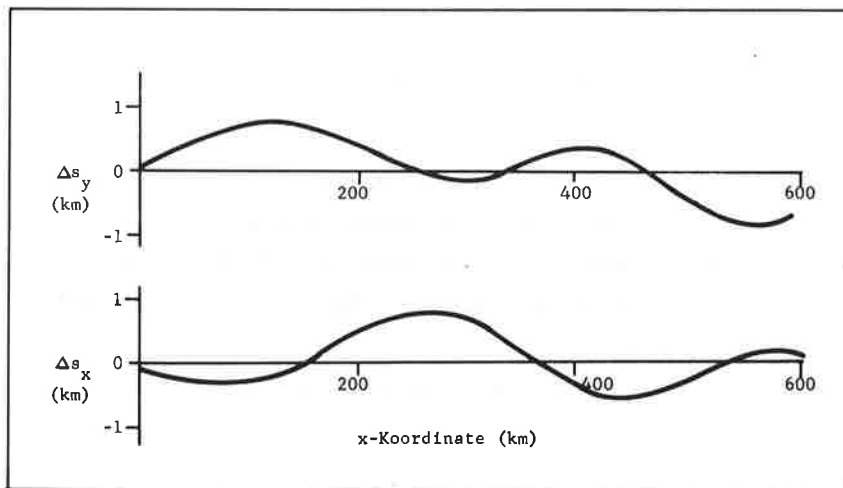
Die Deformationen des einzelnen Radarbildes und des Radarstereomodelles zeigen sich in einer linearen Veränderung in der x -Richtung und in einer quadratischen in y -Richtung. Ein rechtwinkliges Gitter wird nach Figur 8.3a bis d deformiert. Die beschriebenen vereinfachten Methoden der Radarblockausgleichung berücksichtigen nur x -Deformationen nach Fig. 8.3b und y -Deformationen nach Fig. 8.3d. Weitere Deformationen werden durch diese Methoden nicht erfaßt.

Die in Figur 8.3 dargestellten Deformationen haben für Flugzeugradaraufnahmen flachen Geländes Geltung (v. Roessel und de Godoy, 1974; Jensen, 1975; Leberl, 1974). Für Radarstereomodelle gelten die beschriebenen Δy -Deformationen nur näherungsweise, da mit Gl. (4.11) für Δy eine lineare Abhängigkeit von der y -Koordinate zu erwarten wäre (Δy ist proportional dem Verhältnis der y -Koordinate zur Stereobasis B).

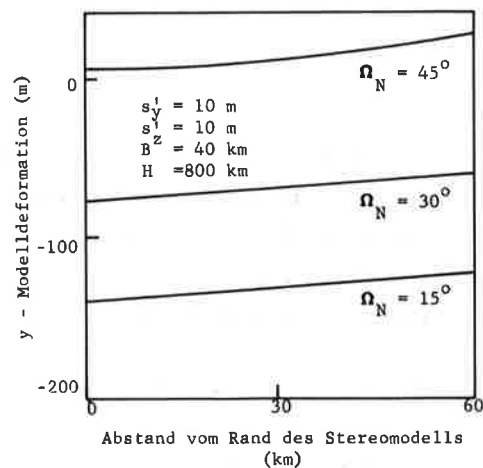


Figur 8.3: Deformation eines rechtwinkligen Gitters (a) durch Positionsfehler in Längsrichtung (Δs_x) (b); durch Positionsfehler in Querrichtung (c), (d).

Das in der Folge beschriebene Beispiel enthält 20 im Computer simulierte Radarstreifen von 600 km Länge, deren Deformationen Δx , Δy nur Funktionen von x , nicht aber von y sind. Dabei werden Fourier-Reihen verwendet, um Δx und Δy zu simulieren. Die Amplitude der periodischen Funktionen ist in der Größenordnung von einigen Kilometern, die Periode von etwa 400 bis 600 km. Ein Beispiel für die simulierten Deformationen ist in Figur 8.4 dargestellt.



Figur 8.4: Beispiel einer computergenerierten Fehlerkurve für die Sensorposition entlang und quer zur Flugrichtung.



Figur 8.5: Beispiele der y-Modelldeformation eines selbstseitigen Stereomodells wegen trendartiger Fehler der Satellitenposition

Diese Annahmen gelten nur für ursprüngliche Radaraufnahmen von flachem Gelände in Grunddistanzdarstellung (Leberl, 1975d). Da sich jedoch für Satellitenradar das Verhältnis y/B wegen der großen y -Werte innerhalb eines Stereomodells nur wenig ändert (siehe Figur 8.5), kann erwartet werden, daß die erhaltenen Ergebnisse auch für Satellitenstereoradar im wesentlichen gültig sind.

8.2.4 Numerische Methodenvergleich - Ergebnisse

Für die in den Abschnitten 8.2.1 und 8.2.2 angegebenen Verfahren wurden Computerprogramme in Fortran V der Univac 1108 des JPL erstellt.¹⁾ Diese sind die Grundlage des im folgenden beschriebenen Methodenvergleichs. Der Vergleich der verschiedenen Methoden der Radarblockausgleichung kann mittels der Unterschiede zwischen den ausgeglichenen radargrammetrischen Punkten und Vergleichspunkten erfolgen. Die mittleren Unterschiede für alle untersuchten Methoden sind in den Tabellen 8.1. und 8.2 enthalten. Die Ausgleichungen wurden unter Verwendung von jeweils 8-10 Verknüpfungspunkten zwischen benachbarten Stereomodellen ausgeführt. Zehn Paßpunkte waren entlang des Randes des $600 \times 600 \text{ km}^2$ -Blocks angeordnet (Figur 8.6).

Die Tabellen 8.1 und 8.2 enthalten die Werte für die mittleren Restklaffungen zwischen überlappenden Radarmodellen und die Punktfehler $\sigma_{\Delta p}$ in Vergleichspunkten ($\sigma_{\Delta p} = (\sigma_{\Delta p_x}^2 + \sigma_{\Delta p_y}^2)^{1/2}$). Die Radarstreifen wurden für die ANBLOCK-Methode nach Gl. (8.5) in maximal 4 Stücke unterteilt, und in maximal sechs Stücke für die simultane Berechnung der linearen Splinepolynome nach Gl. (8.3). Eine Unterteilung in mehr Stücke konnte wegen der beschränkten Kapazität des Kernspeichers im Computer (64 K des Univac 1108) nicht erfolgen, sodaß die Leistungsfähigkeit der Simultanmethoden nicht voll ausgenützt werden konnte.

Bei der sequentiellen Methode ist wegen der geringen Anzahl von simultan zu lösenden Unbekannten die Anzahl von Verknüpfungsstellen praktisch unbeschränkt. Es treten daher keine numerischen Schwierigkeiten der Berechnung auf.

Aus Tabelle 8.1 und 8.2 ergibt sich, daß die sequentielle Methode mit verknüpften Polynomen in den beschriebenen Anwendungsfällen eine höhere Genauigkeit besitzt als die simultanen Methoden. Die zunehmende Unterteilung der Radarstreifen hat nicht in allen Fällen eine entsprechende Verbesserung der Ergebnisse der simultanen Methoden zur Folge. Es besteht daher die Frage, ob überhaupt eine Unterteilung der Radarstreifen in mehr Stücke die erwartete Verbesserung der Genauigkeit erbringt und wenn ja, in wieviel Teilstücke unterteilt werden soll.

Tabelle 8.1: Mittlere Unterschiede in mm (Maßstab 1:400 000) zwischen ausgeglichenen radargrammetrischen und "wahren" Vergleichspunkten; und mittlere Klaffungen in Verknüpfungspunkten.

	Sequentiell		Simultan		
	Ohne Spline	Mit Spline Gl.(8.7)	ANBLOCK Gl.(8.5)	Affin Gl.(8.6)	Spline Gl.(8.3)
Verknüpfungspunkte	2.10	0.16	1.06	1.03	0.34
Vergleichspunkte	1.90	1.02	1.51	1.59	1.23

- Jeder Radarstreifen in 4 Stücke unterteilt
- Jeder Radarstreifen in 6 Stücke unterteilt
- Veränderte Paßpunktverteilung

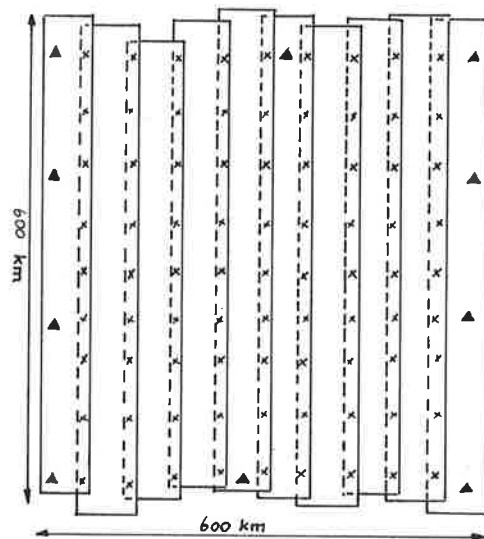
¹⁾ Kopien der Computerprogramme (ohne Dokumentation) werden vom Autor auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Tabelle 8.2: Mittlere Klaffungen in Verknüpfungspunkten (mm im Maßstab 1:400 000) und mittl. Unterschiede in Vergleichspunkten. (●) bezeichnet Fälle mit veränderter Paßpunktverteilung. Werte in Klammern aus Perimeterkontrolle.

Unterteilung in Bildstücke	Verknüpfungspunkte			Vergleichspunkte		
	ANBLOCK Gl.(8.5)	Affin Gl.(8.6)	Spline Gl.(8.3)	ANBLOCK Gl.(8.5)	Affin Gl.(8.6)	Spline Gl.(8.3)
1	2.10	2.09	2.09	1.90	2.63	2.74
2	1.70	1.66	1.71	1.69	1.97	2.01
3	1.38	1.37	(1.17) 1.25●	1.48	1.65	(32.40) 2.15●
4	1.06	1.03	0.77●	1.51	1.59	1.33●

Diese Frage kann auf Grund der vorhandenen Daten nicht endgültig beantwortet werden.

Solange die Verformungen Δx , Δy des Radarbild- oder Modellstreifens nur Funktionen von x sind, können diese durch sequentielle Methode mittels verknüpfter Polynome eliminiert werden, wenn eine Anzahl von Verknüpfungs- und Paßpunkten vorliegt. Im Falle von Verformungen Δx , Δy , die auch von y abhängen und mit Fehlern rein zufälliger Art (Meßfehler) etc. behaftet sind, gilt dies jedoch nicht.



Figur 8.6: Schema des simulierten Radarblocks und der Punktverteilung

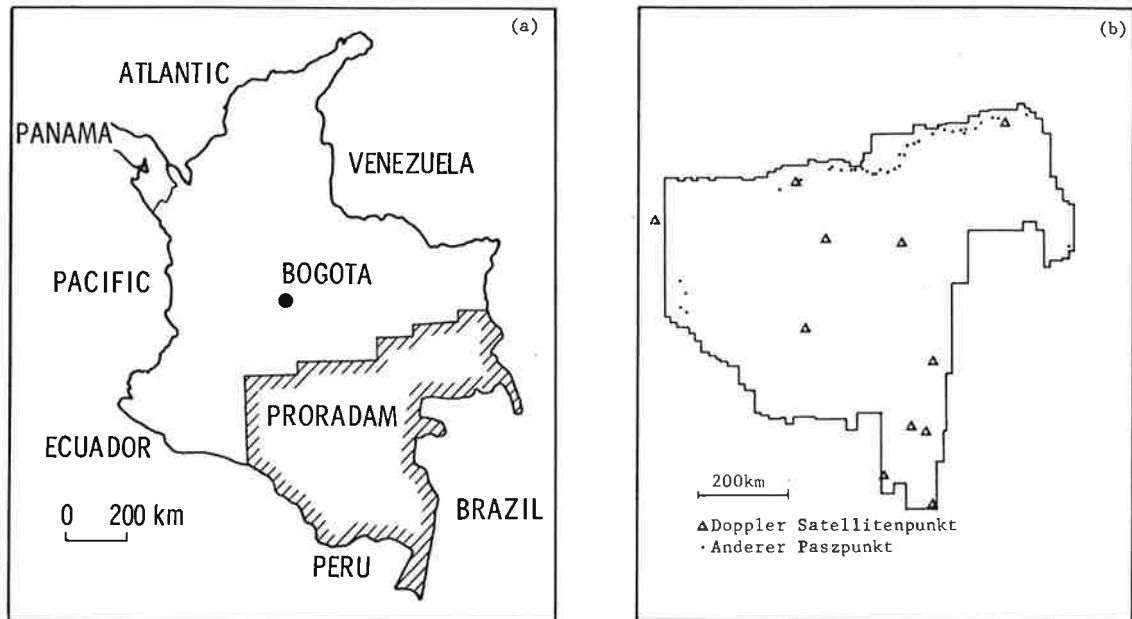
Die ANBLOCK-Methoden nach Gl. (8.5) oder mit (8.6) beschreiben die tatsächlichen Verhältnisse nur näherungsweise, stückweise Polynome stellen eine bessere Annäherung dar. Bei photogrammetrischen Streifen gilt das Gegenteil.

Es ist daher nicht überraschend, daß stückweise Polynome bessere Ergebnisse als die Gleichungen (8.5) und (8.6) erbringen. Welches ist aber die Ursache für die höhere Genauigkeit der sequentiellen Polynomausgleichung gegenüber der simultanen? Diese liegt wahrscheinlich in der Instabilität der simultanen Methode, ihre Abhängigkeit von der Verteilung der Verknüpfungs- und Paßpunkte. Diese erhaltenen Ergebnisse werden auch durch eine photogrammetrische Streifenblockausgleichung von Schut^x (1970) bestätigt.

8.3. PLANIMETRISCHE AUSGLEICHUNG DES RADARBLOCKS PRORADAM

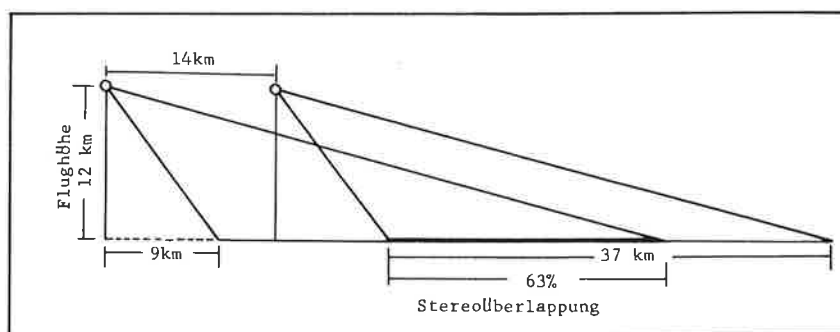
8.3.1 Einleitung

Die Radarkartierung des kolumbianischen Anteils am Amazonas-Becken (Projecto Radargrametrico del Amazonas - PRORADAM) war das erste kommerzielle Projekt einer Bildplanerstellung, das sich auf eine radargrammetrische Blockausgleichung stützte (Leberl, 1975c). Andere Kartierungen mit Flugzeugradar verwendeten transversale Verbindungsstreifen oder eine kontinuierliche Bestimmung der Sensorposition mit SHORAN (v.Roessel und de Godoy, 1974).



Figur 8.7: Projektgebiet PRORADAM (a) innerhalb Kolumbiens; (b) Form des Gebietes und Paßpunktverteilung -- etwa 100 Bildstreifen formen den Radarblock

In Kolumbien wurde keine SHORAN-Vermessung vorgesehen, weil im Projektgebiet, das sich über etwa $360\,000\text{ km}^2$ erstreckte, 44 sehr ungleich verteilte Paßpunkte vorhanden waren (Fig.8.7). Es war daher naheliegend, eine radargrammetrische Blockausgleichung auszuführen.



Figur 8.8: Flugkonfiguration für PRORADAM (Goodyear GEMS-1000)

Die Fluglinien verliefen Nord-Süd, die Abbildung erfolgte stets vom Gebiet westlich der Fluglinie. Figur 8.8 beschreibt die Flugkonfiguration. Zusätzlich zu den Nord-Süd-Linien wurden auch drei transversale Ost-West Verbindungslinien im Norden, am Äquator und im Süden hergestellt. Der Bildmaßstab betrug 1:400 000. Die Bildstreifen bedecken einen Geländestreifen von 1000 km und sind bis 2,50 m lang.

8.3.2 Messungen und Rechenmethoden

Die ursprünglichen Radarbildstreifen überlappen einander mit 60 %, sodaß auch schmale Gebiete mit dreifacher Überlappung bestehen. In diesen Gebieten wurden durch kolumbianisches Personal entlang der Radarstreifen Verknüpfungspunkte im Abstand von etwa 20 cm stereoskopisch mit einer Nadel freihändig markiert und ihre Bildkoordinaten gemessen. Zusätzlich wurden die Bildkoordinaten aller Paßpunkte bestimmt. Die Genauigkeit der Punktübertragung und Messung betrug etwa ± 0.33 mm, was ± 130 m im Gelände entspricht.

Da das Projektgebiet nahezu eben ist, wurde keine Stereoauswertung vorgesehen. Die in Grunddistanzdarstellung vorgegebenen Radarbilder wurden direkt als Grundeinheiten einer planimetrischen Blockausgleichung verwendet. Systematische radargrammetrische Streifenfehler lagen nicht vor. Systematische Projektionsverzerrungen konnten wegen der Äquatornähe des Aufnahmegebietes vernachlässigt werden.

Die gemessenen Bildkoordinaten y_g konnten daher direkt für die sequentielle Bildung eines Radarblocks nach der im Unterabschnitt 8.2.2 beschriebenen Methode verwendet werden. Die externe Blockausgleichung wurde mittels linearer Prädiktion ausgeführt.

8.3.3 Ergebnisse

Tabelle 8.3 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Blockausgleichung. Die Restklaffungen im Radarblock betragen im Bild etwa ± 0.9 mm (in der Natur etwa ± 360 m). Sie werden durch Messungsgenauigkeiten und die Nichtbeachtung von Abhängigkeiten der Δx -, Δy -Deformationen von der y -Koordinate verursacht.

Die lineare, konforme Transformation des Radarblocks in das Paßpunktnetz ergibt Koordinatendifferenzen von etwa ± 5.5 mm (dies entspricht ± 2.2 km in Gelände). Die externe Ausgleichung muß diese Fehler in den Paßpunkten eliminieren und Korrekturen für die radargrammetrischen Punkte interpolieren. Unter Verwendung der linearen Prädiktion ergibt sich, daß die Diskrepanzen in den Paßpunkten eine unregelmäßige Komponente (Störfunktion) von ± 0.9 mm enthalten, die im Prädiktionsvorgang gefiltert war. Diese unregelmäßige Komponente kann durch Fehler in der Paßpunktidentifizierung und Messung verursacht sein.

Die Genauigkeit der ausgeglichenen Radarkoordinaten konnte durch unabhängige LANDSAT-1 Aufnahmen abgeschätzt werden. Tabelle 8.4 zeigt, daß die mittleren Abweichungen zwischen LANDSAT und Radar etwa ± 1.5 mm oder ± 600 m in der Natur betragen. Die Identifizierung von homologen Punkten in den Radar- und LANDSAT-Aufnahmen ist fehlerhaft; jedoch kann keine verlässliche Fehlerschätzung gegeben werden. Wird für LANDSAT-Punkte ein Fehler von ± 400 m angenommen, so kann geschlossen werden, daß die Fehler der Radarpunkte von vergleichbarer Größe sind. Aus dem Vergleich mit LANDSAT-Aufnahmen folgt, daß die radargrammetrische Genauigkeit den gefilterten unkorrelierten Komponenten der Diskrepanzen in den Paßpunkten entspricht.

	Klaffungen	Blockdeformation (mm im	Mittlere Korrekturen Bild)	Gefilterte Störfunktion
Nord	0.65	5.15	4.08	0.59
Ost	0.68	4.75	3.65	0.61
Punkt	0.75	7.01	5.47	0.85

Tabelle 8.3: Ergebnisse der Ausgleichung des Radarblocks PRORADAM -- Werte in mm im Bild (Maßstab 1:400 000)

8.4. PLANIMETRISCHE AUSGLEICHUNG DES RADARBLOCKS WEST-VIRGINIA

8.4.1 Projektparameter, Messungen, Rechenmethoden

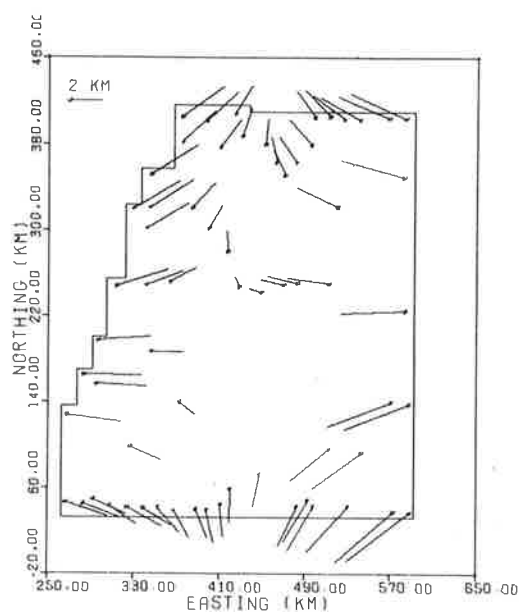
Flugzeugradaraufnahmen eines gut kartierten Gebietes von etwa 90 000 km² in und um den U.S. Bundesstaat W.-Virginia erlaubten die eingehende Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Paßpunktdichte, Methode der radargrammetrischen Punktbestimmung und Genauigkeit (Leberl, Jensen u.a. 1976). Dabei wurde eine Radarblockkonfiguration ähnlich jener in PRORADAM benützt (siehe Figur 8.7). Allerdings war das Gesichtsfeld für die Aufnahme nur halb so groß wie für PRORADAM, sodaß eine seitliche Überlappung von nur 20 % (statt 60 %) erfolgte.

Die Paßpunkte und Verknüpfungspunkte im Überlappungsgebiet wurden wesentlich genauer als in PRORADAM identifiziert, markiert (Wild-PUG) und gemessen; ihr Fehler betrug etwa ± 0.06 mm oder ± 25 m im Gelände. Die Verarbeitung der Daten erfolgte nach der für PRORADAM verwendeten Methode (s. Unterabschnitt 8.2.2)

8.4.2 Ergebnisse

Nach der linearen konformen Transformation des sequentiell gebildeten Radarblocks in das Paßpunktnetz verbleiben die in Figur 8.9 gezeigten Diskrepanzen. Tabelle 8.5 beschreibt die Genauigkeit nach der externen sequentiellen planimetrischen Ausgleichung des Radarbildverbandes. Vor der externen Ausgleichung zeigte der Block Deformationen von etwa ± 9 mm (± 3.5 km). Laut Tabelle 8.6 betragen Restklaffungen nur etwa ± 0.12 mm (± 50 m). Nach der externen Ausgleichung ergaben sich Fehler von etwa ± 0.37 mm (± 150 m).

Tabelle 8.5 zeigt die Abhängigkeit der Genauigkeit von der Dichte und Anordnung von Paßpunkten. Daraus kann geschlossen werden, daß eine regelmäßige Verteilung der Paßpunkte günstiger ist als die Anordnung entlang des Perimeters (vergleiche Fälle (d), (g), (i) mit Fällen (f), (h), (c)), und daß mit wachsender Paßpunktdichte die Genauigkeit zunimmt (Fälle (b), (i), (g), (d)). Die Blockdeformationen sind systematisch und können mit nur 4 Paßpunkten schon auf etwa ± 450 m reduziert werden.



Figur 8.9: Unterschiede zwischen Paßpunkt und Radarkoordinaten nach interner Ausgleichung und linearer konformer Transformation des Blocks in das Paßpunktnetz.

	----- Mittlere Unterschiede (mm) -----			Anzahl der Vergleichspunkte
	Nord	Ost	Punkt	
1	1.06	0.51	1.18	9
2	0.80	0.69	1.06	10
3	1.32	1.26	1.82	7
4	1.08	0.71	1.29	18
5	1.15	1.35	1.77	22
Total	1.09	0.96	1.45	66

Tabelle 8.4: Mittlere Unterschiede zwischen radargrammetrischen Koordinaten und LANDSAT-Koordinaten im Projekt PRORADAM -- Werte in mm im Bild (Maßstab 1:400 000)

Die Fehler in y sind wegen der Verschiebung des topographischen Reliefs quer zur Flugrichtung (y) stets größer als x-Fehler. Die mittleren Geländehöhenunterschiede von etwa ± 150 m haben y-Fehler von etwa ± 90 m zur Folge, was den Δy -Restfehlern der externen Blockausgleichung entspricht.

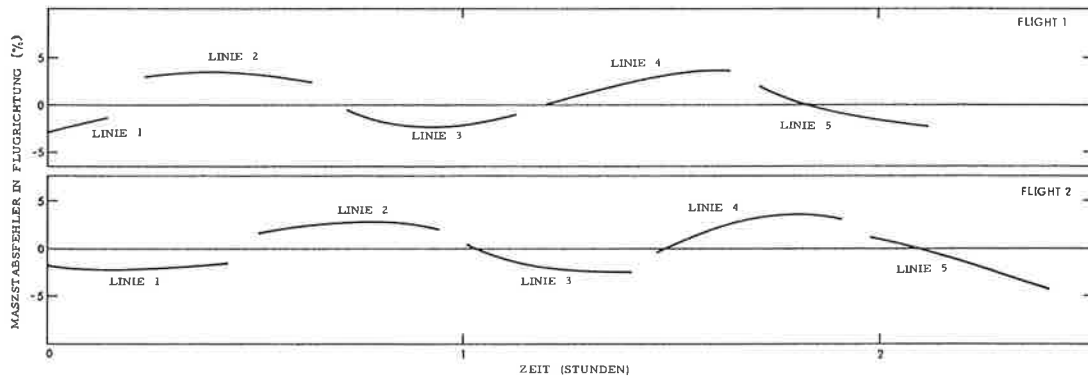
Die Daten erlauben auch die Herstellung des Radarbildplanes mit Hilfe von transversalen Verbindungslinien, die in das Paßpunktnetz transformiert werden. Es zeigt sich, daß diese Methode ungenauere Ergebnisse als die sequentielle Blockformung und darauf folgende externe Ausgleichung liefert. Die Ursache hierfür ist die schwierige und ungenaue Punktübertragung für rechtwinkelig ange-

ordnete Radarbilder (etwa ± 200 m im Gegensatz zu ± 25 m für parallele Linien).

a X 1.59 Y 2.28	b X 0.24 Y 0.37	c X 0.14 Y 0.25	d X 0.10 Y 0.13
e X 0.18 Y 0.18	f X 0.17 Y 0.30	g X 0.10 Y 0.14	h X 0.18 Y 0.23
i X 0.24 Y 0.22	j X 0.55 Y 4.52	k X 0.30 Y 0.36	l X 0.50 (0.70) Y 0.33 (1.67)

Tabelle 8.5: Ergebnisse der Radarblockausgleichung W.VIRGINIA unter Verwendung verschiedener Paßpunktanordnungen, Werte in km.

Die Δx - und Δy -Fehler der individuellen Radarstreifen werden durch die Berechnung bestimmt. Trägt man diese Fehler als Funktion der Flugzeit auf, so ergibt sich Fig. 8.10. Die Δx -Deformationen sind wellenförmig, mit einer Periode von etwas mehr als 1 Stunde. Dies könnte durch die Schuler-Oszillation der Flugzeugträgheitsnavigation erklärt werden, deren Fehler eine Periode von 84 Minuten und eine mit der Zeit wachsende Amplitude besitzen.



Figur 8.10: Maßstabsfehler der Radarstreifen des Blocks W.VIRGINIA, aufgetragen als Zeitfunktion -- Fehler haben Schuler-Periode.

Auf Grund der radargrammetrischen Festpunkte wurden Radarbildpläne im Maßstab 1:200 000 angefertigt. In Vergleichspunkten sowie Festpunkten, deren Koordinaten aus den Mosaiken und vorgegebenen Karten abgegriffen wurden, ergaben sich die in Tabelle 8.6 enthaltenen mittleren Restfehler. Daraus folgt, daß die Genauigkeit der Bildpläne etwa ± 200 m beträgt. Da dieser Wert für Vergleichs- wie auch Festpunkte gilt, muß angenommen werden, daß durch die Mosaikherstellung, den Aufdruck des geographischen Gitters und die Vervielfältigung Fehler entstehen, die größer als die Fehler der radargrammetrisch bestimmten Punkte sind.

Es kann daher angenommen werden, daß die Genauigkeit der radargrammetrischen Blockausgleichung für die Bildplanherstellung im Maßstab 1:200 000 vollkommen ausreicht.

	Mittlere Fehler (m)			Anzahl Daten- punkte
	Nord	Ost	Punkt	
Mittl. Restklaffungen (Verknüpfungspkte)	37	29	47	370
Mittl. Interpolations- fehler (ext. Ausgl.) [•]	81	137	159	60
Mittl. Mosaikfehler in Paßpunkten	147	183	243	6
Mittl. Mosaikfehler in Vergleichspunkten	178	232	292	20

Tabelle 8.6: Übersicht über die Ergebnisse der Blockausgleichung W.-VIRGINIA. Werte in Metern. (•) Interpolationsfehler, wenn jeder Paßpunkt als Vergleichspunkt verwendet wird, also nicht an der Interpolation einer Korrektur im Paßpunkt selbst teilnimmt.

8.5. DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG

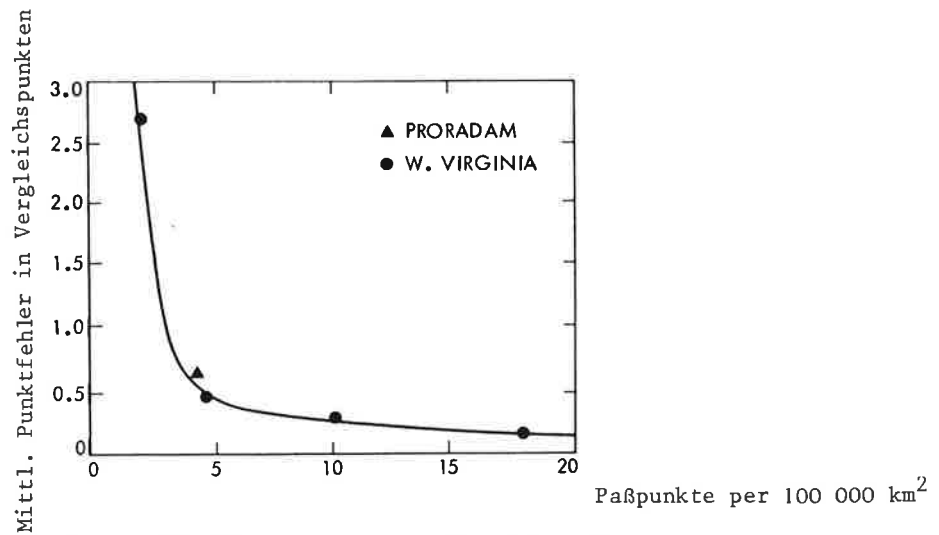
Als wesentlicher Schluß der im vorigen beschriebenen numerischen Ergebnisse zur planimetrischen Ausgleichung von Radarstreifen folgt, daß die radargrammetrische Kartiergenauigkeit bisher wesentlich geringer als das Auflösungsvermögen (von ± 10 m bis ± 25 m) des Radarsensors ist. Dies widerspricht den Erfahrungen in der Photogrammetrie, wo die geometrische Genauigkeit meist höher ist als das Auflösungsvermögen. Die Ursache hierfür liegt nicht allein in der Verwendung von genäherten Blockausgleichungsverfahren und Fehlerannahmen, denn Analysen komplexer mathematischer Modelle (Kapitel 4 und 6; DBA-Systems, 1974) zeigen, daß auch in diesem Falle die geometrischen Kartierfehler ein Vielfaches des Auflösungsvermögens betragen.

Ursachen für die ungenaue geometrische Abbildung durch den Radarsensor sind (a) zeitabhängige Fehlereinflüsse bei der Radarbildformung (Sensorpositionsfehler, elektronische und mechanische Imperfektionen usw.); (b) der verhältnismäßig geringe Aufwand, der bisher für die Beachtung geometrischer Forderungen bei der Herstellung von Radarbildern eingesetzt wurde; und (c) die notwendigerweise meist extrem ungünstigen geometrischen Konfigurationen für Stereoradar.

Beim Satellitenradar können für (a) und (b) durch gute Kalibrierung und Sorgfalt bei der Bildherstellung gegenüber den bisherigen Flugzeugradarsystemen Verbesserungen erreicht werden, und die zeitabhängigen Fehler der Sensorposition sind im allgemeinen besser bestimmt als im Flugzeug. Für (c) kann auch mittels Satellitenradar keine Verbesserung erwartet werden, da auch hier bei geometrisch günstigen Anordnungen die visuelle Wahrnehmung der Stereoparallaxen meist unmöglich wird (ausgenommen in flachem Gelände, wo keine Parallaxen auftreten).

Zusätzlich zu diesen allgemeinen Schlußfolgerungen über die Radarkartiergenauigkeit folgen Hinweise für den Vergleich der Blockausgleichungsmethoden für unabhängige Radarstreifen, welche entweder als ursprüngliche Aufnahmen eines flachen Geländes, oder als Lagekomponenten von Stereomodellen aufzufassen sind. Die Berechnung der Streifendeformationen Δx , Δy mittels verknüpfter Polynome ergab, daß die sequentiellen Methoden nicht immer den Simultan-Methoden unterlegen sind. Diese Schlußfolgerung gilt streng nur für die in diesem Kapitel benützten Annahmen für die Radar-konfiguration und Verfahren für die Berechnung. Genähert kann aber auch nach von Schut^x (1970) in der Photogrammetrie gewonnenen Erfahrungen angenommen werden, daß dieses Ergebnis allgemeine

Gültigkeit besitzt. Außerdem ergab sich, daß die Genauigkeit der sequentiellen Ausgleichsmethoden für die Bildplanherstellung hinreichend ist.



Figur 8.11: Zusammenhang zwischen Paßpunktdichte und Kartiergenauigkeit mittels externer Radarblockausgleichung

Für die externe Ausgleichung des Radarblocks ist eine regelmäßige Verteilung der Paßpunkte vorteilhaft. Aus Berechnungen für die Radarblöcke PRORADAM und W.-VIRGINIA ergibt sich der in Figur 8.11 dargestellte Zusammenhang zwischen Paßpunktdichte und Kartiergenauigkeit. (Diese Abhängigkeit ist im wesentlichen durch den Block W.-VIRGINIA bestimmt, bei dem eine verlässliche Schätzung für die Genauigkeit erhalten wurde). Die Paßpunktdichte wird durch die Anzahl der Paßpunkte je Flächeneinheit definiert. Der aus PRORADAM folgende Genauigkeitswert ist weniger signifikant als der im W.-VIRGINIA Block ermittelte, denn für PRORADAM lagen von den 44 Paßpunkten etwa 32 nahezu linear angeordnet auf einer Seite des Blocks und war die Meßgenauigkeit wesentlich geringer als für W.-VIRGINIA.

Für das Satellitenradar bedeuten die guten Ergebnisse aus der sequentiellen Radarausgleichung, daß ausgedehnte Gebiete mittels einfacher Methoden rasch kartiert werden können und aufwendige Verfahren nicht notwendig sind (vergleiche den Aufwand für räumliche Ausgleichung mittels ursprünglicher Bildstreifen, Abschnitt 7.4). Dies kann von Bedeutung für die Bildplanerstellung sein, wenn diese besonders rasch und zu verschiedenen Zeitpunkten wiederholt werden muß, ohne höchste Genauigkeit anzustreben (Beispiel: Kartierung des Meereseises).

9. RADARGRAMMETRISCHE KARTIERUNG VON MEEREISEIS

9.1. EINLEITUNG

Satellitenradarbilder können auch für die Kartierung des polaren Meereseises verwendet werden. Diese Anwendung ist im Satellitenprojekt SEASAT vorgesehen, das (von der Raumfahrtbehörde der Vereinigten Staaten) vorbereitet wird. Im Rahmen dieser Vorbereitungen werden Meereseisvermessungen mittels Flugzeugradar an der Küste Alaskas und im arktischen Ozean durchgeführt (Leberl, Farr u.a. 1976). Ergebnisse dieser Messungen werden im folgenden beschrieben.

Die Kartierung des polaren Meereseises dient verschiedenen Anwendungen: (a) aus der Messung der Eistrift und ihrer partiellen Differentiale können Parameter für meeresglaziologische Modelle zur Beschreibung und Erklärung der Phänomene der polaren Eiskappen berechnet werden; (b) die Schifffahrt in polaren Meeren kann durch die Bereitstellung aktueller Karten über die Verteilung, Art und Dynamik des Eises verbessert werden; (c) die durch Eis bedeckten Wasserflächen beeinflussen die darüberliegenden Luftmassen anders als das offene Wasser - daher ist die Kenntnis der Eisverteilung von Bedeutung für die Meteorologie.

Wegen der langen Polarnächte und der häufigen Bedeckung mit Wolken und Nebel sind Radarsensoren geeignete Mittel zur Abbildung des Meereseises. Das Auflösungsvermögen sowohl des Flugzeug- wie auch des Satellitenradar ist für diese Aufgabe ausreichend. Qualitätsunterschiede zwischen der Abbildung durch Photographie und Radarstrahlung ist für Eis weit geringer als für Land. Da die Dynamik des Eises eine regelmäßige, wiederholte Kartierung erfordert, scheint die Radarabbildung mit einem Satellitensensor am besten geeignet zu sein.

Im Rahmen des Arctic Ice Dynamics Joint Experiments (AIDJEX) werden seit 1975 durch das Jet Propulsion Laboratory Flugzeugradaraufnahmen des Eises im arktischen Ozean hergestellt und analysiert (Figur 9.1). Der Zweck dieses Unternehmens ist es, Erfahrungen für die ab 1978 verfügbar werdenden Satellitenradaraufnahmen zu gewinnen. Zu diesem Zweck arbeitet das Radarsystem mit der für SEASAT vorgesehenen Wellenlänge von 25 cm. Die Abbildung erfolgt aber nicht mit den für Flugzeugradar üblichen, sondern mit den für Satellitenradar notwendigen kleinen Erhebungswinkeln der Visurlinie. Außerdem besitzt das System eine Auflösung, welche jener für SEASAT ($25 \times 25 \text{ m}^2$) entspricht. Somit wird mit dem Flugzeugradar ein Satellitenradar simuliert (Figur 9.2).

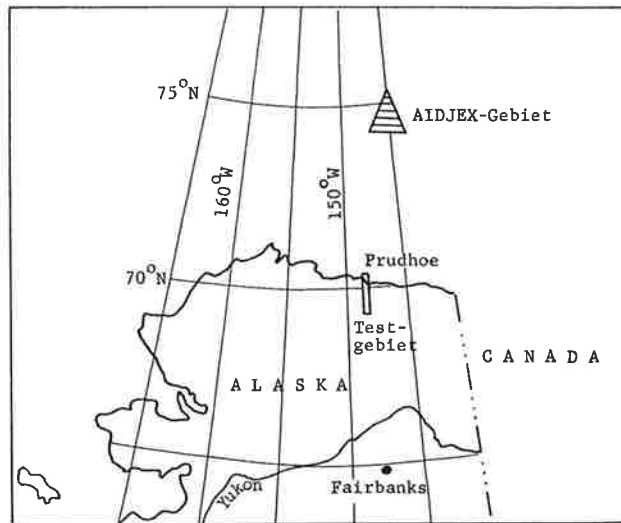
Die Bestimmung der Verteilung und Dynamik individueller Eisschollen in einer kurzen Zeitspanne von wenigen Tagen wird als "Mikroanalyse" bezeichnet. Die "Mesoanalyse" betrifft hingegen die Veränderungen der Eisdecke als elastische Schicht, die Makroanalyse die globalen Veränderungen der gesamten polaren Eiskappe. Die hier beschriebene Demonstration der radargrammetrischen Kartierung von Meereseis betrifft die Mikroanalyse, welche die höchste Anforderung an die Kartiergenauigkeit stellt.

Im folgenden wird die Methode der Radar-Eiskartierung beschrieben, die Genauigkeit der Mikroanalyse ermittelt, und das Datenmaterial der AIDJEX-Missionen sowie die Ergebnisse der radargrammetrischen Eiskartierung beschrieben.

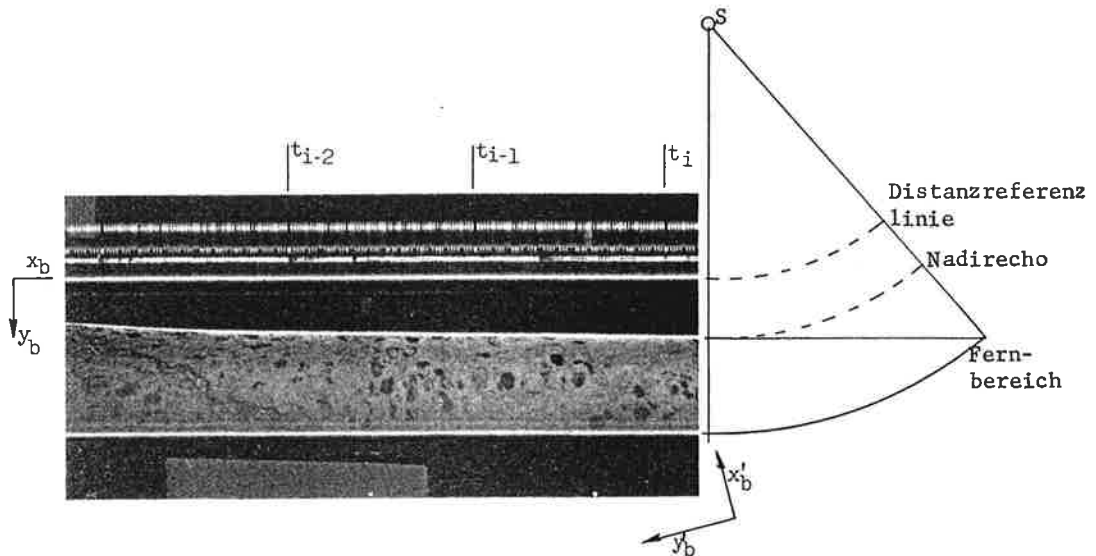
9.2. METHODE DER EISKARTIERUNG

Die Algorithmen, welche im Abschnitt 3.5 für die Einzelbildauswertung und im Kapitel 6 zur Apollo 17-ALSE Mondkartierung angewandt werden, können auch verwendet werden, um die geozentrischen

Koordinaten von Punkten des polaren Meereseises aus Radareinzelaufnahmen zu bestimmen. Es bestehen jedoch zwei besondere Gegebenheiten: (a) die Eisdecke zeigt kein signifikantes Relief; somit kann das Bild des Nadirs dazu dienen, entweder die Flughöhe zu bestimmen oder aber die innere Orientierung des Sensors zu kalibrieren; (b) die Sensorposition wird mit großer Häufigkeit gemessen; eine Glättung der zufälligen Fehler der Messungen mittels eines Tiefpaßfilters ist daher notwendig.



Figur 9.1: Projektgebiet AIDJEX (Arctic Ice Dynamics Joint Experiment) im arktischen Ozean und Testgebiet Prudhoe für radargrammetrische Kalibrierung.



Figur 9.2: Aufnahmendisposition für das JPL-L-Band Seitwärtsradarsystem, das für AIDJEX Aufnahmen verwendet wurde. Aufnahme aus der Nähe von Prudhoe, Alaska.

9.2.1 Schrägdistanz r und Aufnahmezeitpunkt t

Die Eiskartierung beginnt mit der Messung von Koordinaten x'_b , y'_b in einem Komparator, oder durch Abzählen der Zeilen und Probennummern eines digitalisierten Bildes (vgl. Fig.3.26). Zusätzlich zu den Koordinaten der Bildpunkte p werden auch Zeitmarken t_i , weiters Punkte entlang der Distanzreferenzlinie und entlang der Linie der Nadirechos gemessen (Figur 9.2). Ebenso wie für die ALSE-Mondaufnahmen wird erst eine Distanzreferenzlinie errechnet und dann verwendet, um die x'_b ,

y'_b -Koordinaten mittels Gl. 6.3 in ein rechtwinkeliges Bildkoordinatensystem x_b, y_b zu transformieren. Daraus ergeben sich die Aufnahmezeitpunkte t und Schrägdistanzen r mittels Gl. (3.1, 3.2), die hier zur einfacheren Referenz nochmals angeschrieben werden:

$$t = t_i + \frac{t_{i+1} - t_i}{x_{i-1} - x_i} (x - x_i) \quad (3.1)$$

$$r = (y_b c_r + t_r) c_o / 2 = (y_b + c) f \quad (3.2)$$

Die Parameter c und f der inneren Orientierung müssen mit großer Genauigkeit vorgegeben sein. Da die lotrechte Distanz r_n zum Nadirpunkt zur Zeit t_n gleich groß sein muß wie die Altimetermessung h_n , ist der Widerspruch Δ_n ein Maß für die Fehler $\Delta h_n, \Delta c$ und Δf von h_n, c und f . Durch Differenzierung der Gl. (3.2) folgt:

$$\Delta_n = \Delta r_n - \Delta h_n = (y_{bn} + c) \Delta f + f \Delta c + f \Delta y_{bn} - \Delta h_n \quad (9.1)$$

Die Fehler $\Delta c, \Delta y_{bn}$ und Δh können nicht voneinander getrennt werden, weil sie konstante Koeffizienten besitzen. Ändert sich die Höhe über dem Eis, so ändert sich auch y_{bn} . Δf kann mittels der Beobachtungen für mehrere Nadirpunkte mit verschiedener Höhe h_n ermittelt werden.

Für AIDJEX-Radaraufnahmen waren die Konstanten c und f nicht sehr genau bekannt. Die Distanzreferenzlinie war nur undeutlich definiert und der Maßstabsfaktor f nicht kalibriert. Mit der Annahme, daß $\Delta y_{bn}, \Delta h_n$ Zufallsvariable mit dem Mittel Null sind, kann daher Gl. (9.1) zur Feld-Kalibrierung von c und f verwendet werden. Hiefür wurden Aufnahmen mit verschiedenen Flughöhen herangezogen. Für sehr genaue Werte c und f könnte Gl. (9.1) für die Ermittlung des Fehlers von h_n verwendet werden.

9.2.2 Filterung der Sensorpositionsdaten

Außer der Schrägdistanz r_p eines Punktes p werden die Sensorposition $\underline{s}(t_p)$ und ihre erste Ableitung, der Geschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{s}}(t_p)$ für die Bildauswertung benötigt. Die Aufzeichnung der Sensorposition $\underline{s}(t)$ kann durch Trägheitsnavigation erfolgen. Diese Daten sind aber mit trendartigen Fehlern wegen der Schuleroszillation behaftet, welche durch eine hochfrequente Störfunktion überlagert werden.

Bei der (im Kapitel 6 beschriebenen) Radarkartierung des Mondes waren Positionsdaten für den Mondsatelliten verfügbar, welche in großen Abständen aufeinander folgten und durch Filterung ursprünglicher Beobachtungen erhalten wurden. Diese Daten enthielten daher keine hochfrequente Störfunktion. Die in der arktischen Eisvermessung vorgegebenen Positionsdaten sind ungefilterte Daten von Trägheitsnavigationsmessungen. Die Ausfilterung der Störfunktion ist also wesentlich. Diese wurde durch Tiefpaßfilterung nach der Methode der gleitenden Mittelwerte ausgeführt (Yaglom, 1962). Um die gefilterte $s_x(t_o)$ -Koordinate des Sensors zur Zeit t_o zu erhalten, wird ein Polynom m -ter Ordnung in die n nächstliegenden ungefilterten Werte $s_x(t_i)$, ($i=-n/2, \dots, +n/2$) interpoliert. Der Polynomwert für t_o ist die gefilterte $s_x(t_o)$ -Koordinate.

9.2.3 Berechnung der planetozentrischen Koordinaten

Mit den Sensorpositionen $\underline{s}(t_p)$, den Geschwindigkeitsvektoren $\underline{\dot{s}}(t_p)$ und den Schrägdistanzen r_p werden nach den Gl. (3.28) bis (3.35) (Fig.3.11) die Ortsvektoren \underline{p} im planetozentrischen Koordinatensystem berechnet.

Sollen (etwa für die hier nicht behandelte Mesoanalyse der Eisdynamik) mehrere Radarstreifen zu einem Bildverband vereinigt werden, so liegt die im Unterabschnitt 7.2 behandelte Aufgabe vor.

9.2.4 Messung der Eistrift

Die Messung der Bewegungen individueller Eisschollen und anderer identifizierbarer Punkte der Eisdecke geht von der Eiskartierung zu verschiedenen Zeitpunkten $t, t+\Delta t$ aus. Die Bewegung einzelner Schollen ist durch die Lageveränderung von je zwei Punkten p_1, p_2 je Scholle vollständig bestimmt.

Die Mikroanalyse der Eisbewegungen behandelt kleine Bewegungen über kurze Zeitabstände Δt in einem begrenzten Gebiet. Hiefür ist es sicherlich zulässig, ebene x, y Koordinaten einer orthogonalen Projektion auf eine Tangentialebene einzuführen. Die Verschiebungen c_x, c_y und die Verdrehung ξ kann daher durch einfache lineare Transformation mit mindestens zwei Paßpunkten $p_i, i=1,2$ ausgeführt werden:

$$\begin{aligned} x_{pi}(t + \Delta t) &= \cos\xi \ x_{pi}(t) + \sin\xi \ y_{pi}(t) + c_x \\ y_{pi}(t + \Delta t) &= -\sin\xi \ x_{pi}(t) + \cos\xi \ y_{pi}(t) + c_y \end{aligned} \quad (9.2)$$

Sind mehr als zwei Punkte je Scholle gegeben, so führt die Ausgleichung zu einer Reduzierung der Effekte von Meß- und Identifizierungsfehlern und der Erfassung von (etwa wegen Abschmelzen des Eises möglichen) Formveränderungen der Schollen.

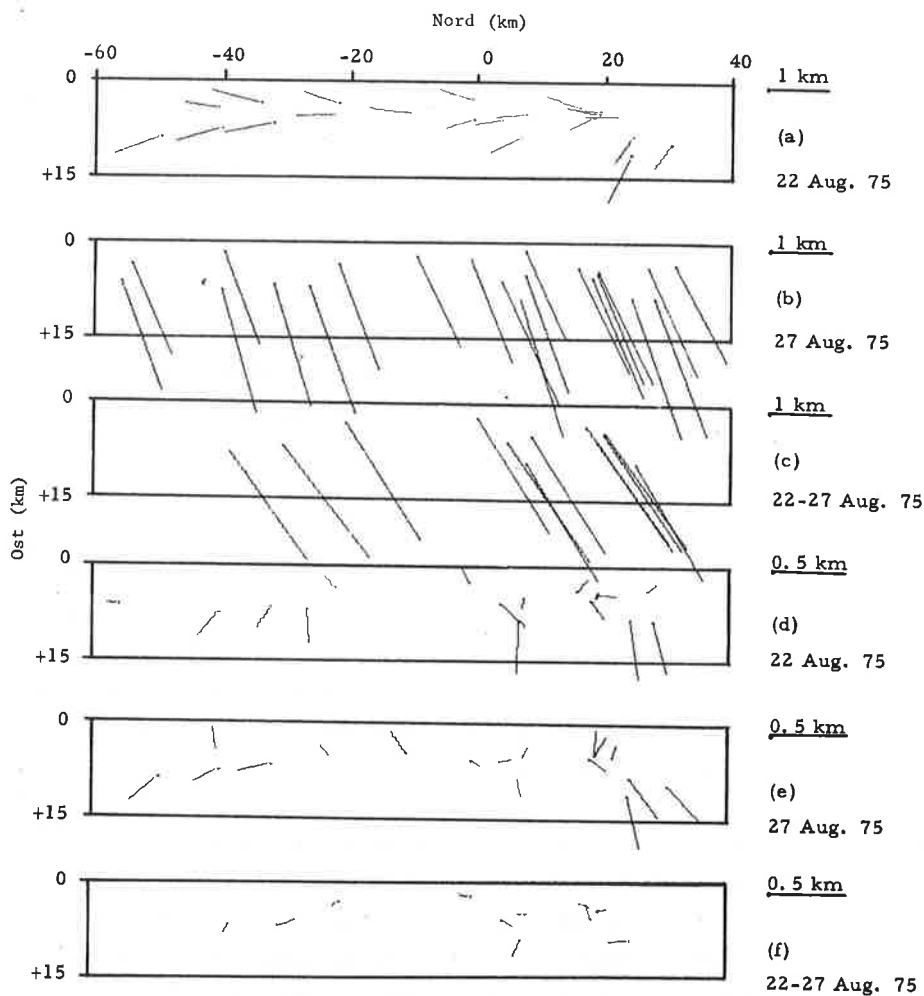
Die Mesoanalyse der Eisdynamik betrifft die Eisdecke als elastische Schicht in ausgedehnten Gebieten. Hiefür können nur Radar-Bildverbände, nicht aber Einzelbilder, verwendet werden. Die Projektion in eine Ebene kann für große Gebiete zu Verzerrungen der Eisdecke führen. Daher müssen in der Meso- und Makroanalyse der Eisdynamik besondere Koordinatensysteme verwendet werden, die sich von den in der Mikroanalyse verwendeten im allgemeinen unterscheiden.

9.3. GENAUIGKEIT DER RADARGRAMMETRISCHEN MIKROANALYSE DER EISTRIFT

Radaraufnahmen eines nicht bewegten, gut kartierten Gebietes können verwendet werden, um die Genauigkeit der Messung von Meereseisbewegungen zu ermitteln. Gut geeignet sind Radarbilder, welche entlang des Meridians $149^{\circ}15'$ westlicher Länge vor der für die Ölgewinnung interessanten Prudhoe-Region in Nordalaska aufgenommen wurden. Ein in verschiedenen Meßflügen erzeugtes Bildpaar und eine vorliegende Karte 1:250 000 der Region stehen als Basismaterial für die Analyse zur Verfügung. Es liegen also ähnliche Verhältnisse vor wie für die Untersuchung von LANDSAT-Abtastbildern durch Hibler^x u.a. (1975).

Figur 9.3 enthält die Ergebnisse der Berechnungen, die sich auf 20 Paßpunkte stützte, deren Koordinaten aus der Karte abgegriffen und in den Bildern mittels Komparator gemessen wurden. Die

Meßgenauigkeit für die Bildkoordinaten betrug $\pm 5 \mu\text{m}$ ($\pm 2.5 \text{ m}$ im Gelände), für die Kartenkoordinaten etwa $\pm 0.1 \text{ mm}$ (25 m im Gelände). Die Identifizierung homologer Details ist wesentlich weniger genau und überlagert die Meßgenauigkeit. Ihr mittlerer Fehler beträgt etwa $\pm 0.2 \text{ mm}$ im Radarbild ($\pm 100 \text{ m}$ im Gelände), weil als Details nicht scharf definierte charakteristische Rundungen in Wasserläufen oder an Ufern kleiner Seen benützt werden müssen.



Figur 9.3: Graphische Darstellung der Unterschiede zwischen radargrammetrischen und Kartenkoordinaten für Radaraufnahmen aus dem Gebiet der Prudhoe-Bay in Nord-Alaska (a), (b), (d), (e); und scheinbare Trift der Festpunkte (c), (f) aus zwei unabhängigen Radarpunktbestimmungen. (a), (b), (c) ohne Verwendung von Paßpunkten; (d), (e), (f) mit einem Paßpunkt.

Aus Figur 9.3a und 9.3b ist ersichtlich, daß die Unterschiede zwischen radargrammetrischen und Kartenkoordinaten systematisch und groß sind. Dasselbe gilt für die in Figur 9.3c dargestellte scheinbare "Trift" der Paßpunkte, die sich mit beiden Radarbildern ergibt. Die großen Fehler werden durch die Tatsache bestimmt, daß die Aufnahmen etwa 5 Stunden nach dem Start des Flugzeuges erfolgten, und daher eine Schuler-Oszillation der Navigationsgeräte vorliegen kann (siehe Kapitel 8.: Periode von 84 Minuten, Amplitude und Trift mit 0.5 bis 1 km per Stunde anwachsend).

In Figur 9.3c, d und e sind die um den Wert eines willkürlich gewählten Paßpunktes verminderten Diskrepanzen dargestellt. Daraus folgt, daß die Fehler relativer Positionen wesentlich kleiner

sind. Tabelle 9.1 bestätigt diese qualitativen Schlußfolgerungen quantitativ: Mit nur einem Paßpunkt reduzieren sich die radargrammetrischen Fehler von etwa ± 1 bis ± 4 km auf ± 0.3 km, bei Verwendung von mehreren Paßpunkten auf ± 0.1 bis ± 0.2 km.

Anzahl Paßpunkte	Karte - Radar (22.Aug.)		Karte - Radar (27.Aug.)	
	Nord (km)	Ost (km)	Nord (km)	Ost (km)
0	1.07	0.48	1.45	3.50
1	0.27	0.32	0.19	0.29
2	0.19	0.20	0.15	0.23
4	0.18	0.14	0.14	0.09

Tabelle 9.1: Mittl. Unterschiede zwischen radargrammetrischen und Kartenkoordinaten von etwa 20 Vergleichspunkten.

	Rohdaten - kein Filter		Filter- Gleiches Gewicht		Filter - Gewicht $1/d^2$	
	Nord (km)	Ost (km)	Nord (km)	Ost (km)	Nord (km)	Ost (km)
Karte - Radar 22. Aug.	0.51	0.12	0.34	0.10	0.18	0.14
Karte - Radar 27. Aug.	0.37	0.12	0.23	0.12	0.13	0.11
Scheinbare Trift (22.-27.)	0.52	0.15	0.34	0.13	0.16	0.11

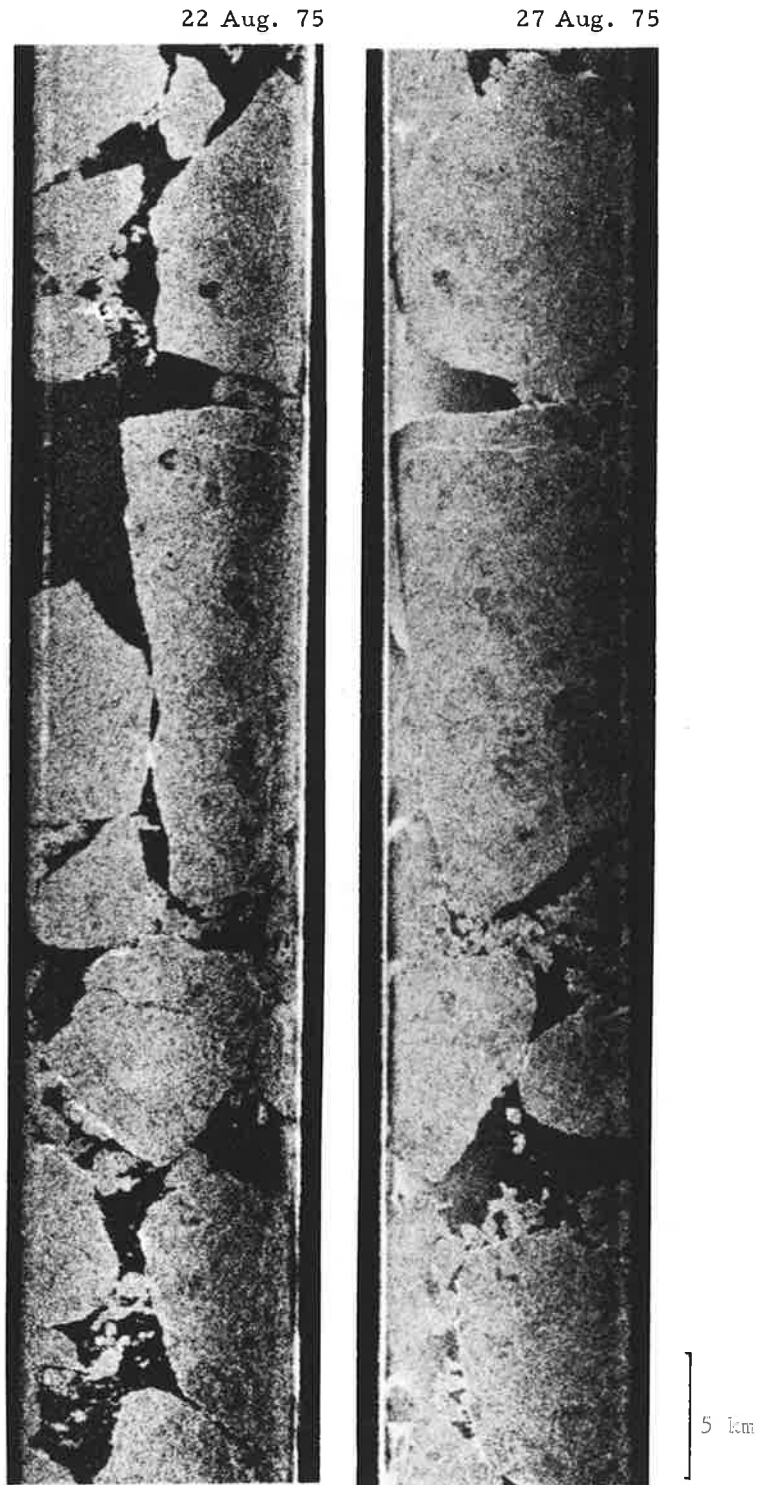
Tabelle 9.2: Mittl. Restfehler nach linearer konformer Transformation der Punktgruppen - unter Verwendung verschiedener Filter für die Navigationsdaten.

Tabelle 9.2 gibt eine Vorstellung vom Einfluß der Filterung der Meßfehler der Sensorposition $\underline{s}(t)$. Die radargrammetrischen Fehler verringern sich signifikant (von etwa ± 0.5 km auf ± 0.1 bis ± 0.2 km), wenn ein geeignetes Filter verwendet wird. Meßfehler wirken sich besonders im Geschwindigkeitsvektor $\underline{\dot{s}}(t)$ aus, kleine zufällige, unkorrelierte Positionsfehler verursachen große Richtungsfehler. Die für Tabelle 9.2 verwendeten Tiefpaß-Filter beruhen auf einem gleitenden Mittelwert 3. Ordnung mit 20 Datenpunkten, die entweder alle mit gleichem Gewicht, oder aber mit einem Gewicht verwendet werden, das invers proportional zur 3. Potenz des Abstands vom Schätzungspunkt ist.

Zusammenfassend zeigt sich, daß mit JPL-Radaraufnahmen mit dem 25 cm System (L-Band) eine radargrammetrische Genauigkeit erhalten wird, die vor allem von der Genauigkeit der Daten der Trägheitsnavigation abhängt und etwa ± 1 bis ± 3 km beträgt. Die Fehler der relativen Lagebestimmung betragen nur ± 0.1 bis ± 0.2 km, ähnliche Werte ergeben sich für die Trift des Eises.

9.4. BEISPIEL DER MESSUNG VON MEEREISEISTRIFT MITTELS RADAR

Figur 9.4 zeigt ein Paar L-Band Radaraufnahmen des arktischen Meereseises aus dem AIDJEX-Testgebiet. Die Aufnahmen wurden im Abstand von fünf Tagen geflogen. Die Flugkonfiguration entspricht der in Figur 9.2 dargestellten. Aus dem Bildpaar ist ersichtlich, daß sich die Eisschollen relativ zueinander etwas verschoben und verdreht haben. Die Aufnahmen wurden im Sommer erzeugt (22.August/27.August); die Schollen schwimmen daher im wesentlichen frei. Erst im Herbst beginnt die Bildung von neuem Eis in Gebieten mit offenem Wasser, die Eisdecke schließt sich in dieser Zeit.

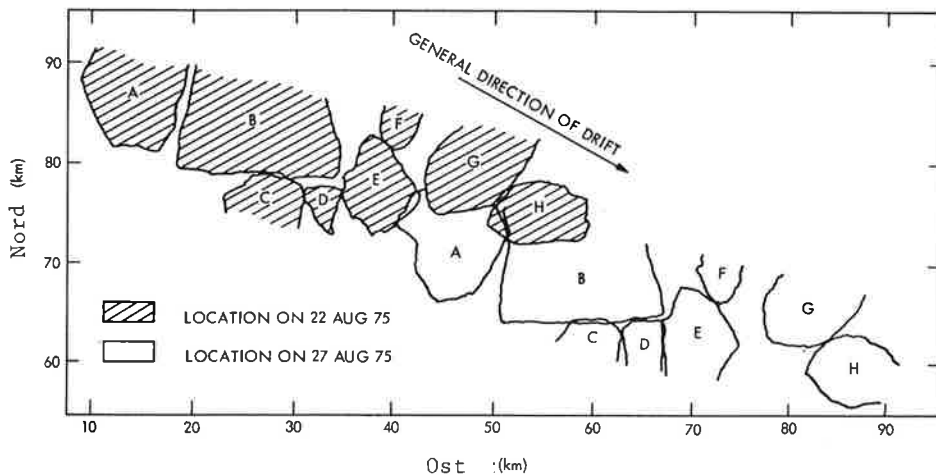


Figur 9.4: Arktisches Meereseis, aufgenommen mit JPL's Radarsystem (L-Band -- 25 cm Wellenlänge)

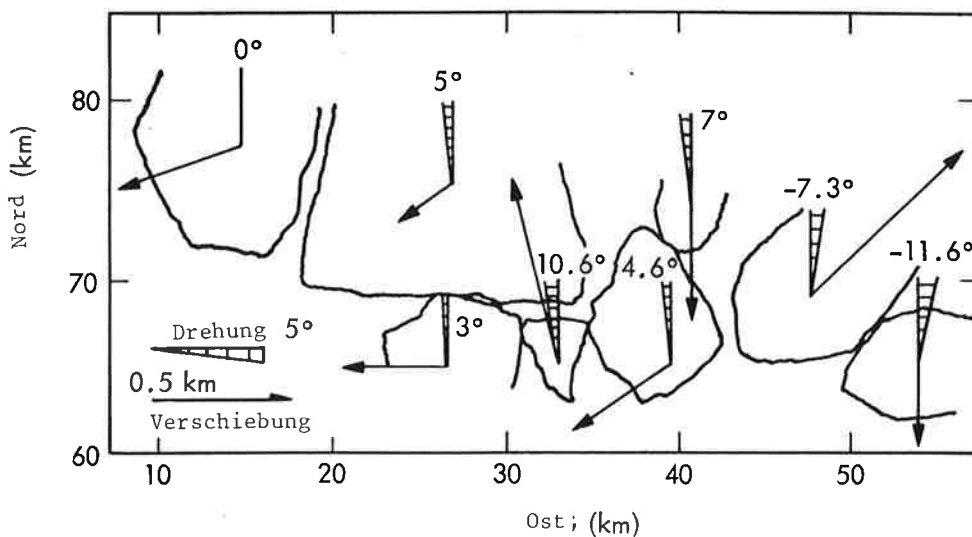
Aus der radargrammetrischen Kartierung der Eisschollen in Figur 9.5 folgt, daß das Eis pro Tag etwa 6.5 km in östlicher und 2.9 km in südlicher Richtung triftet. Die Eisbilder wurden etwa 1.5 bis 2 Stunden nach dem Start des Flugzeuges in Fairbanks, Alaska, aufgenommen. Daher kann angenommen werden, daß die Fehler der Trägheitsnavigation kleiner sind als im Beispiel der Prudhoe-Aufnahmen (Abschnitt 8.3). Wird ein Navigationsfehler von etwa ± 1 km angenommen, so folgt ein Fehler der Triftmessung von etwa 5 % oder ± 200 m pro Tag.

Die Navigationsfehler (Fehler der Ortsvektoren $\underline{s}(t)$) sind im Gebiet der Fig. 9.4 nahezu konstant. Daher können die Bewegungen der Eisschollen relativ zueinander (differentielle Trift) mit wesentlich höherer Genauigkeit angegeben werden als die absolute Trift. Die differentielle Trift wird nach einer vorläufigen Drehstreckung der ganzen ersten in die zweite Karte mittels Transformationen der individuellen Eisschollen nach Gl. (9.2) ermittelt.

Figur 9.6 beschreibt die differentiellen Lageveränderungen und Verdrehungen individueller Schollen. Für diese relativen Bewegungen ist kein Trend ersichtlich.



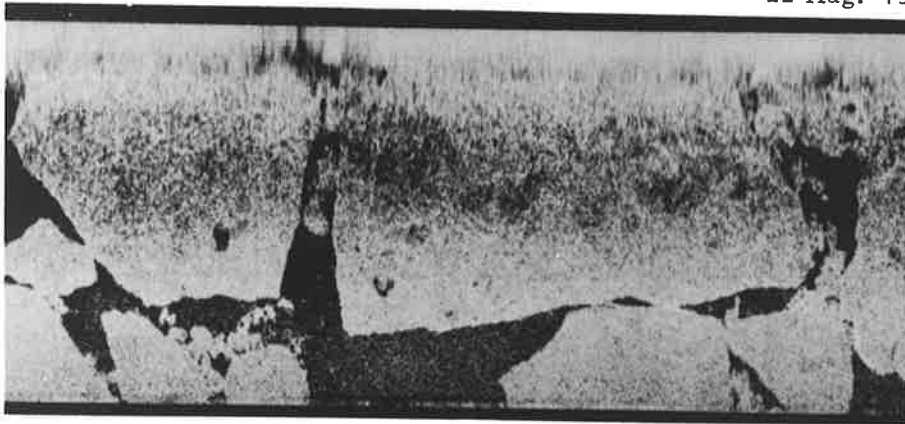
Figur 9.5: Radargrammetrisch erstellte Karte von Eisschollen am 22. und 27. August 1975.



Figur 9.6: Differentielle Lageveränderungen und Verdrehungen einzelner Eisschollen.

Die Meerestreift wurde nach dem im Unterabschnitt 9.2.1 beschriebenen Verfahren mit Hilfe der in aufeinanderfolgenden Aufnahmen gemessenen Bildkoordinaten homologer Punkte bestimmt. Eine Alternative hiezu wäre die Differentialentzerrung der ursprünglichen Bilder und die darauffolgende Messung der Eisbewegungen in den entzerrten Bildern. Die Differentialentzerrung könnte durch digitale Bildverarbeitung erfolgen, wenn die Radaraufnahmen in digitaler Form vorliegen (siehe Unterabschnitt 3.12.3). Figur 9.7 zeigt das Ergebnis einer Differentialentzerrung für die Radaraufnahmen der Fig. 9.4. Die sich in Nadirnähe rasch verschlechternde Bildqualität ist eine Folge der abnehmenden Auflösung. Das quer zur Flugrichtung ersichtliche Linienmuster wird durch den digitalen Entzerrungsalgorithmus verursacht und könnte mit einem verbesserten Programm vermieden werden.

22 Aug. 75



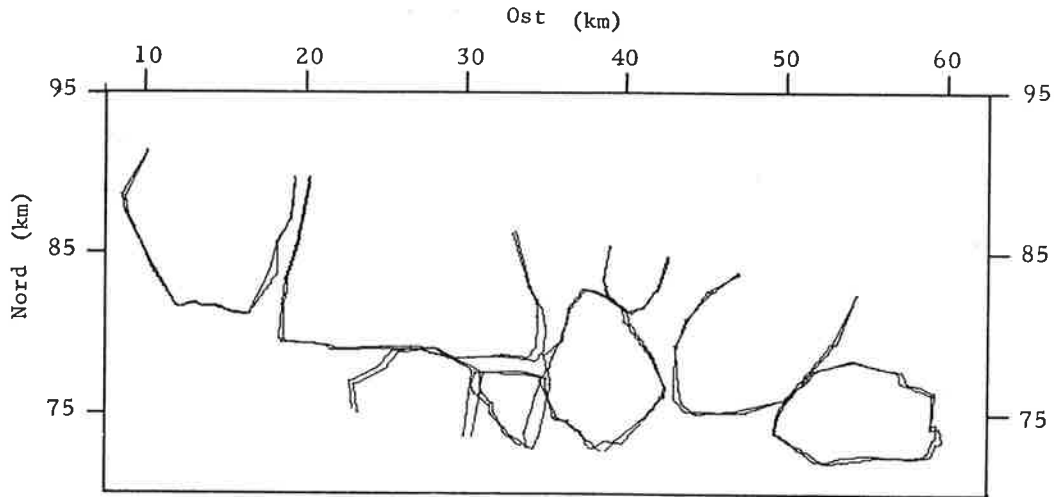
27 Aug. 75



Figur 9.7: Mittels digitaler Bildverarbeitung differentiell entzerrte Radaraufnahmen -- vergl. Fig. 9.4

Aus dem Vergleich folgt, daß die Digitalisierung einander entsprechender Radaraufnahmen, und die darauffolgende Differentialentzerrung, wesentlich aufwendiger sind als die Verarbeitung der Messungen einer geringen Anzahl von identifizierbaren Bildpunkten. Die Entzerrung des Radarbildes erleichtert die Identifizierung homologer Details (Eisformen) nur in unmittelbarer Nähe des Nadirs, nicht aber im Gesamtbild.

Daher ist zu erkennen, daß für die Mikroanalyse die digitale Bildverarbeitung der numerischen Analyse mit Hilfe von diskreten Messungen unterlegen ist. Für die Mesoanalyse der Eisdynamik, in welcher die Kartenprojektion die Beschreibung der Eisdynamik beeinflussen kann und eine Reihe von zusätzlichen Parametern eine Rolle spielen, dürfte diese Aussage in noch höherem Maße gelten, da numerische Operationen mit diskreten Messungen flexibler und weniger aufwendig sind als die digitale Bildverarbeitung. Nur für die Aufgabe der Bestimmung der Fläche offenen Wassers kann die digitale Bildverarbeitung empfohlen werden, da dies eine numerisch einfache Aufgabe darstellt, die mit sehr vielen (allen) Bildpunkten ausgeführt werden muß.



Figur 9.8: Karten von Eisschollen des 27. August 1975, hergestellt unter Verwendung zweier verschiedener Tiefpaßfilter für die Störfunktion der Navigationsdaten.

Fehler der Daten der Trägheitsnavigation können durch Filterung verringert werden. Figur 9.8 zeigt die Kartierungsunterschiede der Eisschollen bei Anwendung verschiedener Filter. Eine Kartierung wurde mit einem Filter erzeugt, für das alle Punkte dasselbe Gewicht haben. Für die zweite wurde ein mit der Entfernung vom Schätzungspunkt abnehmendes Gewicht angenommen. Die in Figur 9.8 dargestellten Unterschiede betragen etwa ± 0.1 km und stimmen in der Größenordnung mit den in der Genauigkeitsschätzung erhaltenen Werten überein (vergl. Tabelle 9.2)

9.5. SEASAT

Der erste mit einem Seitwärts-Radarsystem ausgestattete Erdsatellit wird SEASAT sein. Der Start dieses Satelliten ist für Mai 1978 vorgesehen. Das Projekt hat das Ziel, Daten für ozeanographische Probleme zu gewinnen, wie die Analyse der Wellen im offenen Ozean, die kontinuierliche Vermessung des polaren Meereseises. Tabelle 9.3 enthält die Parameter des für die Eisaufnahmen vorgesehenen SEASAT-Seitwärts-Radarsystems.

Ein Vergleich mit den Parametern des JPL-Flugzeugradars deutet darauf hin, daß die Eisvermessung mit dem SEASAT-Radar einfacher und genauer möglich sein wird. Für diese Erwartung gibt es verschiedene Gründe: (a) Die Breite des Gesichtsfeldes im SEASAT-Projekt wird 100 km betragen gegenüber 12 km im verwendeten Flugzeugradar; (b) Die Variation des Erhebungswinkels Ω in SEASAT beträgt etwa 6° (von 17° bis 23°), im Flugzeugradar hingegen 55° . Die geometrischen Verzerrungen der SEASAT-Aufnahmen können daher vernachlässigt werden; (c) Da die Satellitenbahn wesentlich weniger gestört wird als die Bahn des Flugzeuges, wird die relative Genauigkeit der SEASAT Kartierung höher sein als die der Flugzeugkartierung; (d) Das Satellitenradarsystem wird wesentlich besser kalibriert sein als das Flugzeugsystem.

Mit Hilfe von SEASAT-Radaraufnahmen werden daher große Gebiete rasch kartiert werden können. Daher wird auch die Mesoanalyse der Eisdynamik möglich sein. Das benötigte 100 km breite Feld wird allerdings nicht in einem einzigen Radarstreifen, sondern in vier geringfügig überlappenden Bildstreifen mit jeweils 25 km Überdeckung aufgenommen werden. Die radargrammetrische Auswertung muß daher von einer Streifenbildung ausgehen, durch welche die vier Komponenten der SEASAT-Radaraufnahme mittels Rahmenmarken in ein einziges Bild transformiert werden. (Dies entspricht in der Photogrammetrie der Aufgabe, eine Reseauphotographie aus vier separaten Stücken zu bilden).

Tabelle 9.3: Radargrammetrisch relevante Parameter des SEASAT Seitwärts-Radarsystems

Start	Mai 1978 geplant
Bahnhöhe	790-820 km
Inklination der Bahn	108° rückläufig
Umlaufzeit	100 min
Radar Wellenlänge	25 cm L-Band
Erhebungswinkel der Visurlinie	16.9° - 23.1°
Breite des Gesichtsfeldes	100 km
Auflösung in Bahnrichtung	7 m (25 m) [•]
Auflösung quer zur Bahn	
Schrägdistanz	8 m
Grunddistanz	25 m
Dynamischer Bereich	50 db
Übermittelte Radarbilddaten werden durch modifizierte LANDSAT Bodenstationen aufgezeichnet	
Aufzeichnen der empfangenen Daten vermutlich auf Magnetband	
Erzeugung der Kartenfilme mittels optischer oder digitaler Korrelation	
<p>[•]Die 7-m Auflösung wird künstlich zu 25 m reduziert, um die Bildkörnigkeit zu verringern und die azimutale an die Distanzauflösung anzugleichen (Multilooks).</p>	

9.6. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurde eine Methode zur Kartierung des Meereseises sowie zur Messung der Eistrift mittels Radaraufnahmen beschrieben und in einem Beispiel für Flugzeugaradarbilder angewandt. Die Methode beruht auf der Berechnung der planetozentrischen Koordinaten von identifizierbaren Punkten der Eisdecke, wobei von Radarbildkoordinaten und Trägheits Navigationsdaten ausgegangen wird. Die Genauigkeit der Methode wurde mittels Festpunkten im Küstengebiet Nordalaskas ermittelt. Die absolute Genauigkeit der radargrammetrischen Koordinaten ergibt sich als Funktion der Navigationsfehler mit etwa ± 0.5 bis ± 1 km pro Flugstunde. Die Genauigkeit relativer Positionen ist wesentlich höher und liegt zwischen ± 0.1 bis ± 0.2 km.

Die Fehler der Messung relativer Eisbewegungen werden durch die Genauigkeit bestimmt, mit welcher Punkte der Eisdecke in Bildern, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden, identifiziert werden können (± 0.1 km). Für das im Rechenbeispiel verwendete JPL-Flugzeugaradar sind die Fehler der inneren Orientierung des Sensors etwa ebenso groß wie die Identifizierungsfehler. Überdies ergibt sich, daß auch die Störfunktion der Trägheits Navigationsdaten etwa die Größenordnung der anderen Fehlerquellen besitzt.

Durch SEASAT wird die Meereseisvermessung etwas vereinfacht werden, weil die geometrischen Verzerrungen kleiner, das Gesichtsfeld aber größer sein werden als im Flugzeugaradar. Daher werden sowohl die Mikro- als auch die Mesoanalysen der Eisdynamik Gegenstand der radargrammetrischen Anwendungen der SEASAT-Radaraufnahmen sein.

10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

10.1. ZUSAMMENFASSUNG

Die in diesem Bericht beschriebenen Überlegungen zur Satellitenradargrammetrie betreffen das Einzelbild, das Stereobildpaar und den Bildverband. Die radargrammetrischen Verfahren mit Satellitenradar unterscheiden sich im Prinzipiellen nur wenig von den Verfahren mit Flugzeugradar. Unterschiede betreffen nicht das Prinzip, sondern die Wahl der Radarprojektparameter (Flughöhe, Blickrichtung usw.), die Berücksichtigung der sphäroidischen Form des abgebildeten Objektes (Planeten) und einige für Satellitenprojekte charakteristische Besonderheiten wie die Wirkung der Planetenumdrehung, Exzentrizität der Satellitenbahn usw.

Radarschrägaufnahmen können aus einem Satelliten nur mit synthetischer Apertur eine hohe Auflösung erreichen, aus einem Flugzeug jedoch auch mit realer Apertur. Bei synthetischer Apertur wird die Aufnahmerichtung nicht durch die Orientierung der Antenne, sondern durch die Richtung der Sensorbewegung festgelegt. Für die Satellitenradargrammetrie spielen daher die Orientierungswinkel des Sensors nur eine untergeordnete Rolle.

Die Analyse des Radareinzelbildes nimmt den breitesten Raum ein, da sie grundlegende Beziehungen definiert und die Basis aller weiteren Analysen bildet. Die Radarabbildungsgleichungen werden als Funktion des Satellitenpositions- und Geschwindigkeitsvektors, und der Parameter der Umlaufbahn abgeleitet. Für die Radarrückprojektion auf eine Kugel oder ein Ellipsoid werden mehrere Formelsysteme mitgeteilt und zur Berechnung der momentanen Abtastlinie auf der Planetenoberfläche angewandt. Damit kann die Geometrie des Radarbildes analysiert werden und ein quantitativer Vergleich mit verschiedenen Kartenprojektionen erfolgen. Die Einflüsse der Planetenumdrehung, der Kegelform der Abtastfläche und einer Exzentrizität der Umlaufbahn werden studiert. Auch auf die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung und der Einzelauswertung (Monoplotting) wird eingegangen.

Sodann werden die Verfahren zur Bildung des Radarstereomodells und die Genauigkeit dieses Modells untersucht. Da die relative Orientierung für Radarbildstreifen nicht definiert ist, müssen zur Modellbildung Einstelldaten benützt werden. Der Einfluß der Fehler dieser Daten auf das Stereomodell wird algebraisch und numerisch bestimmt. Dabei zeigt sich, daß die Stereokartiergenauigkeit wesentlich geringer ist als das Radarauflösungsvermögen. (Bei der Stereoauswertung mittels photogrammetrischer Meßkammerdaten ist dies umgekehrt). Die gemeinsame Benützung der ungenauen Höhen des Radarstereomodells mit den wesentlich genaueren Altimetrie Höhen wird eingehend studiert. Hierfür wird eine Version der Methode der linearen Prädiktion entwickelt und angewendet.

Die bisher verfügbaren Satellitenaufnahmen wurden während der Apollo-17-Mission zum Mond entlang einer nahezu äquatorialen Bahn erzeugt. Diese sind zwar nicht repräsentativ für den Stand der Radartechnologie, erlauben aber die Anwendung der satellitenradargrammetrischen Konzepte für Einzelbilder und Stereobildpaare. Die dabei erzielte Lagegenauigkeit liegt zwischen etwa ± 250 m und ± 500 m, die Höhengenaugigkeit erreicht ± 100 m. Diese Höhengenaugigkeit ist größer als die mit Vidikan-Aufnahmen bei der Exploration von Planeten erreichte (vergl. Blasius^x, 1973).

Die gemeinsame Ausgleichung von Radarbildverbänden stellt die allgemeinste Form der radargrammetrischen Punktbestimmung dar. Wie in der Photogrammetrie ergeben sich auch für Radar verschiedene Lösungssysteme. Diese werden mathematisch formuliert und hinsichtlich des notwendigen Aufwandes studiert. Die Notwendigkeit, die Sensorposition mit einer großen Anzahl von Parametern zu beschreiben, führt zu großen Gleichungssystemen für die Unbekannten. Der Aufwand für die stren-

gen Methoden ist größer als für die Photogrammetrie. Daher kann die Kartierung großer Gebiete nur mit großem Aufwand nach den strengen Verfahren der simultanen Ausgleichung ursprünglicher Beobachtungen erfolgen.

Radarblockausgleichungen wurden bisher nur mit Flugzeug-Radarstreifen von flachem Gelände für die Erstellung von Radarbildplänen und mittels simulierter Daten ausgeführt. Die durchgeführten Untersuchungen mit Flugzeugradar betrafen die sequentielle Ausgleichung ursprünglicher Bildstreifen, wobei eine Genauigkeit von etwa ± 150 m erreicht wurde. Der mittels simulierter Daten und mit einigen Beschränkungen angestellte Vergleich zwischen Verfahren der sequentiellen und simultanen Ausgleichung ergab für die sequentielle Methode das günstigere Ergebnis. Die qualitativen Schlussfolgerungen gelten auch für Satellitenradar. Quantitativ werden die Ergebnisse für Satellitenradar von jenen für Flugzeugradar abweichen, weil andere Verhältnisse in bezug auf Auflösungsvermögen und Genauigkeit der Sensorpositionsbestimmungen vorliegen.

In einem abschließenden Kapitel werden Anwendungen der Satellitenradargrammetrie auf die Kartierung des polaren Meereseises und die Analyse seiner Dynamik besprochen. Methoden und Experimente für die Mikroanalyse der Eisbewegungen mit Flugzeugradar werden beschrieben und die erreichte absolute und relative Genauigkeit (± 1 km bzw. ± 0.1 km) in der Bestimmung der Eistrift. Auf Grund einer Analyse der Parameter des geplanten SEASAT-Satellitenradar werden für dieses Projekt höhere absolute Genauigkeiten erwartet als die mit Flugzeugradar erhaltenen Werte von ± 1 km bis ± 3 km.

10.2. AUSBLICK

Außerhalb des verhältnismäßig kleinen Kreises jener Mitarbeiter der Raumfahrtbehörde der Vereinigten Staaten, die an der Planung und Vorbereitung von zukünftigen Satellitenradarprojekten beteiligt sind, wird Satellitenradargrammetrie erst dann weitere Bedeutung gewinnen, wenn Radaraufnahmen der Erde zur Verfügung stehen. Es wäre darum unrealistisch, vor diesem Zeitpunkt die intensive Erforschung besonderer Teilprobleme zu fordern. Deshalb war es der Zweck der vorliegenden Studie, die im Hinblick auf die Vorbereitung zukünftiger Projekte der Satellitenradargrammetrie auftretenden Fragestellungen in voller Breite zu behandeln. Selbstverständlich ist dies nur auf Kosten der Tiefe in der Behandlung spezifischer Fragen möglich.

Methoden, die für Satellitenradar entwickelt werden, sind oft mit beträchtlichen Vereinfachungen auch auf Flugzeugradar verwendbar. Die folgenden Empfehlungen für Schwerpunkte künftiger Arbeiten in der Satellitenradargrammetrie haben daher auch für Flugzeugradar Geltung.

Für das Radareinzelbild, das Stereopaar und den Bildverband lassen sich, nach Dringlichkeit gereiht, die folgenden Problemstellungen erkennen:

(i) Kalibrierung der Bildherstellung soll verbessert werden. Hiefür sollen Zeit- und Distanzmarken mit größerer Genauigkeit angebracht und besser kalibriert werden, und die mechanischen sowie elektronischen Komponenten für die Herstellung des Signalfilms wie auch im optischen Korrelator als Fehlerquellen eliminiert werden.

(ii) Die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung und der digitalen Einzelauswertung (Mono-Plotting) sollen in der Radarkartierung ausgenutzt werden. Denn der kinematische Charakter der Radarbildformung und gemeinsame Verwendung von Radaraufnahmen mit anderen Daten macht es notwendig, die Radaraufnahmen differentiell zu entzerren. Wegen der hiefür erforderlichen Flexibilität des Entzerrungsverfahrens ist die digitale Bildverarbeitung ein sehr geeignetes Verfahren.

(iii) In der Stereoradargrammetrie sind die Zusammenhänge zwischen physiologischer Wahrnehmung des Stereoeffektes, der Stereobasis und Blickwinkels ungenügend bekannt. Untersuchungen hiezu und über die Möglichkeiten und Grenzen von Radarstereo sollten ausgeführt werden.

(iv) Die Möglichkeit der gemeinsamen Benützung von Stereoradarhöhen und Höheninformation aus anderen Quellen sollte studiert werden, um die dreidimensionale Information des Radar voll auszunützen.

(v) Die Bildung von Stereomodellen und Radarblöcken wurde bisher meist mit vereinfachenden Annahmen angewendet. Strenge Verfahren des Folgebildanschlusses sollen studiert werden.

(vi) Die Verfahren zur Punktbestimmung mit Verbänden von Satellitenradarbildern sollten systematisch mit dem Ziel untersucht werden, die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit zu verbessern.

Die Bedeutung der Radargrammetrie wird durch die zu erwartenden Satellitenprojekte zweifelsohne zunehmen. Jedoch ist in der übersehbaren Zukunft nicht zu erwarten, daß wesentliche Aufgaben der Photogrammetrie durch die Radargrammetrie übernommen werden können. Der ständig wachsende Bedarf an Information über unsere Umwelt und die wissenschaftliche Neugierde werden aber neue Aufgaben stellen, von denen einige am besten mittels Radaraufnahmen gelöst werden können.

APPENDIX A

BILDFORMUNG IM SEITWÄRTSRADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR

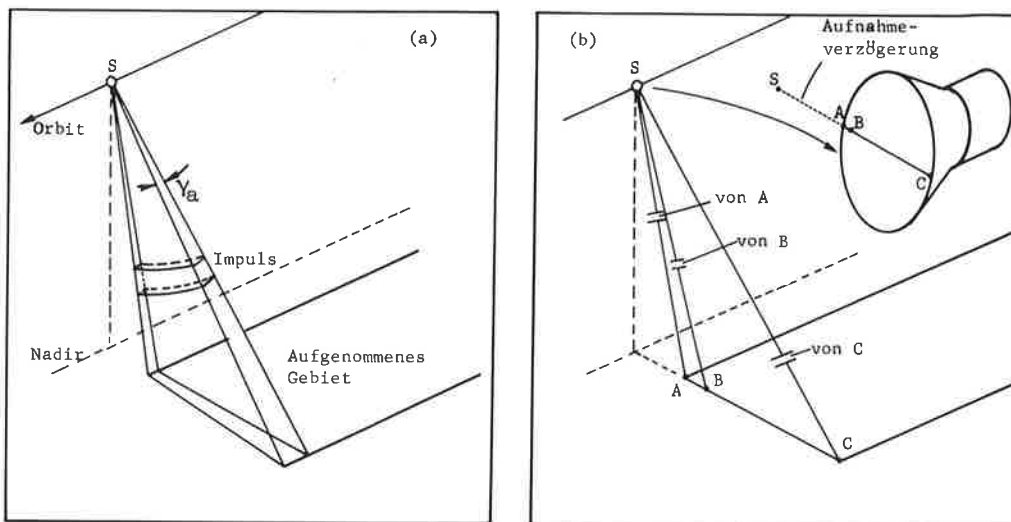
A.1. EINLEITUNG

Die Herstellung eines Seitwärts-Radarbildes mit synthetischer Apertur erfolgt in zwei voneinander getrennten Schritten. Der erste besteht in der Erzeugung einer holographischen Aufzeichnung von Interferenzmustern auf dem "Signal-" oder "Datenfilm". Der zweite Schritt hat die Umwandlung der holographischen Aufzeichnung in ein interpretierbares photographisches Bild, den "Kartenfilm", zum Ziel.

A.2. HERSTELLUNG DES SIGNALFILMES

Der erste Schritt der Erzeugung eines Signalfilms wird analog zur Herstellung einer Radarschrägaufnahme mit realer Apertur ausgeführt. Figur A.1 illustriert das Prinzip einer Radaroperation an Bord eines Flugzeuges oder Satelliten. Ein Radarimpuls von der Länge ℓ wird quer zur Fortbewegungsrichtung der Antenne ausgesandt. Der reflektierte Impuls (Radarechos) wird kurze Zeit danach von der Antenne empfangen (siehe Figur A.1b). Die Intensität eines Kathodenstrahles wird vom Objekt (Planetenoberfläche) durch die empfangenen Reflektionen moduliert. Jede durch den Kathodenstrahl erzeugte Bildlinie wird photographisch auf einem Film festgehalten, der sich mit einer Geschwindigkeit an der Röhre vorbeibewegt, die mit der Fortbewegung des Sensors synchronisiert ist. Somit entsteht wie im Radar mit realer Apertur ein Bild des Objektes durch linienweises Abtasten, wobei jede neue Linie durch die Echos eines neuen Radarimpulses erzeugt wird.

Figur A.2 illustriert, daß ein Objektpunkt A zum erstenmal ein Radarecho produziert, wenn der Sensor in Position S_1 , und das letzte Mal, wenn er in S_3 ist. Ein Radarsystem mit synthetischer Apertur hat gegenüber dem System mit realer Apertur vergleichsweise breite Radarimpulse.



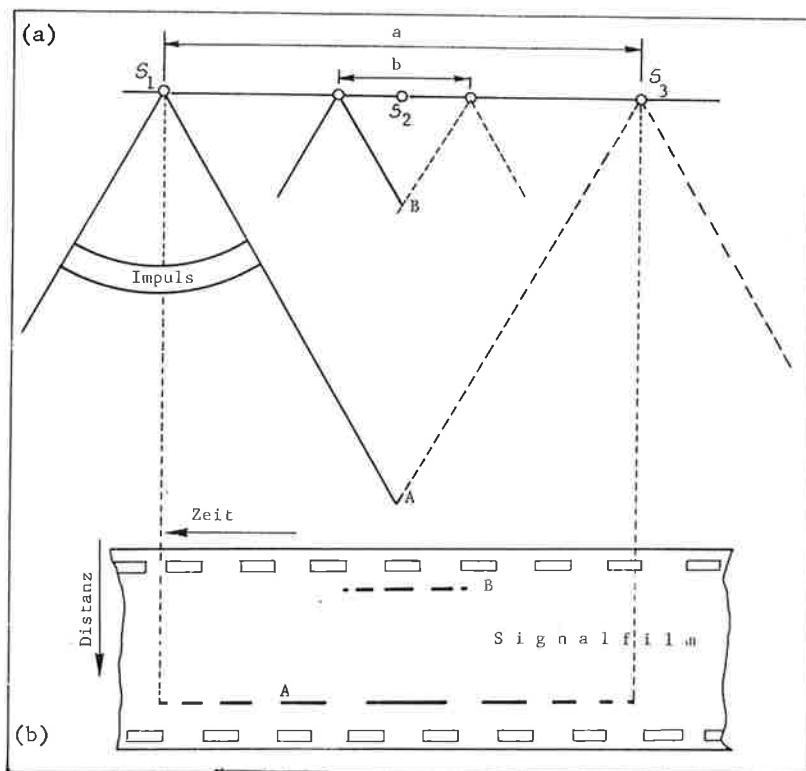
Figur A.1: Prinzip der Radaroperation (a) im Objektraum und (b) im Bildraum (Bildaufzeichnung).

Die Öffnungswinkel γ_a (Abb. A.1a, A.2a) sind daher groß. Daher wird jeder Objektpunkt in der Filmaufzeichnung durch eine endliche Linie statt durch einen Punkt wiedergegeben. Diese Linie ist jedoch, wie aus Figur A.2b ersichtlich, nicht kontinuierlich, sondern unterbrochen. Je weiter ein Objektpunkt von der Antenne entfernt ist, desto länger wird die Bildlinie (siehe Abstand 'a' für

Punkt A und 'b' in Figur A.2b).

Die Unterbrechungen der Bildlinie eines Objektpunktes entstehen auf folgende Weise: Im Radarsystem wird eine kohärente Referenzschwingung erzeugt, deren Phase gegenüber der Phase des Radarechos wegen des zurückgelegten Weges zum Objekt und zurück verschoben ist. Außerdem ist die Frequenz der Echos wegen der Dopplerfrequenz gegenüber der Referenzschwingung verändert.

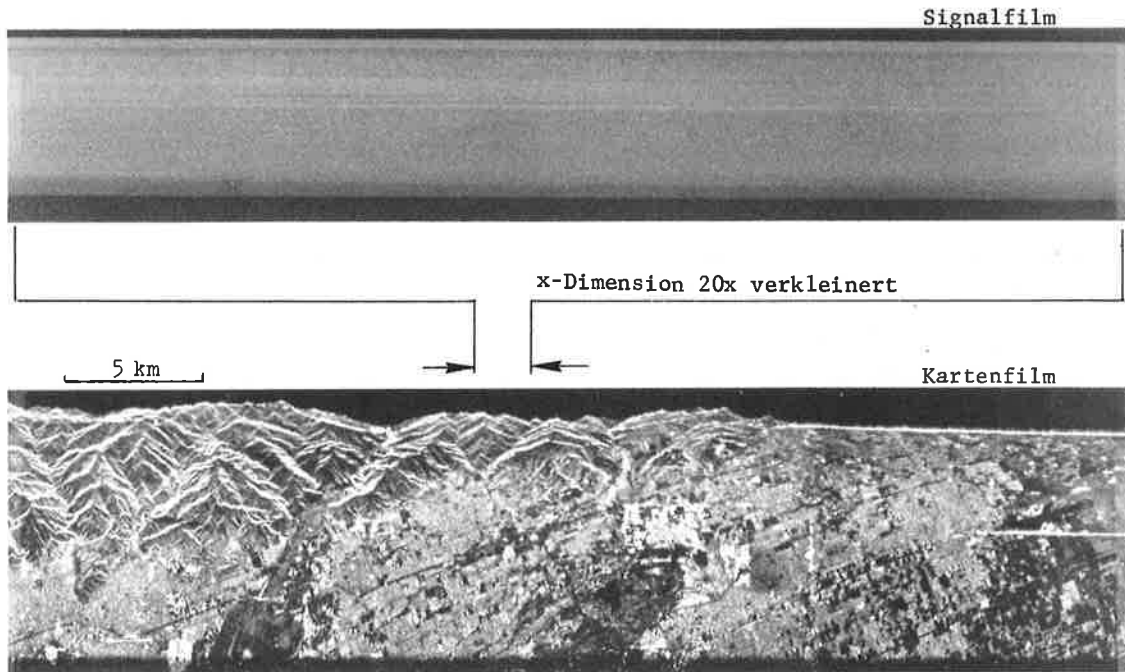
Wird das vom Punkt A in Position S_1 empfangene Radarecho mit der Referenzschwingung verglichen, so wird im Falle einer konstruktiven Interferenz in Position S_1 der Kathodenstrahl das Radarecho aufzeichnen. Hat sich also der Abstand Antenne - Objekt um $\lambda/4$ (λ = Wellenlänge) verändert (bzw. die relative Geschwindigkeit des Sensors in bezug auf das Objekt A verringert), so erhält man eine destruktive Interferenz und der Kathodenstrahl zeichnet kein Radarecho auf. Deshalb zeigt die Bildlinie von Punkt A in Abb. A.2b Unterbrechungen.



Figur A.2: Prinzip der Radaroperation mit synthetischer Apertur

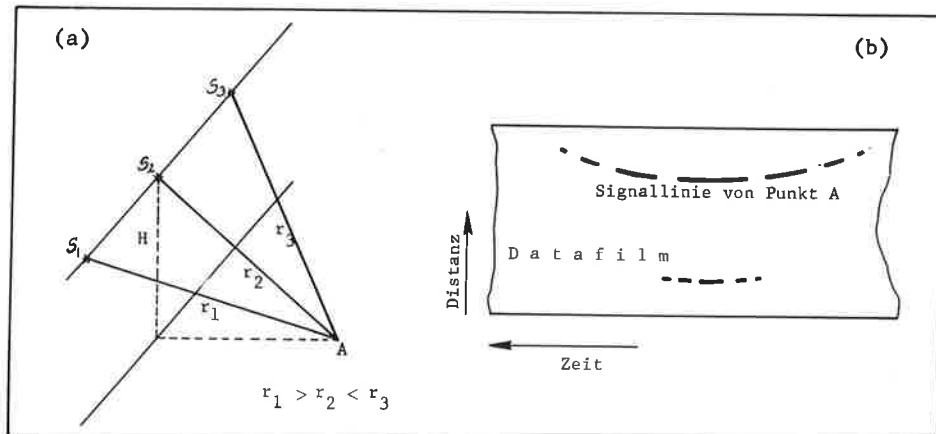
Konstruktive und destruktive Interferenzen folgen rasch aufeinander, wenn sich der Abstand Antenne - Objekt (\overline{SA}) rasch ändert. Daher wird das Signal von A (wie in Abb. A.2b dargestellt) in der Nähe von S_1 und S_3 öfter unterbrochen als in Position S_2 .

Die gebrochene Linie entsteht durch Radarechos - jeder Radarimpuls zwischen S_1 und S_3 trägt einen weiteren Punkt zur Signallinie des Objektes A bei. Neben der Tatsache, daß breite Radarimpulse verwendet werden, unterscheiden sich Radaraufnahmen mit realer und synthetischer Apertur durch die Tatsache, daß im letzteren Fall das Echo nicht direkt, sondern in der Summe mit der kohärenten Referenzwelle aufgezeichnet wird. Daher wird das System mit synthetischer Apertur auch als "kohärenter Radar" bezeichnet. Das Ergebnis ist der "Signal-" oder "Datenfilm" (siehe Abb.A.3), der für den menschlichen Beobachter ein unentwirrbares Grau darstellt. Dieser Datenfilm enthält für jeden abgebildeten Objektpunkt eine Signallinie, die ein "eindimensionales Hologramm" (Interferenzmuster) darstellt.



Figur A.3: Beispiel eines Signalfilms (oben) und des dazugehörigen Kartenfilms; Wegen der Maßstabsverkleinerung in Flugrichtung um einen Faktor von etwa 20 entspricht dem Stück Signalfilm dieser Figur nur ein schmales Stück des Radarbildes.

Die Entstehung der Signallinien kann auch durch Dopplerfrequenzen erläutert werden, denn der Frequenzunterschied zwischen ausgesandten und empfangenen Radarsignalen entsteht durch den Dopplereffekt und dieser kann als Ursache für das unterbrochene Interferenzmuster der Signallinien angesehen werden.

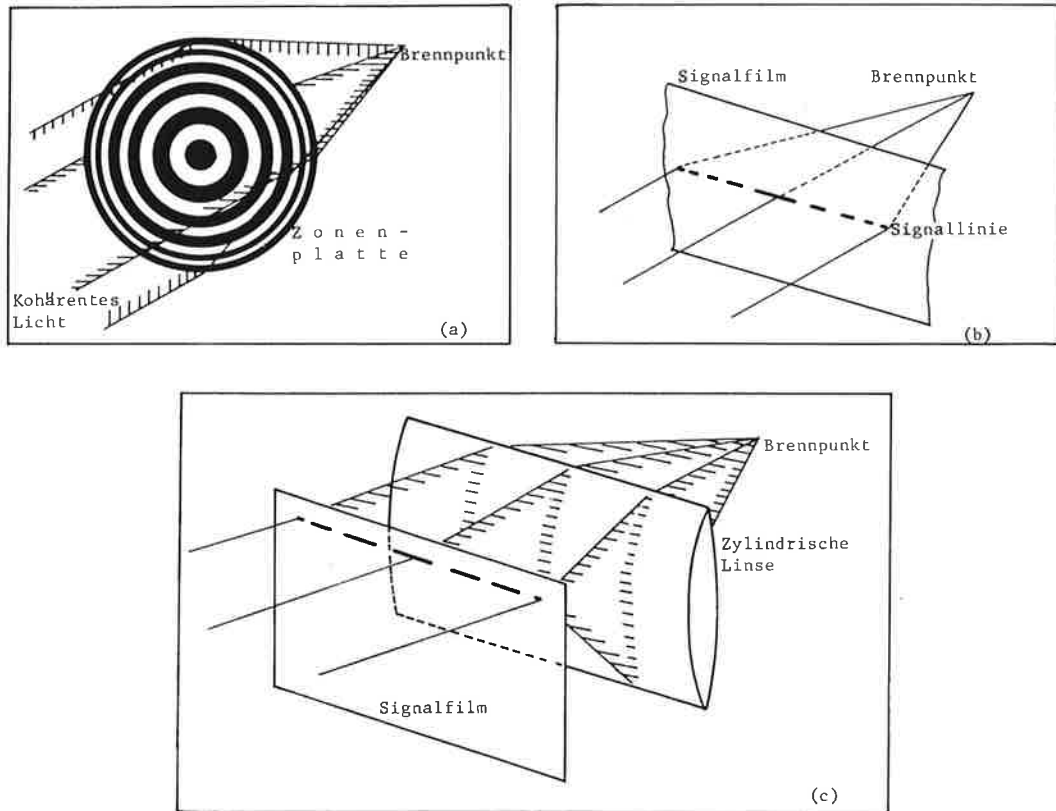


Figur A.4: Krümmung der Signallinie; (a) die Schrägdistanz Antenne - Objekt wird zu einem Minimum und wächst dann wieder an; (b) Krümmung

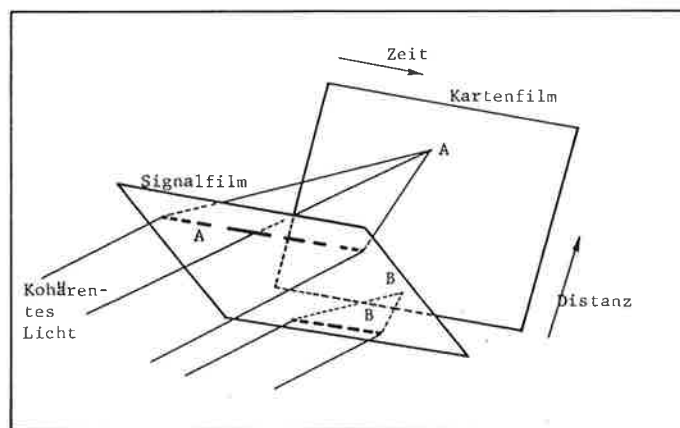
In Figur A.2b wurde die Tatsache unterdrückt, daß der sich verändernde Abstand zwischen Antenne und Objekt nicht nur zu abwechselnd konstruktiven und destruktiven Interferenzen zwischen Echo und Referenzwelle führt, sondern auch eine Krümmung der Signallinie verursacht. Dies zeigt Figur A.4a und b, in der die Schrägdistanz S_1A länger ist als S_2A , und daher eine Krümmung der Signallinie erfolgt.

A.3. UMWANDLUNG DES SIGNALFILMS IN EINEN KARTENFILM

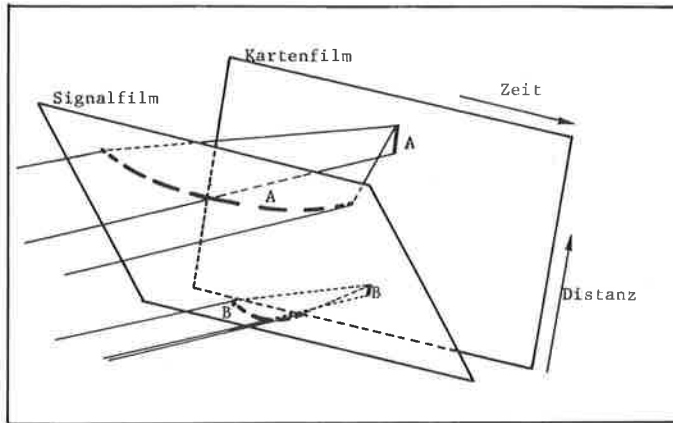
Wir die Krümmung vernachlässigt, so kann die unterbrochene Signallinie als Querschnitt einer "Zonen-Platte" angesehen werden (siehe Abb. A.5a). Diese wirkt bekanntlich auf kohärentes Licht wie eine sphärische Linse, sodaß die Signallinie imstande ist, paralleles kohärentes Licht in einer Richtung zu fokussieren (Abb. A.5b). Da die Signallinie eine linienförmige ist, ist für die Fokussierung in der Richtung quer zur Signallinie eine andere, zylindrische Linse erforderlich (Abb. A.5c).



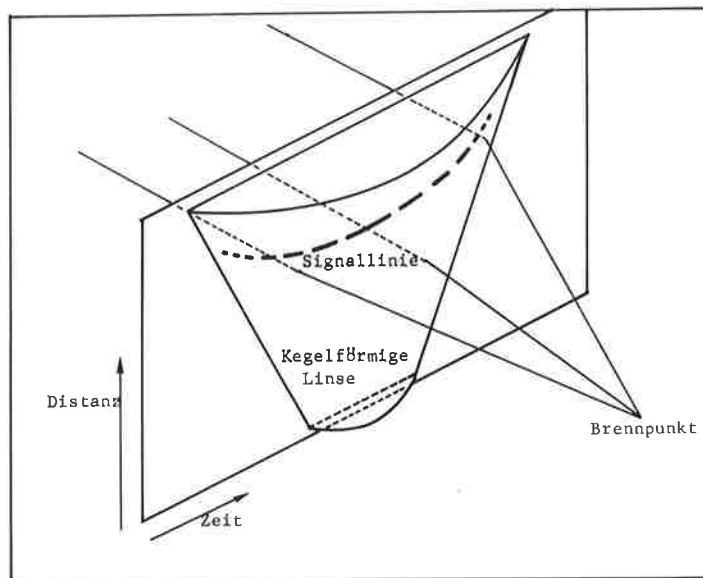
Figur A.5: Erläuterung der Konzepte (a) Zonenplatte; (b) Signallinie; (c) vollständige Fokussierung mittels Signallinie (azimutal) und mittels Zylinderlinse (in Distanzrichtung).



Figur A.6: Signal- und Kartenfilm müssen gegeneinander geneigt sein, da die Brennweite der Signallinien mit der Schrägdistanz anwächst.



Figur A.7: Effekt der Signallinienkrümmung auf die Fokussierung.

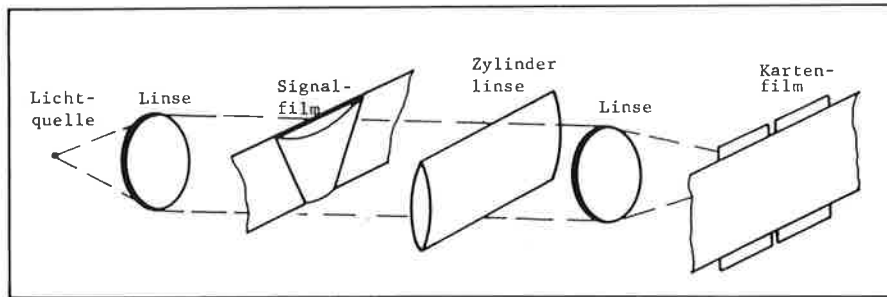


Figur A.8: Eliminierung der Signallinienkrümmung mittels vorgeschalteter konischer Linse

Signallinien für Punkte in einer größeren Schrägdistanz von der Antenne entsprechen einer größeren optischen Brennweite als jene Punkte in der Nähe der Antenne. Für die Umwandlung des Signalfilms in einen Kartenfilm durch "Bildkorrelation" müssen die beiden Filme in der in Abb. A.6 angegebenen Art gegeneinander geneigt sein.

Die in Figur A.4 erläuterte Krümmung der Signallinie wächst mit der Entfernung des Punktes von der Antenne und hat nach Abb. A.7 eine Verringerung der Bildschärfe in Distanzrichtung zur Folge.

Die Signallinienkrümmung kann durch Vorschaltung einer konischen Linse vor den Signalfilm beseitigt werden, wie dies in Abb. A.8 angedeutet wird. Die Umwandlung des Signalfilms in eine photographische Aufnahme könnte durch ein optisches Instrument nach Fig. A.9 erfolgen. Fig. A.9 ist eine Prinzipskizze für einen derartigen "optischen Korrelator", für den jedoch auch viele andere Konstruktionsprinzipien bestehen.



Figur A.9: Prinzip eines optischen Korrelators für Radarbilder (nach Cutrona^x, 1962).

A.4. EINIGE BEGRIFFLICHE ERLÄUTERUNGEN

Nach den vorhergehenden Ausführungen entsprechen Signallinien einem Querschnitt durch eine Zonenplatte und somit einer Linse. Da im Radiowellenbereich die Rolle von optischen Linsen durch Antennen übernommen wird, entspricht die Signallinie auch einer "Antenne" für kohärentes Licht. Die Wirkung einer sehr langen Antenne wird also durch einen Datengewinnungs- und davon getrennten Verarbeitungsschritt erreicht. Es besteht eine Analogie zwischen der synthetischen Radarantenne und der "Antenne" für kohärentes Licht.

Es sei auch darauf hingewiesen, daß die Schärfe der Radarabbildung eines Objektes nicht von der Schrägdistanz zur Antenne abhängt. Dies wird mittels Radarterminologie wie folgt erklärt: Ein Radarstrahl ist umso schärfer gebündelt, je länger die Antenne ist, so wie auch eine Kamera mit größerer Brennweite ein größeres Auflösungsvermögen besitzt. Die Antennenlänge entspricht der Brennweite eines photographischen Objektivs und dies gilt auch für Radarsysteme mit realer Apertur. Die Auflösung nimmt für reale Apertur mit wachsender Schrägdistanz ab. Da beim Radar mit synthetischer Apertur die Signallinien mit zunehmender Schrägdistanz länger werden (vergl. Punkte A, B in Abb. A.2a und -b), so nimmt die Länge der synthetischen Antenne (Brennweite) mit der Schrägdistanz zu. Daher ist das Auflösungsvermögen in der Bewegungsrichtung der Antenne (Azimut) unabhängig vom Abstand des Objektes von der Antenne. Dieses Ergebnis steht in Gegensatz zu den bei der Abbildung mit photographischen Kameras vorliegenden Gegebenheiten.

Ein optischer Korrelator entspricht einem Analogrechnergerät, die Bildkorrelation kann aber auch in einem Digitalrechner erfolgen. Hierzu wird entweder der Signalfilm digitalisiert und die Digitaldaten im Computer verarbeitet; oder die Signale werden direkt auf Magnetbändern in digitaler Form gespeichert.

Zur Zeit der Erfindung des Radars mit synthetischer Apertur gab es keine kohärente Lichtquelle für eine optische Korrelation. Daher wurde ursprünglich an digitale (und elektronische) Bildkorrelationen gedacht. Aber die digitale Methode war damals, ähnlich wie auch heute, nicht richtig entwickelt. Nach der Entwicklung der Lasertechnik wird die Korrelation nun fast ausschließlich optisch gelöst. Aber auch die Computerentwicklung hat Fortschritte gemacht, die digitale Bildkorrelation wird in naher Zukunft zur Verfügung stehen. Daher werden durch Funk vom Satelliten übermittelte Signaldaten direkt im Computer in Radarbilder hoher Auflösung umgewandelt werden. Dies wird einen technologischen Durchbruch für Radaroperationen darstellen und neue Möglichkeiten eröffnen.

APPENDIX B

SCHNITT EINER GERADEN MIT EINEM DREIACHSIGEN ELLIPSOID

B.1 PROBLEMSTELLUNG

Gegeben sei eine Gerade durch den Punkt mit dem Ortsvektor \underline{s} und in Richtung des Einheitsvektors \underline{p}_g .

Gesucht ist der Schnittpunkt \underline{p} der Geraden mit einem dreiachsigen Ellipsoid:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (B.1)$$

B.2 LÖSUNG

Nach dem von Dallas^x(1973) angegebenen Verfahren spannen die Vektoren \underline{s} und \underline{p}_g eine Ebene durch den Koordinatenursprung, normal zu einem Hilfsvektor \underline{h}_4 , auf.

$$\underline{h}_4 = (\underline{s} \times \underline{p}_g) / |\underline{s} \times \underline{p}_g| \quad (B.2)$$

Laut Figur B.1 läßt sich \underline{h}_4 auch mittels der Winkel α_1, α_2 darstellen:

$$\begin{aligned} (h_x)_4 &= \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \\ (h_y)_4 &= -\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \\ (h_z)_4 &= \cos \alpha_2 \end{aligned} \quad (B.3)$$

sodaß umgekehrt gilt:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= (h_x)_4 / (1 - (h_z)_4^2)^{1/2} \\ \cos \alpha_2 &= (h_z)_4 \end{aligned} \quad (B.4)$$

Die Schnittlinie der durch \underline{h}_4 definierten Ebene und dem Ellipsoid ist eine Ellipse mit den Halbachsen in Richtung der Einheitsvektoren $\underline{h}_5, \underline{h}_6$. Nach Fig. B.1 wird die Richtung von \underline{h}_5 durch die bekannten Winkel α_1, α_2 und den bisher unbekanntes Winkel α_3 definiert:

$$\begin{aligned} (h_x)_5 &= \cos \alpha_3 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_3 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ (h_y)_5 &= \cos \alpha_3 \sin \alpha_1 + \sin \alpha_3 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ (h_z)_5 &= \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (B.5)$$

Für den Vektor \underline{h}_6 gelten Ausdrücke analog jenen für \underline{h}_5 , jedoch muß α_3 durch $(\alpha_3 + 90^\circ)$ ersetzt werden.

$$\begin{aligned} (h_x)_6 &= -\sin \alpha_3 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_3 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ (h_y)_6 &= -\sin \alpha_3 \sin \alpha_1 - \cos \alpha_3 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ (h_z)_6 &= \cos \alpha_3 \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (B.6)$$

Für den gesuchten Lösungsvektor \underline{p} kann gesetzt werden:

$$\underline{p} = d_p \underline{h}_5 + e_p \underline{h}_6 \quad (\text{B.7})$$

sodaß:

$$\begin{aligned} p_x &= d_p (h_x)_5 + e_p (h_x)_6 \\ p_y &= d_p (h_y)_5 + e_p (h_y)_6 \\ p_z &= d_p (h_z)_5 + e_p (h_z)_6 \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

p_x, p_y, p_z müssen die Gl. (B.1) erfüllen. Durch Einsetzen von Gl. (B.8) in Gl. (B.1) folgt:

$$d_p^2/A^2 + 2d_p e_p B + e_p^2/C^2 = 1 \quad (\text{B.9})$$

wobei:

$$\begin{aligned} 1/A^2 &= (h_x)_5^2/a^2 + (h_y)_5^2/b^2 + (h_z)_5^2/c^2 \\ B &= (h_x)_5 (h_x)_6/a^2 + (h_y)_5 (h_y)_6/b^2 + (h_z)_5 (h_z)_6/c^2 \\ 1/C^2 &= (h_x)_6^2/a^2 + (h_y)_6^2/b^2 + (h_z)_6^2/c^2 \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Da \underline{h}_5 die Richtung der großen und \underline{h}_6 die der kleinen Halbachse der Ellipse definieren, muß Gl. (B.9) die Normalform der Ellipsengleichung darstellen, in welcher gilt:

$$\begin{aligned} B &= 0 \\ A, B &= \text{Längen der Halbachsen} \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

Durch Einsetzen der Gl. (B.5), (B.6) in (B.11) erhält man eine Bestimmungsgleichung für den bisher unbekanntem Winkel α_3 . Es gilt:

$$\tan 2 \alpha_3 = \frac{D}{E} \quad (\text{B.12})$$

worin

$$\begin{aligned} D &= \sin 2 \alpha_1 \cos \alpha_2 (1/a^2 - 1/b^2) \\ E &= (\sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1) (1/a^2 - 1/b^2) - \sin^2 \alpha_2 (1/b^2 - 1/c^2) \end{aligned}$$

Mit α_3 sind nun auch die Längen der beiden Halbachsen der Ellipse bestimmt.

Die gegebenen Vektoren \underline{s} und \underline{p}_g werden nun in Funktion der Hilfsvektoren $\underline{h}_5, \underline{h}_6$ angeschrieben:

$$\begin{aligned} \underline{s} &= d_s \underline{h}_5 + e_s \underline{h}_6 \\ \underline{p}_g &= d_g \underline{h}_5 + e_g \underline{h}_6 \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

wobei gilt:

$$\begin{aligned} d_s &= \underline{s} \cdot \underline{h}_5 & e_s &= \underline{s} \cdot \underline{h}_6 \\ d_g &= \underline{p}_g \cdot \underline{h}_5 & e_g &= \underline{p}_g \cdot \underline{h}_6 \end{aligned} \quad (B.14)$$

Fig. B.2 ist eine Darstellung der Verhältnisse in der durch \underline{p}_g und \underline{s} aufgespannten Ebene. Es ist ersichtlich, daß

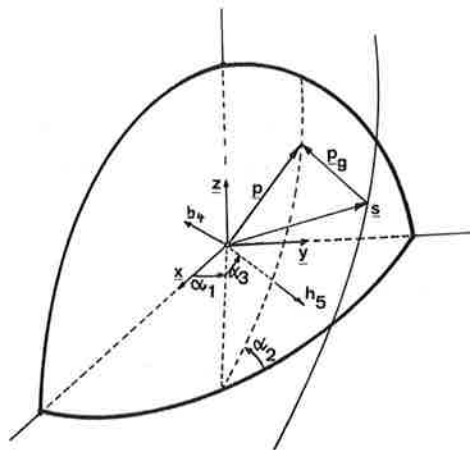
$$d_p = d_s + \frac{e_g}{d_g} (e_p - e_s) \quad (B.15)$$

wobei d_p, e_p die Komponenten des gesuchten Schnittpunktes \underline{p} im $\underline{h}_5, \underline{h}_6$ -System darstellen, die auch die Ellipsengleichung

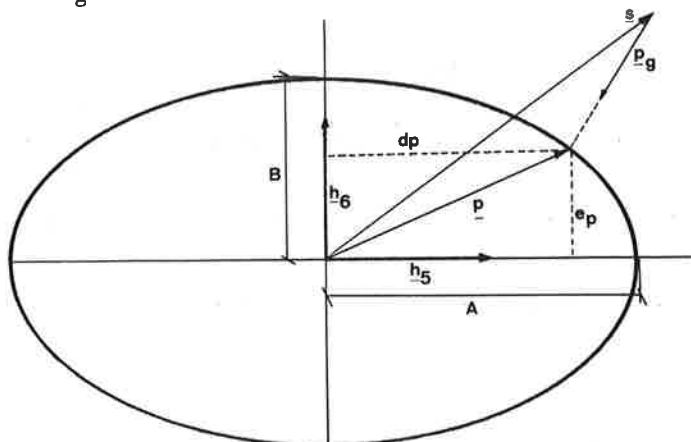
$$d_p^2/A^2 + e_p^2/C^2 = 1 \quad (B.16)$$

erfüllen müssen (vergl. Gl.B.9).

Aus den Gl. (B.15), (B.16) lassen sich d_p, e_p errechnen. Gl. (B.7) liefert den gesuchten Lösungsvektor \underline{p} im dreidimensionalen $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$ -System.



Figur B.1: Definitionen zur Berechnung des Schnittpunktes eines Vektors \underline{p}_g mit einem Ellipsoid.



Figur B.2: Darstellung der Verhältnisse in der durch die Hilfsvektoren $\underline{h}_5, \underline{h}_6$ aufgespannten Ebene.

APPENDIX C

BERECHNUNG DER GRÖSSE ℓ (AUSWIRKUNG DER KEGELFORM DES RADARSTRAHLES) IN GLEICHUNG 3.34

C.1 PROBLEMSTELLUNG

Gegeben sei der Schnittkreis vom Radius k_1 der Distanzkugel (Radius r) mit dem Planeten (Radius R). Das Radarsystem befindet sich in einer Höhe $k_2 = (s-h_1)$ über dem Mittelpunkt des Schnittkreises (s. Fig. 3.11). Der Geschwindigkeitsvektor des Radars bildet mit der Schnittebene den Winkel ρ (s. Gl. 3.33). Die Radarabbildung entsteht mittels Abbildungskegels mit Squintwinkel τ .

Gesucht ist die Größe ℓ (s. Fig. C.1).

C.2 LÖSUNG

Die Schnittebene zwischen Planeten und Distanzkegel schneidet den Abbildungskegel entlang einer Hyperbel. Laut Fig. C.2 gilt die Hyperbelgleichung:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (C.1)$$

Für den Schnittkreis vom Radius k_1 gilt:

$$(x-m)^2 + y^2 = k_1^2 \quad (C.2)$$

Die Größe ℓ ist gleich der x -Koordinate des Schnittpunktes (x_s, y_s) der beiden Kegelschnitte (C.1) und (C.2). Es gilt, die Parameter a, b der Hyperbel (C.1) zu bestimmen. Sind diese bekannt, so liegen mit:

$$m = k_2 \tan \rho \quad (C.3)$$

alle Bestimmungsstücke zur Berechnung des Schnittpunktes der Hyperbel und des Kreises vor.

Aus den Figuren C.1 und C.2 ist ersichtlich, daß für a gilt:

$$a = \sin \tau k_2 / \cos \rho \cos (\tau + \rho) \quad (C.4)$$

$$b = a \cot \bar{\tau} \quad (C.5)$$

Der Hilfswinkel $\bar{\tau}$ ist im Falle von $\rho = 0$ gleich dem Squintwinkel τ . Figur C.3 beschreibt den Zusammenhang zwischen τ und $\bar{\tau}$ für $\rho \neq 0$. Es gilt die Beziehung:

$$\cot \bar{\tau} = (\cot^2 \tau - \tan^2 \rho) / \cos \rho \quad (C.6)$$

Somit wird ℓ aus dem Schnitt der Gl. (C.1), (C.2) erhalten:

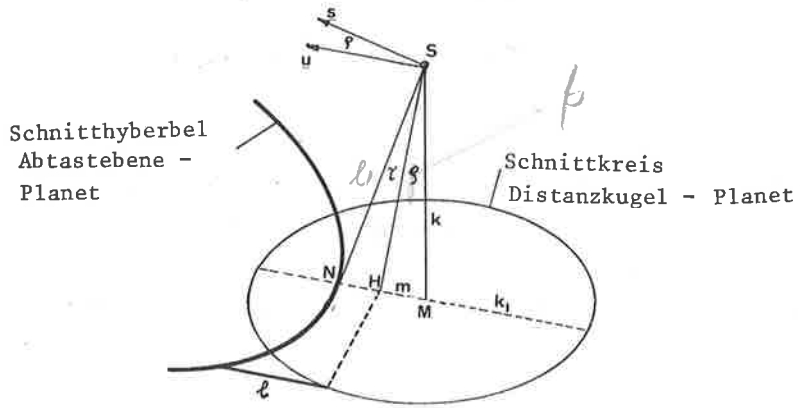
$$\ell = \sin^2 \bar{\tau} - m \pm (m^2 - (m^2 - b^2 - k_1^2) / \sin^2 \bar{\tau}) \quad (C.7)$$

Kann $\rho = 0$ gesetzt werden, so wird $m = 0, b = k_2, \bar{\tau} = \tau$ und

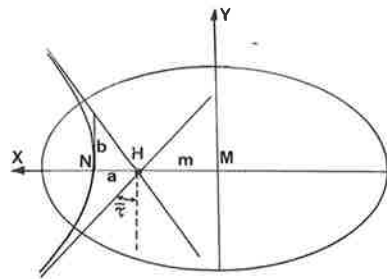
$$\ell = (k_1^2 + k_2^2) \sin \tau = r \sin \tau$$

Für eine Abbildung mittels Abtastebene ($\tau = 0$) wird $\bar{\tau} = 0$ und somit:

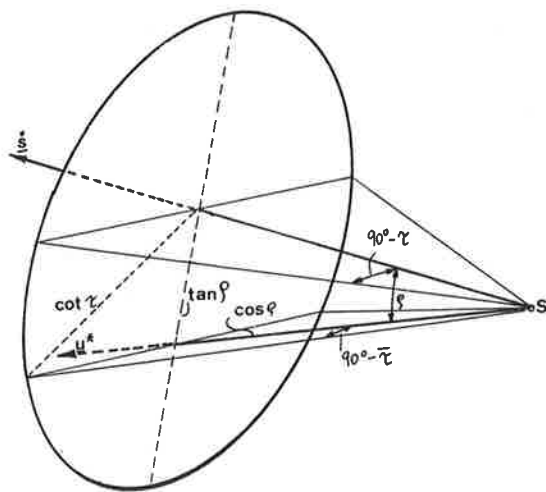
$$\ell = 0$$



Figur C.1: Definitionen zur Berechnung von l



Figur C.2: Definitionen der Schnitthyperbel Abtastkegel - Schnitt Ebene (Distanzkugel-Planet).



Figur C.3: Definition des Winkels τ

REFERENZEN

(Nicht radargrammetrisch)

- Blasius K. (1973): "A Study of Martian Topography by Analytic Photogrammetry", J.Geophysical R., Vol. 78
- Brown W.E. jr. et al. (1972): "Planetary Imaging Radar Study", Jet Propulsion Lab., Publ. No.701-145, Pasadena, Calif. 91103
- Bush T.F. and F.T. Ulaby (1975): "On the Feasibility of Monitoring Croplands with Radar", 10th Conf. Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan.
- Case J.B. (1967): "The Analytic Reduction of Panoramic and Strip Photography", Photogrammetria, Vol.22
- Cohen E. et al (1975): "An Earth and Ocean Synthetic Aperture Radar for Space Shuttle - User Requirements and Data Handling Implications", Proc. Nat. Telecommunications Conference, New Orleans, Louisiana.
- Cutrona J.L. (1962): "Synthetic Aperture Radar", in "Radar Handbook", edited by M.I. Skolnik, Mc Graw-Hill Book Company, New York
- Dallas S.S. (1973): "Use of an Ellipsoid as the Geometrical Model of a Planet", Jet Propulsion Lab., Publ. No. 392-117, Pasadena, California 91103
- Ebner H. (1973): "Zusätzliche Parameter in Ausgleichungen", Z.f. Vermessungswesen, 98.Jahrgang, Heft 9
- Ellermaier, R.D. and Simonett S. (1965): "Imaging Radars on Spacecraft as a Tool for Studying Earth", CRES Techn. Report 61-6, Univ. of Kansas, Lawrence, Kansas.
- Elms D.G. (1962): "Mapping with a Strip Camera", Photogramm.Eng., Vol XXVIII
- EOSPGD (1973): "Earth Observation Satellite Payload Discussion Group (EOSPDG) Final Report", NASA, Washington, D.C.
- Friedman L. and J. Rose (1973): "Venus Orbital Imaging Radar Study (VOIR)", Jet Propulsion Laboratory, Report No. 760-89, Pasadena, Calif. 91103
- Graham L.C. (1974): "Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping", Proc.IEEE, Vol.62, No. 6
- Hall D. (1973): "Digital Cartographic Compilation", in "A Compendium of Techn. Papers on Experiments in Cartography at Rome Air Development Center", Pres. XII Pan American Conf. on Cartography, Pan-American Inst.of Geography and History, Panama; by Air Force Systems Command, Rome Air Development Center, Griffiss Air Force Base, New York 13441
- Haymes R.C. (1971): "Introduction to Space Science", John Wiley & Sons Inc., New York
- Hein P. (1964): " Die "Superellipse, eine einfache Lösung eines allgemeinen Problems", Dansk Kunsthåndværk, H.4 (in dänischer Sprache).
- Hibler W.D. III et al. (1975): "Techniques for Studying Sea Ice Drift and Deformation at Sites far from Land Using LANDSAT Imagery", 10th Conf. Symp. Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan.
- Jancaitis J. and J. Junkins (1973: "Modeling Irregular Surfaces", Photogramm.Eng. ,Vol. XXXIX
- Kraus K. and E.M. Mikhail (1972): "Linear Least Squares Interpolation", Photogramm.Eng. ,Vol. XXXVIII.
- Kraus K. (1973): "Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützpunktgruppen", Z.f.Vermessungswesen, Vol. 98
- Leberl F. (1970a): "Verknüpfte Polynome zur Darstellung von Verzeichnungskurven", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 38
- Leberl F. (1975f): "Photogrammetric Interpolation", Photogramm. Eng., Vol. XLI

- Leberl F. (1976c): "Interpolation of a Surface from Sets of Discrete Height Data of Different Statistical Characteristics", Proc. Am.Soc. Photogrammetry, 42nd Annual Convention, Washington D.C.
- Mc Candless, S.W. (1975): "The U.S. Seasat Program", 10th Conf. Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan
- Makarovic B. (1973): "Digital Mono Plotters", ITC-Journal, 1973-4, Enschede, The Netherlands
- Manning B.N. and D.D. Hann (1967): "Some Simple Equations of Satellite Motion", Arizona Electronics Eng. Memo No. 267, Goodyear Aerospace Corp., AAP-26297, Litchfield Park, Arizona
- Martin G.L. (1961): "An Optical Correlator Configuration for the Squinted Mode", Arizona Aerophysics Eng. Memo. No. 90a, Goodyear Aerospace Corp., Litchfield Park, Arizona.
- Martin-Marietta Corp. (1974): "Venus Orbital Imaging Radar Technical Trade-Offs Study", Martin-Marietta Aerospace, Denver Division, Colorado, Contract JPL 953-766
- Matthews R.E. (ed.) (1975): "Active Microwave Workshop Report", NASA Special Report SP-376, Washington, C.D.
- Moore R.K. (1965): "Satellite Radar and Oceanography, An Introduction", in "Feasibility of Conducting Oceanographic Exploration from Aircraft", Proceedings, Woods Hole Oceanographic Inst., Massachusetts.
- Moritz H. (1973): "Least Squares Collocation", Deutsche Geodätische Kommission, Serie A, Nr. 75, München, W.-Deutschland
- Pinkwart E. (1938): "Die Umformung ungleichartiger Koordinaten in der Praxis", Allgemeine Vermessungsnachrichten
- Phillips R.J. u.a. (1973): "Apollo Lunar Sounder Experiment", Apollo 17 Preliminary Science Report, NASA Special Publ. SP-330, Washington, D.C.
- Puccinelli E.F. (1976): "Ground Location of Satellite Scanner Data", Photogrammetric Engineering, Vol. XLII, No. 4
- Richardus P. und R. Adler (1972): "Map Projections", North Holland Publishing Co., Amsterdam-London
- Rose J. and Friedman L. (1974): "A Design for a Venus Orbital Imaging Radar Mission", American Inst. of Aeronautics and Astronautics, AIAA-Paper No. 74-222
- Saunders R.S., L.D. Friedman and T.W. Thompson (1973): "Mission Planning for Remote Exploration of the Surface of Venus", American Inst. of Aeronautics and Astronautics, AIAA-Paper 73-580
- Schatz U. (1970): "Das Problem der optimalen Stützpunktdichte und der optimalen Maschengröße bei Transformationen ungleichartiger Koordinaten", Diss., Univ. Bonn, W.-Deutschland
- Schut G. (1970): "External Block Adjustment of Planimetry", Photogrammetric Eng., Vol. XXXVI
- Thompson C.H. u.a. (1974): "Orbital Earth Resources Radar Program Definition Study", Goodyear Aerospace Corp., Arizona Div., Contract NAS5-21956, Litchfield Park, Arizona
- Tietze W. (1972): "Zylinderabbildungen", in Westermanns Lexikon der Geographie, Westermann Verlag, Braunschweig
- Waldhäusl, P. (1974): "Funktionale Modelle der Streifen- und Blockausgleichungen mit einfachen und Spline-Polynomen für beliebiges Gelände", Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Sonderheft Nr. 26, Baden bei Wien
- Westinghouse (1974): "Spaceborne Synthetic Aperture Radar Pilot Study", Final Report, Contract No. NAS5-2;951, Westinghouse Electric Co., Systems Development Div., Baltimore, Maryland.
- Yaglom A.M. (1962): "Introduction to the Theory of Stationary Random Functions", Prentice Hall Inc.

BIBLIOGRAPHIE ÜBER RADARGRAMMETRIE
(Stand Mai 1976)

- Akowetzky W.I. (1968): "On the Transformation of Radar Coordinates into the Geodetic System", Geodezia i Aerofotosjomka.
- Ambrose W. (1967): "A Radar Image Correlation Viewer", Photogramm. Eng., Vol. XXXIII.
- Azevedo L. de (1971): "Radar in the Amazon", Proc. 7th Int.Symp.Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan.
- Bair G.L. and G.E. Carlson (1975): "Height Measurement with Stereo Radar", Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol. XLI.
- Bair L.G. and G.E. Carlson (1974): "Performance Comparison of Techniques for Obtaining Stereo Radar Images", IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-11.
- Berlin G.L., (1971): "Radar Mosaics", The Professional Geographer, Vol. XXIII, No. 1
- Bicknell T. et al. (1975): "A Study to Determine the Feasibility of Using Radar Techniques for Public Land Surveying", Jet Propulsion Laboratory Report under Contract to the Bureau of Land Management, Contract No. 53500-PH3-995, Pasadena, California.
- Bosman E. et al. (1971): "Project Karaka-The Transformation of Points from Side Looking Radar Images into the Map System", Final Report, Part 1, Netherlands Interdepartmental Working Community for the Application and Research of Remote Sensing Techniques (NIWARS), Delft.
- Bosman E.R., E. Clerici, D.Eckhart, K. Kubik (undated): "Project BEBLOKA-The Transformation of Points from Overlapping Images Obtained with Different Sensors into the Map System", Final Report, Netherlands Interdepartmental Working-Community for the Application and Research of Remote Sensing Techniques (NIWARS), Delft.
- Bosman E.R., E. Clerici, D.Eckhart, K. Kubik (1972a): "Transformation of Points from Side-Looking-Radar Images into the Map System", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 42, No. 2
- Bosman E.R., E. Clerici, D.Eckhart, K.Kubik (1972b): "KARIN-A Program System for the Mapping of Remote Sensing Information", Pres. Paper, 12th Congress, Int.Soc. Photogrammetry, Ottawa, Canada; and Final Report, Netherlands, Interdepartmental Working Community for the Application and Research of Remote Sensing Techniques (NIWARS), Delft.
- Carlson G.E. (1973): "An Improved Single Flight Technique for Radar Stereo", IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-11, No. 4.
- Claveloux B.A. (1960): "Sketching Projector for Side Looking Radar Photography", Photogramm. Eng., Vol. XXVI.
- Crandall C.J. (1963): "Advanced Radar Map Compilation Equipment", Photogramm. Eng., Vol. XXIX.
- Crandall C.J. (1969): "Radar Mapping in Panama", Photogramm. Eng., Vol. XXXV.
- Dalke G. et al. (1968): "Regional Slopes with Non Stereo Radar", Photogramm.Eng., Vol. XXIV.
- DBA Systems (1974): "Research Studies and Investigations for Radar Control Extensions", DBA Systems, Inc., P.O. Drawer 550, Melbourne, Florida, Defense Documentation Center Report No.530784L.
- Derenyi E.E. (1970): "An Exploratory Investigation into the Relative Orientation of Continuous Strip Imagery", Ph.D. Thesis and Research Report No. 8, Univ. of New Brunswick, Canada.
- Derenyi E.E. (1972): "Geometric Consideration in Remote Sensing", Proc. First Canadian Symp. on Remote Sensing, Ottawa.
- Derenyi E.E. (1974a): "SLAR Geometric Test", Photogramm. Eng., Vol. XL.

- Derenyi E.E. (1974b): "Metric Evaluation of Radar and Infrared Imageries", Second Canadian Symp. on Remote Sensing, Univ. of Guelph, Guelph, Ontario.
- Derenyi E.E. (1975a): "Topographic Accuracy of Side Looking Radar Imagery", Bildmessung und Luftwesen, 1975, No. 1.
- Derenyi E.E. (1975b): "Terrain Heights from SLAR Imagery", pres. at the 41st Annual Conv. Am.Soc. Photogramm., Washington, D.C., March.
- DiCarlo C. et al. (1968): "All Weather Mapping", Presented Paper, International Congress of Surveyors (FIG), London, England.
- DiCarlo C. et al. (1971): "DoD Data Processing Equipment for Radar Imagery", Pres. Paper, Int. Congress of Surveyors, Wiesbaden.
- Dowideit G. (1975): "A Simulation System for Theoretical Analysis of Radar Restitution and a Test by Adjustment", Proc. Symp. Comm. III, Int. Soc. Photogramm., Stuttgart, W.Germany, in Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B., Heft No. 214.
- Egbert E. (1969): "Calculation of Ground Street Lengths and Area from Radar Measurements", Simonnett, D.S., (ed.), "The Utility of Radar and Other Remote Sensors in Thematic Land Use Mapping from Spacecraft", Annual Report, U.S. Geolog. Survey Interagency Report-NASA 140.
- Esten R.D. (1953): "Radar Relief Displacement and Radar Parallax", USAERDL-Report No. 1294, Ft. Belvoir, Virginia.
- Fiore C. (1967): "Side Looking Radar Restitution", Photogramm. Eng., Vol. XXXIII.
- Geier F. (1971): "Beitrag zur Geometrie des Radarbildes", Diss., Techn. Univ., Graz.
- Geier F. (1972): "Fundamentals of Orientation for Radar PPI Images with Approximated Horizontal Distances", Pres.Paper, 12th Congress, Int. Soc. Photogramm., Ottawa, Canada.
- Glushkov W.M. et al. (1972): "Toros-Side Looking Radar System and its Application for Sea Ice Condition Study and for Geologic Explorations", Pres. Paper, 12th Congress, Int. Soc. Photogramm., Ottawa, Canada.
- Goodyear (1972): "Flight Test Report All-Weather Topographic Mapping System AN/ASQ-142", Contract No. F 33657-70-C-0769, Goodyear Aerospace Corp., Litchfield Park, Arizona.
- Goodyear (1974): "Preliminary Imagery Data Analysis Goodyear Electronic Mapping System (GEMS)", Goodyear Aerospace Corp., Report GIB-9342, Code 99696.
- Gracie G. et al. (1970): "Stereo Radar Analysis", U.S. Engineer. Topographic Laboratory, Ft. Belvoir, Virginia. Report No. FTR-1339-1.
- Gracie G. and E.D. Sewell (1972): "The Metric Quality of Stereo Radar", Proc. of the Techn.Program, Electro-Optical Systems Design Conference, New York, 12-14 Sept.
- Graham L.C. (1970): "Cartographic Applications of Synthetic Aperture Radar", Proc. Am.Soc.Photogramm., 37th Annual Meeting; and Goodyear Aerospace Corp., Report GERA-1626.
- Graham L. (1972): "An Improved Orthographic Radar Restitutor", Presented Paper, 12th Congress, Int. Soc. Photogramm., Ottawa, Canada, and Goodyear Aerospace Corp., Report GERA-1831.
- Graham L. and H.O. Rydstrom (1974): "Synthetic Aperture Radar Applications to Earth Resources Development", Goodyear Aerospace Corp., Report GERA-2010, Code 99696.
- Graham L.C. (1975a): "Geometric Problems in Side-Looking Radar Imaging", Proc. Symp. Comm. III, Int. Soc. Photogramm.; Stuttgart, W.Germany, in Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft No. 214.

- Graham L. (1975b): "Flight Planning for Stereo Radar Mapping", Proc. Am.Soc. Photogramm., 41st Meeting, Washington, D.C.
- Greve C. and W. Cooney (1974): "The Digital Rectification of Side Looking Radar", Proc.Am.Soc. Photogramm., Annual Convention, Wash., D.C.
- Hirsch Th. and J. van Kuilenburg (1976): "Preliminary Tests of the EMI-SLAR Mapping Quality", Netherlands Interdepartmental Working Community for the Appli. and Res. of Remote Sensing (NIWARS), Internal Report No. 39, Delft.
- Hockeborn H.A. (1971): "Extraction of Positional Information from Side Looking Radar", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 39, No. 1.
- Hoffmann P. (1958): "Photogrammetric Applications of Radar Scope Photographs", Photogramm. Eng., Vol. XXIV.
- Hohenberg F. (1950): "Zur Geometrie des Funkmessbildes", Austrian Academy of Sciences, Math.-Naturwissenschaftliche Klasse, Vienna, Vol. 2-3.
- Jensen H. (1972): "Mapping with Coherent-Radiation Focused Synthetic Aperture Side-Looking Radar"., in "Operational Remote Sensing: An Interactive Seminar to Evaluate Current Capabilities", Am. Soc., Photogramm.
- Jensen H. (1975): "Deformations of SLAR Imagery-Results from Actual Surveys", Proc.Symp. Comm.III, Int.Soc. Photogramm., Stuttgart, W.Germany, in Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft No. 214.
- Kober C.L. et al. (1950): "Determination of Target Height from Radar PPI-Photographs", Air Force Techn. Report No. 6500, Wright Air Development Center, Ohio.
- Konecny G. and E.E. Derenyi (1966): "Geometric Consideration for Mapping from Scan Imagery", Proc. 4th Symp. Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan.
- Konecny G. (1970): "Metric Problems in Remote Sensing", Publications of the International Institute for Aerial Surveying and Earth Sciences (ITC), Series A, No. 50, Delft.
- Konecny G. (1971): "Orientierungsfragen bei Streifenbildern und Aufnahmen der Infrarotabtastung", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 41, No. 1.
- Konecny G. (1972a): "Geometrical Aspects of Remote Sensing", Arch. Int.Soc. Photogramm., Invited Paper, 12th Congress, Ottawa, Canada.
- Konecny G. (1972b): "Geometrische Probleme der Fernerkundung", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 42. No. 2
- Konecny G. (1975): "Approach and Status of Geometric Restitution for Remote Sensing Imagery", Pro. Symp. Comm. III, Int.Soc.Photogramm.; Stuttgart, W.Germany, in Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft No. 214.
- Koopmans B. (1974): "Should Stereo SLAR Imagery be Preferred to Single Strip Imagery for Thematic Mapping?", ITC-Journal 1974-3, Enschede.
- Korneev IU. N.(197-): "Analytical method for photogrammetric processing of a single radar photograph", Geodezia i Aerofotosjomka, No. 2 .
- LaPrade G.L. (1963): "An Analytical and Experimental Study of Stereo for Radar", Photogramm.Eng., Vol. XXIX.
- LaPrade G.L. et al. (1969): "Elevations from Radar Imagery", Photogramm. Eng., Vol. XXXV.
- LaPrade G.L. (1970): "Subjective Considerations for Stereo Radar", Goodyear Aerospace Corp., Report GIB-9169, and Photogramm.Eng.

- LaPrade G.L. (1975): "Radar Signature of Inverted Catenary with Equilateral Triangular Cross Section (St. Louis Gateway Arch)", Arizona Electronics Eng. Memo. No. 525, Goodyear Aerospace Coop., Arizona Div., Litchfield Park, Arizona.
- Leberl F. (1970b): "Metric Properties of Imagery Produced by Side Looking Airborne Radar and Infrared Line Scan Systems", Publications of the International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC), Series A, No. 50, Delft
- Leberl F. (1971a): "Vorschläge zur instrumentellen Entzerrung von Abbildungen mit Seitwärts Radar (SLAR) und Infrarotabtastsystemen", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 39.
- Leberl F. (1971b): "Remote Sensing-Neue Methoden zur Wahrnehmung auf Abstand", Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, No. 6.
- Leberl F. (1971c): "Untersuchungen über die Geometrie und Einzelbildauswertung von Radarschrägaufnahmen", Diss., Techn.Univ.,Wien.
- Leberl F. (1972a): "Evaluation of Single Strips of Side Looking Radar Imagery", Arch.Int.Soc.Photogrammetry, Invited Paper, 12th Congress, Ottawa, Canada.
- Leberl F. (1972b): "On Model Formation with Remote Sensing Imagery", Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, No. 2.
- Leberl F. (1972c): "Radargrammetria para los Interpretas de Imagenes", Centro Interamericano de Fotointerpretacion, (CIAF), Bogota, Colombia.
- Leberl F. (1974): "Evaluation of SLAR Image Quality and Geometry for PRORADAM", ITC-Journal, Vol.2, No. 4, Enschede.
- Leberl F. (1975a): "The Geometry of, and Plotting from, Single Strips of Side Looking Airborne Radar Imagery", International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC) Technical Report No. 1, Enschede.
- Leberl F. (1975b): "Radargrammetry for Image Interpreters", ITC Techn. Report No.2, Enschede.
- Leberl F. (1975c): "Radargrammetric Point Determination PRORADAM", Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 45, No. 1.
- Leberl F. (1975d): "Sequential and Simultaneous SLAR Block Adjustment", Photogrammetria, Vol.31, No. 1
- Leberl F. (1975e): "Lunar Radargrammetry with ALSE-VHF Imagery", Proc. Am. Soc. Photogramm., Fall Tech. Meeting, Phoenix, Arizona.
- Leberl F., T. Farr, L. Bryan, C. Elachi (1976): "Study of Arctic Sea Ice Drift from L-Band Side Looking Radar Imagery", Proc. Am.Soc. Photogramm., 42nd Annual Conv., Washington, D.C.
- Leberl F. (1976a): "Mapping of Lunar Surface from Side-Looking Orbital Radar Images", The Moon, Vol. 15, No. 3/4
- Leberl F. (1976b): "Imaging Radar Applications to Mapping and Charting", Int.Soc.Photogrammetry, 13th Congress, Helsinki, Finland.
- Leberl F., H. Jensen and J. Kaplan (1976): "Side-Looking Radar Mosaicking Experiment", Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol. XLII
- Leonardo E. (1959): "An Application of Photogrammetry to Radar Research", Photogramm. Eng., Vol. XXV.

- Leonardo E. (1963): "Comparison of Imaging Geometry for Radar and Photographs", Photogramm. Eng., Vol. XXXIX.
- Leonardo E. (1964): "Capabilities and Limitations of Remote Sensors", Photogramm. Eng., Vol. XXX.
- Levine D. (1960): "Radargrammetry", MacGraw-Hill Book Company, New York.
- Levine D. (1963): "Principles of Stereoscopic Instrumentation for PPI-Photographs", Photogramm. Eng., Vol. XXX.
- Levine G. (1965): "Automatic Production of Contour Maps from Radar Interferometric Data", Pres. Paper, Fall Tech. Meeting, Am. Soc. Photogramm., Dayton, Ohio.
- Lewis A.J. and H.C. MacDonald (1970): "Interpretive and Mosaicking Problems of SLAR Imagery", Remote Sensing of Environment, Vol. 1, No. 4
- Loelkes G.L. (1965): "Radar Mapping Imagery-Its Enhancements and Extraction for Map Construction", Pres. Paper, Fall Tech. Meeting, Am. Soc. Photogramm., Dayton, Ohio.
- Luchininov V.S. (1975): "Contactless Radar Mapping of Warm Valley Glaciers-Transformation of Radar Coordinates", Transl. from Russian in Soviet Physics-Technical Physics, Vol. 20, No. 4, 1976.
- Maccia R.P. (1957): "Radar Presentation Restitutor", Photogramm. Eng., Vol. XXIII.
- Manual of Photogrammetry (1966): "Photogrammetric and Radargrammetric Techniques", Vol. II, 3rd Ed.
- Masry S.E., E.E. Derenyi, B.G. Crawley (1976): "Photomaps from Non-Conventional Imagery", Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol. XLII, No. 4.
- Miranda A. (1970): "Radar Stereo Equipment", Goodyear Aerospace Corporation, Report GIB-9198.
- Moore R.K. (1969): "Heights from Simultaneous Radar and Infrared", Photogramm. Eng., Vol. XXXV.
- Moreira H.F. (1973): "Project RADAM-Remote Sensing Application to Environment Analysis of Amazon Region", 2nd Annual Remote Sensing of Earth Resources Conference, Univ. of Tennessee Space Inst., Tullahoma, Tennessee.
- Norvelle F.R. (1972): "AS-11-A Radar Program", Photogramm. Eng., Vol. XXXVIII.
- Peterson R.K. (1976): "Radar Correlator Geometric Control", Goodyear Aerospace Report GIB 9397, Litchfield Park, Arizona; Pres. Paper, 13th Cong. Int. Soc. Photogramm., Helsinki, Finland.
- Protherse W.M. et al. (1950): "The Geometry of the Radarscope", Techn. Paper, No. 107, Mapping and Charting Laboratory, Ohio State Univ., Ohio.
- Raytheon Co. (1973): "Digital Rectification of Side-Looking Radar (DRESLR)", Final Report, Raytheon Co., Automatic Operation, Proep. for U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia 22060, Report No. ETL-CR-73-18.
- Rinner K. (1948): "Die Geometrie des Funkmessbildes", Austrian Academy of Sciences, Math. Naturwiss. Klasse, also in: "Handbuch der Vermessungskunde", Jordan-Eggert-Kneissl, Vol. VI, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Roessel J. van and R. de Godoy (1974): "SLAR Mosaics for Project RADAM", Photogramm. Eng., Vol. XL.
- Rosenfield G.H. (1968): "Stereo Radar Techniques", Photogramm. Eng., Vol. XXXIV.
- Rydstrom H.C. (1968): "Radargrammetric Applications of the Right Angle Solution Nomogram", Goodyear Aerospace Corp., Report GIB 9124, Litchfield Park, Arizona.
- Scheps B.B. (1960): "To Measure is to Know-Geometric Fidelity and Interpretation in Radar Mapping", Photogramm. Eng., Vol. XXVI.
- Schertler R.J. et al. (1975): "Great Lakes All-Weather Ice Information System", Proc. 10th Symp. Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Mich.
- Schreiter J.B. (1950): "Strip Projection for Radar Charting", Techn. Paper No. 130, Mapping and Charting Laboratory, Ohio State Univ., Ohio.
- Smith H.P. (1948): "Mapping by Radar-The Procedures and Possibilities of a New and Revolutionary Method of Mapping and Charting", U.S. Air Force, Randolph Field, Texas.

Stilwell J.E. (1963): "Radar Network Adjustment", Photogramm. Eng., Vol. XXIX.

Super A.D. et al. (1975): "Remote Sensing Applied to the International Ice Patrol", Proc. 10th Symp. on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Mich.

Tiernan M. et al. (1976): "Lunar Cartography with the Apollo 17 ALSE Radar Imagery", The Moon, Vol. 15, Nos. 1/2.

Thomann G.C. (1969): "Acoustic Simulation of Stereo Radar", Techn. Mem. No. 133-8, CRES, Univ. of Kansas, Lawrence, Kansas.

Thomann G. (1969): "Distance Computation on Radar Film", Simonnett, D.G. (ed.), "The Utility of Radar and Other Remote Sensors in Thematic Land Use Mapping from Spacecraft", Annual Report, U.S. Geological Survey Interagency Report, NASA-140.

Thompson T.W. et al. (1972): "Progress Report on 25 cm Radar Observations of the 1971 AIDJEX Studies", Arctic Ice Dynamics Joint Experiment (AIDJEX) Bulletin, No. 12, Univ. of Wash., Seattle, Wash.

Yoritomo K. (1965): "All Weather Mapping", Presented Paper, Fall Technical Meeting, Soc. Photogramm., Dayton, Ohio.

Yoritomo K. (1972): "Methods and Instruments for the Restitution of Radar Pictures", Arch. Int. Soc. Photogramm., Inv. Paper, 12th Congress, Ottawa, Canada.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Analyse geometrischer Gesichtspunkte ist ein wesentliches Element von Satellitenradarprojekten. Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis einer umfassenden Untersuchung radargrammetrischer Aspekte von Satellitenradaraufnahmen und ist durch den Plan der U.S. Raumfahrtbehörde motiviert, in naher Zukunft eine Reihe von Radar-Satelliten in eine Umlaufbahn um die Erde zu senden. Weiterer Anlaß des Forschungsunternehmens sind geplante Satellitenradarprojekte für die Kartierung des wolkenbedeckten Planeten Venus und für eine Reihe geowissenschaftlicher Experimente im Rahmen von Space-Shuttle-Flügen.

Der Bericht orientiert sich im wesentlichen an den drei radargrammetrischen Einheiten des Einzelbildes, des Stereomodelles und des Bildverbandes. Einleitend wird auf einige Besonderheiten eines Satellitenradarsystemes und auf jene radargrammetrischen Begriffe eingegangen, die Raumfahrt- und Flugzeugradar voneinander unterscheiden. Daran schließt eine Analyse der ersten radargrammetrischen Grundeinheit, nämlich der einzelnen Satellitenradarschrägaufnahmen, an.

Die Untersuchung von Stereoradar betrifft zwei unterschiedliche Problemgebiete: die Geometrie eines Radarstereomodelles sowie die Verschmelzung von Stereoradar- und Altimetriedaten. Die weitgehend theoretische Behandlung dieser Problemgebiete wird durch eine experimentelle Analyse der bisher einzigen Satellitenradarbilder vervollständigt, die während der Apollo 17 Mission von Teilen der Mondoberfläche aufgenommen wurden.

Schließlich wird die radargrammetrische Ausgleichung von Gruppen überlappender Bildstreifen sowohl theoretisch wie auch experimentell untersucht. Der experimentelle Teil beruht auf Computersimulation und einigen praktischen Ergebnissen mit Flugzeugradarbildern.

Eine wesentliche Aufgabe des ersten Seitwärts-Radarsystemes in einem Erdsatelliten, nämlich SEASAT-A, wird in der Vermessung der polaren Eiskappen bestehen. Zur Vorbereitung auf diese Aufgabe wurden Eiskartierungen mittels Flugzeugradar durchgeführt. Die bisherigen Ergebnisse dieser Kartierungen werden in einem abschließenden Abschnitt dieses Berichtes beschrieben.

ABSTRACT

A significant element of satellite radar projects consists of the derivation of geometric information. This report presents an attempt to comprehensively investigate the geometry of satellite radar images and their application to mapping tasks. It is motivated by the plan of the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) to launch in the near future a series of Earth satellites carrying synthetic aperture imaging radar systems. There are also advanced plans for the exploration of planet Venus using satellite imaging radar. A geoscience imaging radar might also be used on board the Space Shuttle.

The investigation essentially addresses the radargrammetric units of the single image, the stereo model, and the image block. But in an initial chapter some peculiarities of spaceborne radar and those radargrammetric concepts will be discussed that set the satellite radar apart from the airborne. Only after this discussion will the first radargrammetric unit, namely the single radar image, be treated.

Stereo radar is then studied by evaluating the geometry of the individual radar stereo model and by an attempt to merge stereo radar measurements with independent external altimetry data. The largely theoretical treatment is complemented by a series of numerical experiments with the Apollo

17 ALSE data which represent the only satellite radar images that are thus far available.

The radargrammetric adjustment of blocks of overlapping radar image strips is the topic of subsequent theoretical and experimental analyses. This is based on computer simulations and practical results from aircraft radar images.

An important task of the first side-looking radar on an Earth satellite will consist of mapping the polar ice. In preparation for this task, arctic ice surveys were carried out by means of airborne radar. The radargrammetric results that have thus far been obtained are described in a final chapter of this report in order to exemplify a major radargrammetric task ideally suited for future Earth orbiting radar satellites.

DANK

Die Untersuchungen für diesen Bericht fanden im Rahmen eines Forschungsauftrages statt, den ich in den Jahren 1974-1976 von der U.S. National Academy of Sciences-National Research Council (NAS-NRC) erhielt. Für diese Förderung bin ich der NAS-NRC und dem Verwalter des Programmes, Herrn Dr. H. Lucien, zu tiefem Dank verpflichtet. Die Arbeit wurde in der Space Sciences Division des Jet Propulsion Laboratory (JPL) ausgeführt und ist durch rege Zusammenarbeit mit mehreren JPL-Mitarbeitern stimuliert, im besonderen durch meinen Scientific Advisor, Herrn W. Brown, jr., durch Dr. Charles Elachi, Dr. M. Leonard Bryan, sowie den Herren Tom Bicknell und Tom Farr. Herr Homer Jensen von Aero Service in Philadelphia, Pennsylvania, stellte Radarbildmessungen bereit, die Firma Teledyne-Geotronics in Long Beach, Kalifornien, und Herr Sherman Wu vom U.S. Geological Survey in Flagstaff, Arizona, gewährten mir Zeit an photogrammetrischen Instrumenten.

Die Arbeit wurde ursprünglich in meinem durch lange Auslandsaufenthalte beeinträchtigten Deutsch abgefaßt. Herrn Prof. DDr. Rinner gebührt mein tiefer Dank für die große Mühe, die er für die kritische Lektüre des Manuskripts und Stilverbesserungen der Darstellung aufgebracht hat. Frau D. Leising bewundere ich wegen ihrer Fähigkeit, auch aus dem chaotischsten Manuskript eine attraktive Reinschrift herzustellen. Ich möchte diesen Bericht meiner Frau Traudl widmen -- sie ertrug mit Geduld und Verständnis Perioden sehr beschränkten Familienlebens und ermöglichte durch ihre Mitarbeit die Abfassung dieser Arbeit in deutscher Sprache.

Franz Léberl