

ÜBER DIE STEREOBETRACHTUNG VON RADARBILDERN

F. Leberl, Graz

ZUSAMMENFASSUNG

Die Stereobetrachtung überlappender Radarbilder kann die Verwendbarkeit dieser Daten in erdwissenschaftlichen Fragestellungen verbessern. Es stellt sich jedoch die Frage, wie die Qualität des Stereoeffektes zu beurteilen ist, da die Radarprojektion von jener wesentlich abweicht, die dem menschlichen Sehen zugrunde liegt. Der vorliegende Aufsatz versucht, diese Qualität mit der Definition eines Stereoüberhöhungskoeffizienten zu beurteilen. Dieses Konzept wird auf eine Reihe von aktuellen Radarstereomodellen angewendet.

ABSTRACT

Stereo-viewing of overlapping radar images can enhance the usefulness of these data in geoscience applications. There is, however, the question of evaluating the stereo effect, since radar projections deviate from those on which human vision is based. This paper examines the stereo quality of radar with the help of an exaggeration coefficient. This is applied to a series of available radar stereo models.

1. EINLEITUNG

1.1 Stereobetrachtung

Der Stereoeffekt ist ein wesentliches Hilfsmittel der Photointerpretation, wie auch ein zentrales Element photogrammetrischer Meßarbeit. In der Photointerpretation erhält der menschliche Betrachter ein dreidimensionales Raum-Modell des Objektes zur subjektiven Analyse, welches gegenüber nur zweidimensionaler Betrachtung wesentlich inhaltsreicher ist. In der photogrammetrischen Messung dient der Stereoeffekt der präzisen Identifizierung homologer Bilddetails in Überlappungszonen zweier Bilder zur nachfolgenden Ermittlung von dreidimensionalen Koordinaten.

Der Begriff des Stereoeffektes hat eine lange Geschichte und es bestehen heute für die photogrammetrische Bildmessung ausformulierte Erklärungsmodelle (RINNER und BURKHARDT, 1971). S t e r e o bezieht sich dabei auf die getrennte visuelle Wahrnehmung zweier überlappender Bilder durch das rechte und linke Auge eines Beobachters, sodaß in seinem Gehirn ein drei-dimensionaler Raumeindruck entsteht. Demgegenüber wird das direkte Betrachten unserer Umwelt mit zwei Augen mit n a t ü r l i c h e m r ä u m l i c h e m S e h e n oder b i n o k u l a r e m S e h e n bezeichnet.

Mit Stereo kann unter Umständen auch die rechnerische Erzeugung dreidimensionaler Koordinaten aus zwei Gruppen monokularer Bildkoordinatenmessungen bezeichnet werden.

Der Theorie und Praxis photogrammetrischer Stereomessung liegt das zentralperspektive Meßbild aus einer Kamera zugrunde. Die Zentralperspektive des Auges und das natürliche räumliche Sehen werden im Stereofall durch ebenfalls zentralperspektivische Abbildungen simuliert, wie dies in Abbildung 1 dargestellt ist.

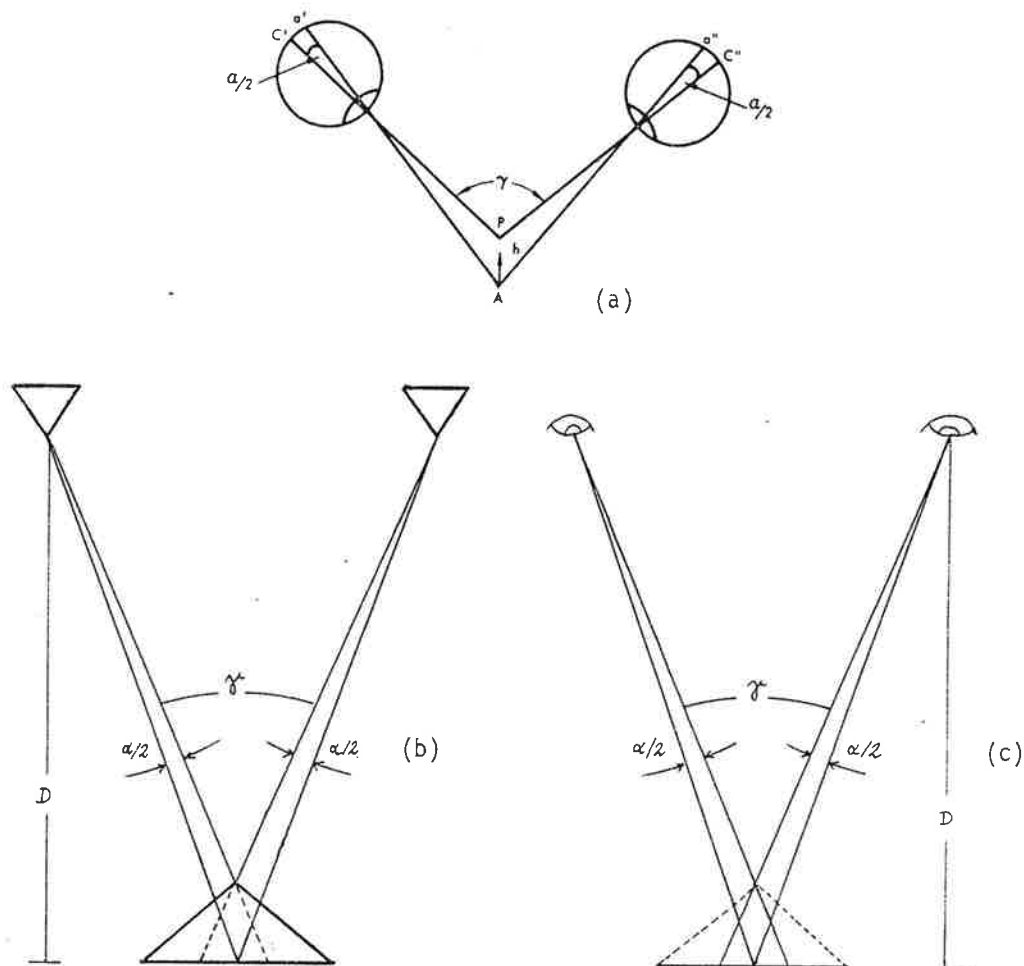


Abbildung 1: (a) Binokulares Sehen; α ...parallaktischer Winkel; (b) Erzeugung eines Stereobildpaares; (c) Stereoskopische Betrachtung (nach LAPRADE u.a., 1980).

1.2 Radarstereo

Die Kamera ist nicht die einzige bilderzeugende Vorrichtung für die Bildmessung. Schon 1948 hat als erster RINNER (1948) den Begriff der Funkbildmessung eingeführt und angeregt, mittels Radarbildern Meßaufgaben zu lösen. Im Jahre 1960 prägte LEVINE (1960) den Begriff der *R a d a r g r a m m e t r i e*, der heute im Zusammenhang mit der Herstellung kleinmaßstäbiger Karten ganzer Länder aus Radarbildern durchaus eine gewisse Bedeutung erlangt hat. Während RINNER (1948) noch die komplexere Geometrie des Radarrundbildes untersuchte, hat sich heute das geometrisch und radiometrisch höher auflösende Seitensicht radar für die Radargrammetrie durchgesetzt (engl.: Side-Looking Radar, SLR).

Die Frage wird nun stets wichtiger, ob, unter welchen Umständen und mit welchem Erfolg auch Radarbilder der Stereobetrachtung dienen können. Die Literatur zu diesem Thema beginnt mit LAPRADE (1963, 1970), und wurde von GRAHAM (1975) und LEBERL (1975, 1978, 1979) weitergeführt. Die rechnerische Stereoauswertung von homologen Bildpunkten, also nicht das Stereosehen, sondern die Berechnung des Schnittpunktes zweier homologer Projektionslinien wurde von INNES (1964), ROSENFELD (1968), GRACIE u.a. (1970), DBA Systems (1964), GOODYEAR (1974), DERENYI (1975), LEBERL (1972, 1975, 1978) diskutiert. Die Mehrzahl der Arbeiten entstand somit in Amerika, jedoch sind darunter Aussagen zur Stereobetrachtung kaum zu finden.

Für den Betrachter unterscheidet sich Radarstereo nicht vom photographischen Fall. Trotz der gänzlich unterschiedlichen Projektionsgeometrien empfindet der Betrachter einen Raumeindruck auf Grund der wahrgenommenen Parallaxenunterschiede im Gesichtsfeld. Diese werden gewöhnlich bei Radarbefliegungen durch zwei Flugstreifen erhalten, die mit den Fluglinien entweder zu einer Seite des Überlappungsgebietes zum sogenannten *s e l b s e i t i g e n*, oder bei zwei Fluglinien mit dem Überlappungsgebiet dazwischen zum *b e i d s e i t i g e n* Stereofall führt (siehe z.B. LEBERL, 1978). Es wären auch andere Flugarrangements denkbar, die ebenfalls zu Parallaxenunterschieden führen können, wie kreuzweise Fluglinien usw., aber zu einer ernsthaften Untersuchung dieser Fälle besteht kein Anlaß. Wohl wurde in der Literatur die Möglichkeit diskutiert, zwei sinnvoll überlappende Radarstereobildpaare aus einer Fluglinie zu erhalten, indem mit zwei Antennen nach vor und hinten abgebildet wird (LEBERL, 1972, CARLSON, 1973, BAIR und CARLSON, 1974, 1975). Dies ist nur mit dem heute weniger verwendeten realen Apertur - Radar möglich, hat aber wegen der dafür notwendigen Geräteentwicklung kaum Aussichten auf eine Realisierung.

1.3 Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit versucht, über frühere theoretische Radarstereoanalysen mit Fehlerfortpflanzungsmodellen hinauszugehen und nunmehr die subjektive Stereobetrachtung qualitativ zu beschreiben. Hierzu wird ein Stereoüberhöhungskoeffizient q definiert, der in der herkömmlichen zentralperspektiven Bildmessung bekannt ist. Dieser wird auf Radarstereo erweitert und auf verschiedene Stereomodelle angewendet. Es stehen Daten eines 3 cm Radar von Goodyear, eines 25-cm Radar des Jet Propulsion Laboratory, 200 cm Gerätes der Apollo-17 Mission zum Mond, eines Satellitenradar mit 25 cm Wellenlänge aus der SEASAT-Mission und mit 3-cm Wellenlänge von Motorola zur Verfügung.

Nicht alle vorhandenen Bildpaare können stereoskopisch betrachtet werden. Der vorhandene Datensatz läßt nur sehr allgemeine Zusammenhänge zwischen Aufnahme und Stereobetrachtung herstellen. Eine klare Abgrenzung all jener Aufnahmedispositionen, in denen Stereobetrachtung ermöglicht wird, sollte festgelegt werden. Hierzu sind die vorhandenen Daten unzureichend. Weitere Untersuchungen müssen hierfür noch vorgesehen werden.

2. ÜBERHÖHUNGSFAKTOR BEI STEREOBETRACHTUNG

2.1 Zentralperspektive Bilder

Es ist wohlbekannt, daß das monokulare Messen eines Punktes in einem

einzelnen Bild einen Winkelfehler im Auge von etwa 60" verursacht; würde man daher in überlappenden Bildern denselben Punkt monokular messen, so ist ein Messfehler der Parallaxe von sicherlich mehr als 60" zu erwarten. Demgegenüber ist der minimal wahrzunehmende Konvergenzwinkel bei binokularem Sehen nach LAPRADE u.a.(1980) etwa 3" bis 20" im Auge. Die Stereomessung ist daher eine unabdingbare Forderung bei der Erfassung homologer Punkte in überlappenden Bildern, unabhängig davon, ob der dabei entstehende Raumeindruck gut ist oder nicht.

Ein guter Raumeindruck ist mit dem sogenannten Überhöhungsfaktor q zu beschreiben. LAPRADE u.a.(1980) diskutieren diesen Begriff im einzelnen für die zentralperspektivische Photographie.

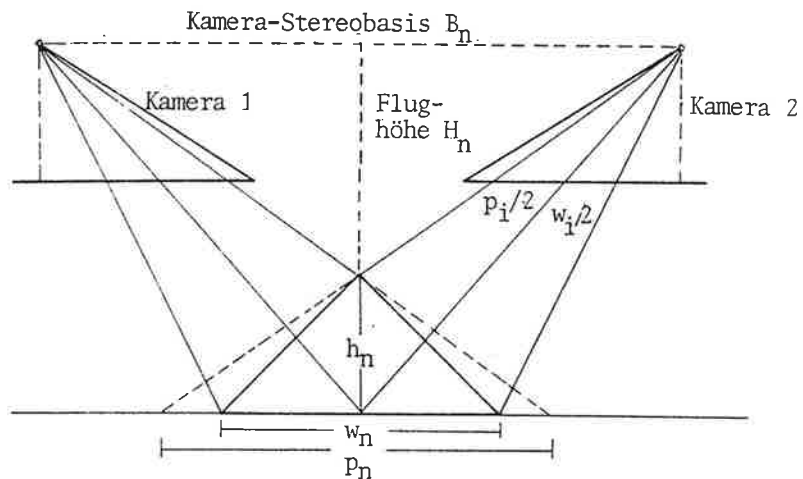


Abbildung 2: Erzeugung eines Stereomodelles mit einer Kamera

Abbildung 2 beschreibt die Erzeugung des Stereobildpaares mit zwei Kamerapositionen. Als für die Definition von q zu verwendendes Objekt wird eine Pyramide mit der Höhe h_n und der Basisbreite w_n vorgegeben. Im Bild treten die Radialverschiebungen $p_i/2$ und die Basisbreite w_i auf.

Abbildung 3 zeigt nun die stereoskopische Betrachtung der photographischen Abbildungen. Im Stereomodell wird eine Pyramide der Höhe h_s und Basisbreite w_s wahrgenommen. Der Wert h_s/w_s ist ein Ausdruck dafür, wie flach das Objekt erscheint.

Wir definieren nun nach LAPRADE u.a. (1980) den Überhöhungsfaktor q als:

$$q = (h_s / w_s) / (h_n / w_n) \quad \dots \dots (1)$$

Hierfür soll durch Umformungen ein vom konkreten Objekt, nämlich der Pyramide, unabhängiger Ausdruck erhalten werden. Dazu bilden wir nach Abbildung 2

$$\begin{aligned} dp_n / w_n &= dp_i / w_i, \\ dp_n' / h_n &= B_n / H_n, \end{aligned}$$

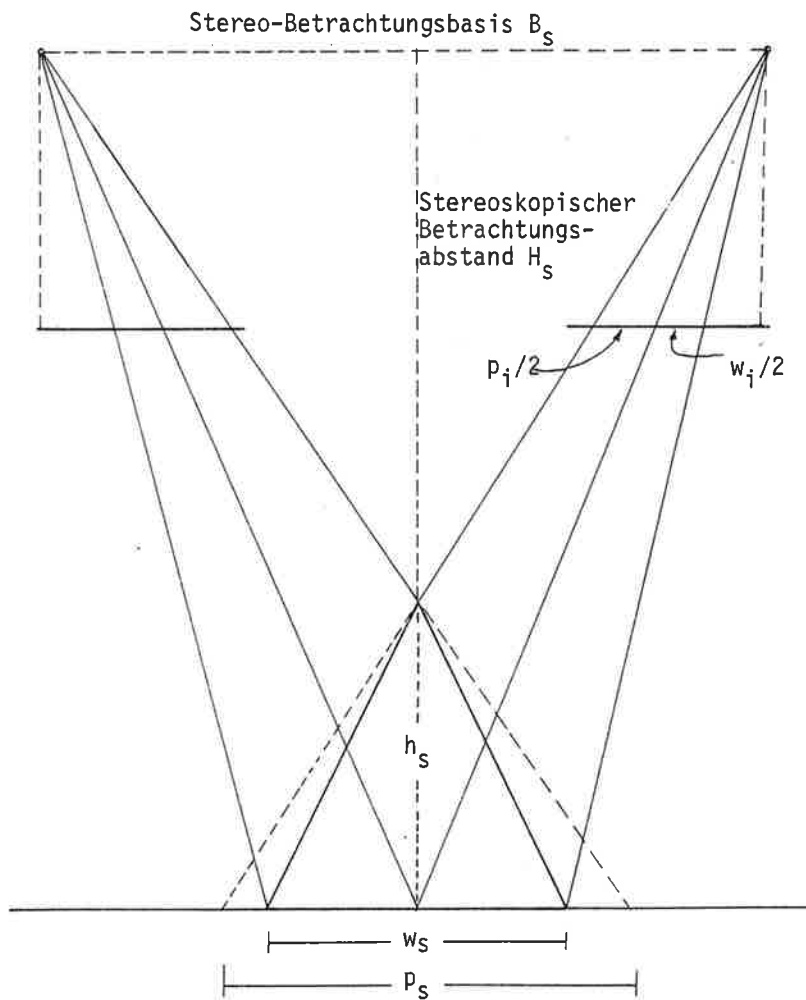


Abbildung 3: Stereoskopische Betrachtungsanordnung für das fotografische Bildpaar.

wobei H_n die Flughöhe, B_n die Stereobasis bezeichnen.

Weiters gilt:

$$dp_i / w_i = (B_n / H_n) h_n / w_n.$$

Im Stereoskop besteht eine Basis der stereoskopischen Betrachtung, B_s , und ein Abstand zum virtuellen Stereomodell, H_s . Aus Abb. 3 folgt:

$$\begin{aligned} h_s / dp_s &= H_s / B_s, \\ dp_s / w_s &= dp_i / w_i, \\ h_s / w_s &= (H_s / B_s) (dp_i / w_i), \\ &= (H_s / B_s) (B_n / H_n) (h_n / w_n). \end{aligned}$$

Damit aber wird q zu:

$$q = (H_s / B_s) (B_n / H_n) \dots (2)$$

und ist nicht mehr eine Funktion der Dimensionen der Pyramide, sondern des Bildaufnahmefalles.

Die der Stereobetrachtung zugrundeliegenden Werte H_s , B_s sind vom Betrachter und Gerätehersteller wählbar. Ein in Experimenten als optimal definierter Wert für H_s/B_s ist nach LAPRADE u.a. (1980):

$$H_s / B_s \approx 5 \quad \dots\dots (3)$$

2.2 Stereoparallaxen in Radarbildern

Bei Seitensichtradarbildern ist zunächst zu klären, wie ein topographischer Höhenunterschied in überlappenden Bildstreifen zu Parallaxenunterschieden führt. Eine Reihe von Formulierungen wurden in einer früheren Arbeit zusammengestellt (LEBERL, 1979). Ihre detaillierte Diskussion sprengt den Rahmen des hier zu behandelnden Themas. Einfache Parallaxenformeln für Radar folgen aus Abbildung 4, in der eine vereinfachte Radarstereogeometrie dargestellt ist. Daraus ist abzulesen, daß für Punkt \bar{P} gilt:

$$\begin{aligned} x_p &= x_s \\ y_p &= (r'^2 - r''^2 + B^2)/(2B) \\ z_p &= H - ((r'^2 - y_p^2)^{1/2} + (r''^2 - 2(B - y_p)^2)^{1/2})/2 \end{aligned} \quad \dots\dots(4)$$

Eine andere, gleichwertige Formulierung lautet:

$$\begin{aligned} y_p &= (H - h) \tan \Omega' = B \pm (H - h) \tan \Omega'' \\ h &= H - B / (\tan \Omega' \pm \tan \Omega'') \end{aligned} \quad \dots\dots(5)$$

Bisher wurde noch kein Parallaxenunterschied und Radialverschiebung eingeführt.

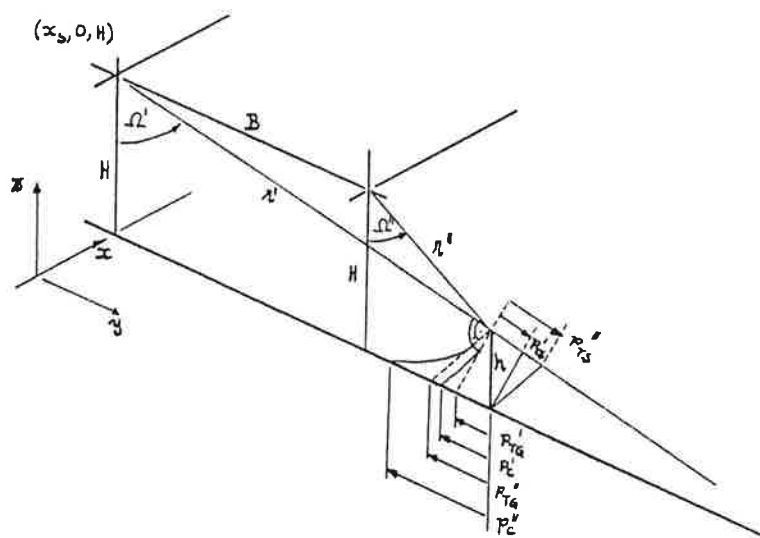


Abbildung 4: Radarstereoparallaxen und Abbildungskonfiguration

Abbildung 4 ergibt hierfür mit Ersetzen der Projektionskreise durch Tangenten:

$$\begin{aligned} p_G' &= h \cot \Omega' , \\ p_G'' &= h \cot \Omega'' , \\ dp_G &= p_G'' \pm p_G' = h (\cot \Omega'' \pm \cot \Omega') , \\ h &= dp_G / (\cot \Omega'' \pm \cot \Omega') \quad \dots\dots(6) \end{aligned}$$

Das + Vorzeichen gilt für selbstseitige Anordnungen, - für beiseitige. Gleichung (6) gilt für Horizontalabstandsdarstellung. In Schrägabstandsdarstellungen gilt, ebenfalls mit Vernachlässigung der Kreisform der Projektionslinien:

$$\begin{aligned} p_S' &= h \cos \Omega' , \\ p_S'' &= h \cos \Omega'' , \\ dp_S &= p_S' \pm p_S'' , \\ h &= dp_S / (\cos \Omega'' \pm \cos \Omega') \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

wobei auch hier + und - Vorzeichen für beid- und selbstseitige Fluganordnungen gelten.

Die Vernachlässigung der Kreisform der Projektionsstrahlen ist bei kleinen Nadirdistanzen Ω', Ω'' zunehmend weniger zulässig. Mit der exakten Größe dp_C statt der Vereinfachenden dp_G, dp_S findet man unter Verwendung der Kreisform aus:

$$p_C' = y_p - (\Omega'^2 - H^2)^{1/2} \quad \dots\dots(8)$$

und daraus:

$$dp_C = B + \frac{(H - h)^2 / \cos^2 \Omega'' - H^2}{((H - h)^2 / \cos^2 \Omega'' - H^2)^{1/2}} \quad \dots\dots(9)$$

2.3 Überhöhung im Radarstereomodell

Wir können die erzeugte Radarstereoparallaxe mit der notwendigen gleichwertigen Kamerakonfiguration in Beziehung bringen, welche dieselbe Parallaxe für dasselbe Objekt ergäbe. Damit wird ein Basis-Höhen-Verhältnis B_n/H_n im Objektraum für die Zentralperspektive definiert. Für eine Parallaxe dp_n und Objekthöhe h_n gilt für die Kamera:

$$dp_n / h_n = B_n / H_n \quad \dots\dots(10)$$

Im Radarfall beschreiben Gln. (6), (7) oder (9) das Verhältnis dp/h . In Verbindung mit Gl. (2) und (3) gilt somit näherungsweise wegen der Vernachlässigung der Kreisform des Projektionstrahles in Schrägabstandsdarstellung:

$$q_S' \approx 5 (\cos \Omega'' \pm \cos \Omega') , \quad \dots\dots(11),$$

und mit Horizontalabständen:

$$q_G' \approx 5 (\cot \Omega'' \pm \cot \Omega') \quad \dots\dots(12).$$

Für eine strengere Definition des Verhältnisses dp/h nach Gleichung (9) gibt es keine geschlossenen algebraische Darstellung. Jedoch kann der zu einem h gehörende Wert dp leicht errechnet und daher auch q ermittelt werden.

3. PRÜFUNG MITTELS RADARDATEN

3.1 Raumeindruck

Die beiden Bilder eines Stereopaars müssen einander im thematischen Inhalt ähnlich sein, um eine stereoskopische Betrachtung zu ermöglichen. Die geometrischen Inhalte müssen sich für die Definition einer Parallaxe genügend unterscheiden.

Da Radar das Objekt aktiv beleuchtet, entstehen aus unterschiedlichen Sensorpositionen auch unterschiedliche thematische Inhalte. Somit widersprechen einander die Forderungen nach thematischer Gleichheit und geometrischen Unterschieden. Im Fall von herkömmlichen Luftbildern besteht dieser Widerspruch nicht: die Sonnenbeleuchtung ist in verschiedenen Bildern nahezu ident, Bildinhalte unterscheiden sich nur geometrisch.

Abbildungen 5 bis 11 zeigen eine Auswahl von 7 Stereomodellen, welche die Möglichkeiten und Grenzen der Radarstereobetrachtung illustrieren.

Radar	Anzahl bearbeiteter Stereomodelle	Länge d. Basis	Nadirwinkel α	Stereo-Art	Schnittwinkel	Gelände-relief	Stereo-betrachtung
SEASAT	10	25 - 75	20°	selbseitig	102-408	bergig	gut
SAR	1	550	20°	beidseitig	40°	bergig	nicht möglich
Flugzeug SAR	4	0.7-13	68°	selbseitig	0°2-23°	bergig	gut
Goodyear	2	30	68°	beidseitig	120°	flach bis bergig	nur im Flachland
Flugzeug Reales	1	10	81°	selbseitig	6°	flach bis hügelig	mittel
Apertur Radar-Motorola	1	48	80°	beidseitig	160°	flach bis hügelig	nur im Flachland
Mond Apollo 17 ALSE-SAR	19	0.7-10.3	10°	selbseitig	0°3-5°3	flach bergig	gut nur mit $\Delta\alpha < 19^\circ$

Tabelle 1: Übersicht der Ergebnisse einer Prüfung der Stereobetrachtbarkeit von Radarbildpaaren.

Tabelle 1 beschreibt darüber hinaus das Ergebnis der Analyse von nahezu 40 Stereomodellen. Daraus ist folgendes zu schließen:

- Beidseitiges Stereo wie in Abb.5 und Abb.10 kann vom Betrachter nicht erfolgreich verwendet werden, da Gebirge zu großen thematischen Inhaltsunterschieden führt. Abb. 5 ist ein Beispiel mit Flugzeugradar, Abb.10 mit Satellitenradar. Selbst im flachen Gebiet können Kleinformen wie Vegetation, Bauten usw. große thematische Unterschiede verursachen, welche die Identifizierung gleicher Objekte in verschiedenen Bildern sehr erschweren(vgl.Abb.10).
- Es besteht keinerlei Schwierigkeit der Stereobetrachtung von selbseitigen Bildanordnungen, die mit größeren Nadirdistanzen erstellt wurden (Abb.6,7,8, 9). Dies gilt auch für gebirgisches Gelände (Abb.8).
- Im Falle sehr steiler Aufnahmerichtungen, also bei kleinen Nadirdistanzen, ist eine Stereobetrachtung nur bei sehr kleinen Schnittwinkeln der Projekt-

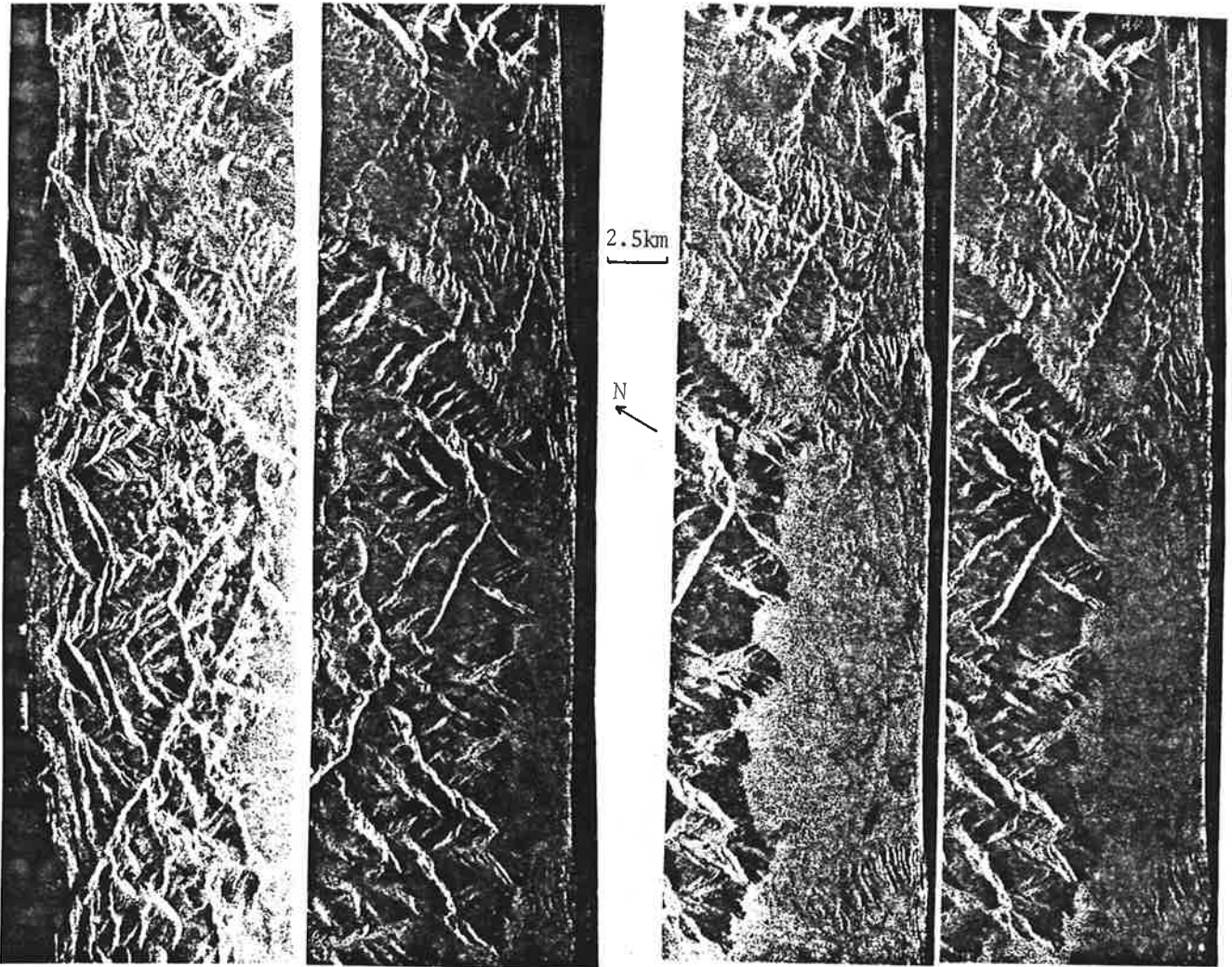


Abbildung 5: Beidseitiges Stereoradarmodell aus einem Flugzeug, Grand Canyon, U.S.A., Flughöhe 10 km, 25 cm Wellenlänge (Jet Propulsion Laboratory).

Abbildung 6: Selbstseitiges Stereomodell aus einem Flugzeug, Grand Canyon, USA. Flughöhe 10 km, 25 cm Wellenlänge. (Jet Propulsion Lab.).

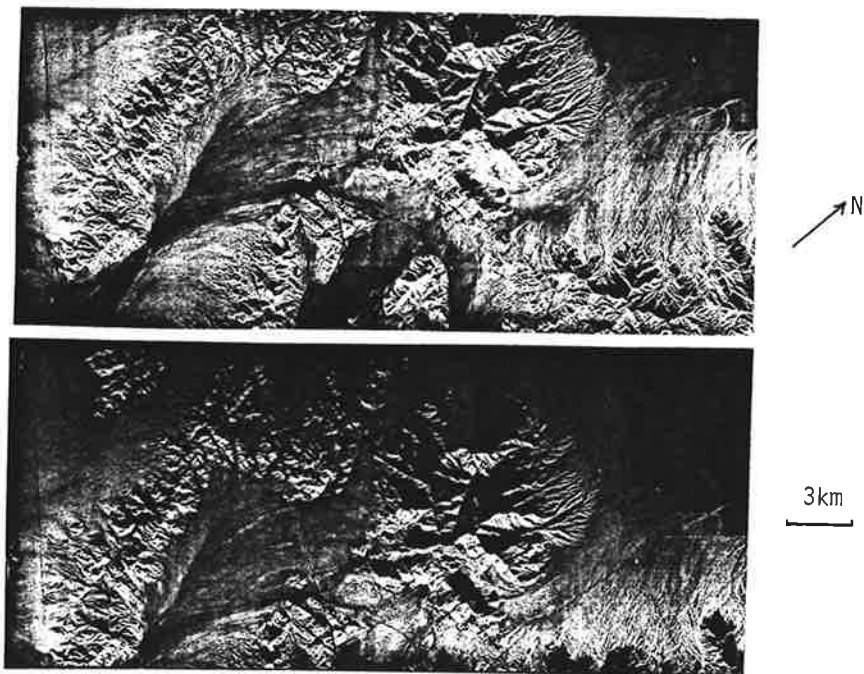


Abbildung 7: Selbstseitiges Flugzeugstereomodell von Granite Mountain, Arizona, U.S.A., Flughöhe 12 km, 3 cm Wellenlänge (Goodyear-Aero Service).

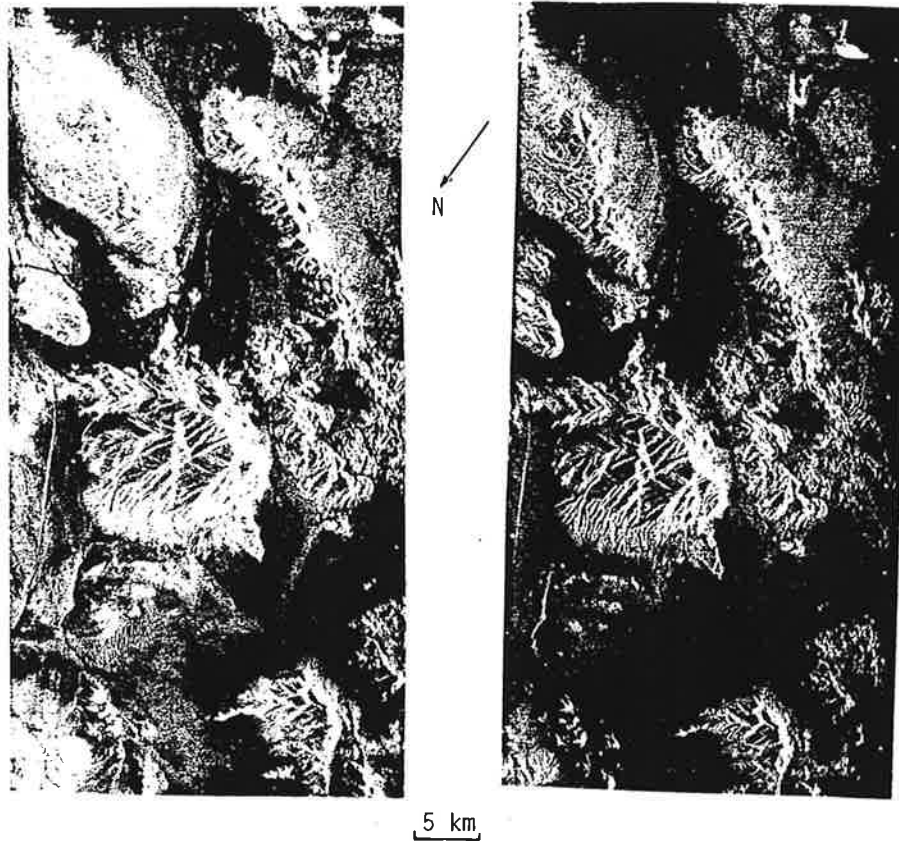


Abbildung 8: Selbseitiges Satellitenstereomodell von Granite Mountain, Arizona, U.S.A., aus SEASAT. Flughöhe 800 km, 25 cm Wellenlänge (Jet Propulsion Laboratory).

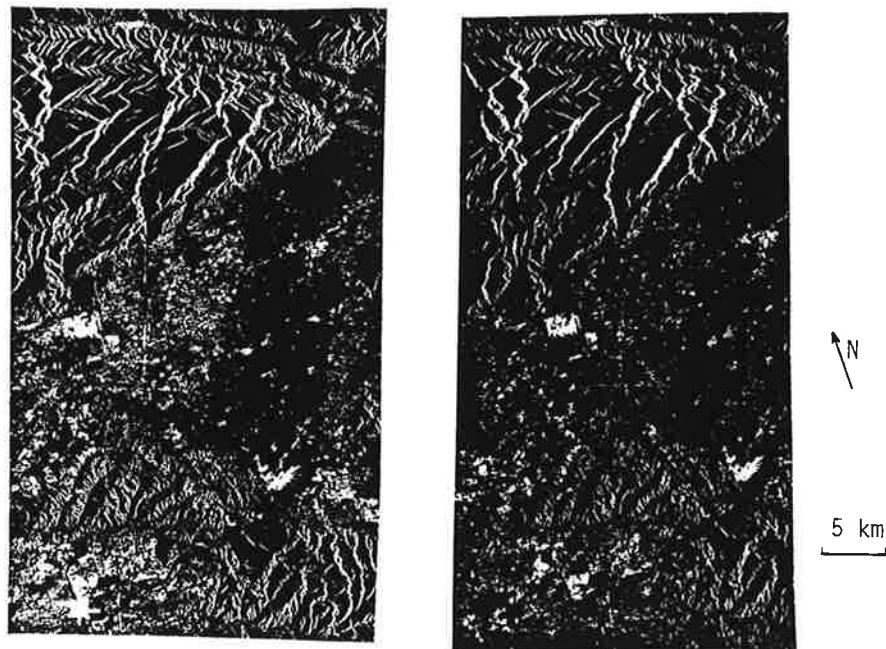


Abbildung 9: Selbseitiges Satellitenstereomodell von Los Angeles, U.S.A., aus SEASAT. Flughöhe 800 km, 25 cm Brennweite (Jet Propulsion L.).

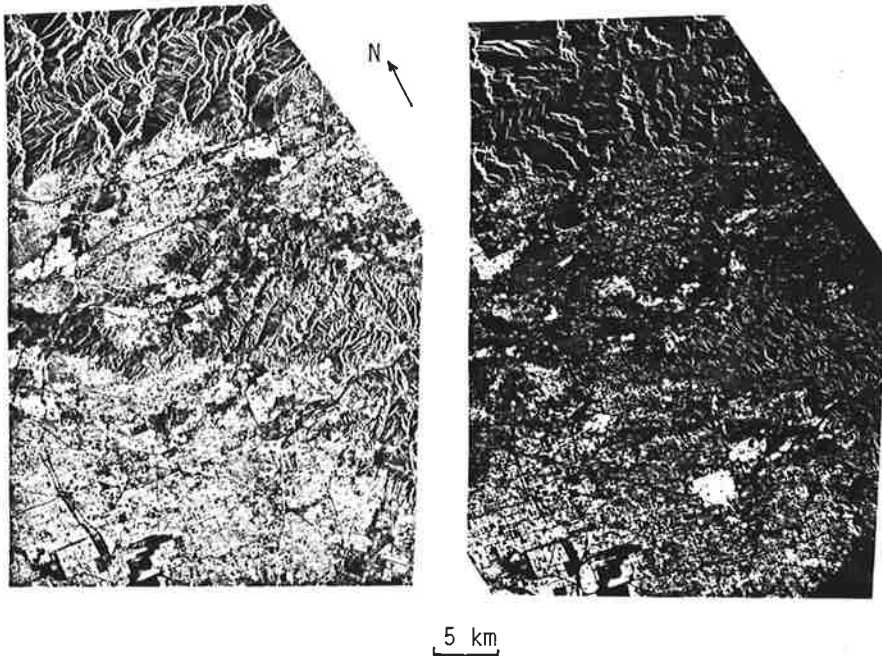


Abbildung 10: Beidseitiges Satellitenstereomodell von Los Angeles, U.S.A., aus SEASAT, Flughöhe 800 km, 25 cm Wellenlänge (Jet Propulsion Laboratory).

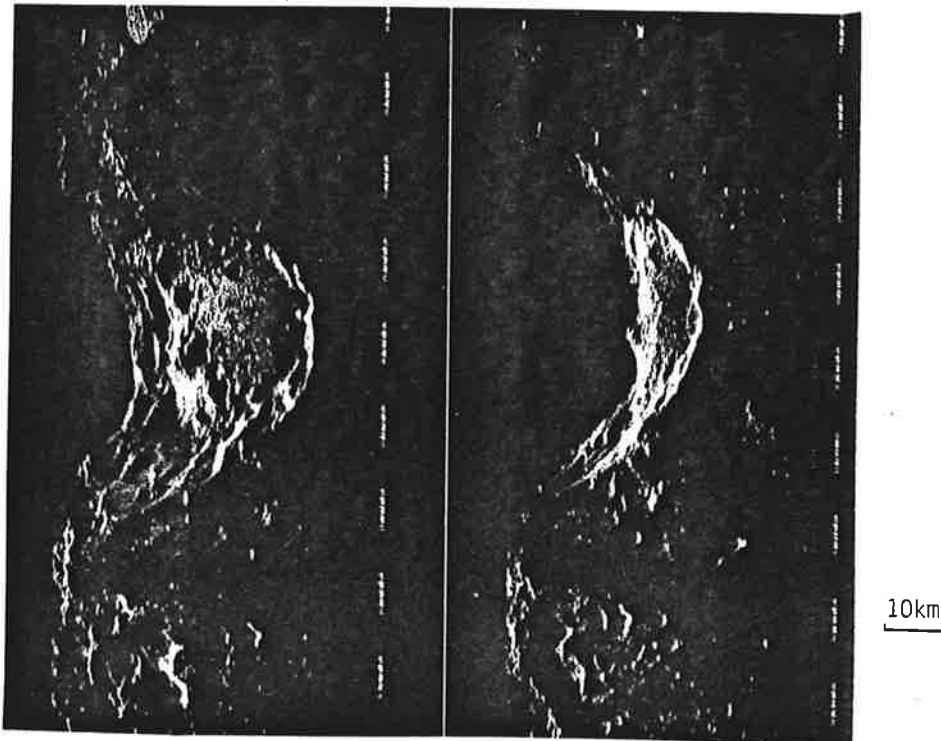


Abbildung 11: Selbseitiges Satellitenstereomodell eines Kraters auf dem Mond aus der Apollo-17-Mission (Crater Buisson). Flughöhe 116 km, 2 m Wellenlänge (Jet Propulsion Laboratory).

strahlen möglich. Im Falle der Apollo-17 ALSE - VHF Satellitenbilder des Mondes wurden Nadirdistanzen zwischen 0° und 10° verwendet. Dabei war im gebirgigen Gelände nur mit Schnittwinkeln $\Omega = \Omega'' - \Omega'$ von 1.09 eine Stereobetrachtung sinnvoll (vgl. Abb 11).

(d)

Im Vergleich zwischen Flugzeug- und Satellitenradar ist klar zu bestätigen, daß die Flughöhe und tatsächliche Radarstereobasis keine wesentliche Rolle bei der Bestimmung des Stereomodelleindrucks haben. Vielmehr sind dies Aufnahme-richtung und Schnittwinkel der Projektionsstrahlen. Somit liefert ein Seasat-Stereomodelleindruck (Abb.9) etwa denselben Raumeindruck wie das Flugzeugstereomodelleindruck desselben Gebietes (Abb.8), obwohl die Verhältnisse zwischen Flughöhe und Stereobasis der Radarabbildungsanordnung sehr unterschiedlich sind.

3.2 ÜBERHÖHUNG

Radar	Stereo Basis km	Nadir- distanz Ω' ($^{\circ}$)	Schnitt- winkel $\Delta\Omega$ ($^{\circ}$)	Flughöhe H (km)	Parallaxen- unterschied wegen $\Delta h = 1$ km Horizontal- distanz	Überhöhungsfaktoren			
						In Horizontal-distanz		In Schrägdistanz	
						streng q	genähert q'	streng q	genähert q'
SEASAT	25	20°	1.6	800	0.263	1.3	1.3	0.05	0.05
	75	22°	4.8	800	0.761	3.8	3.8	0.14	0.14
Flugzeug SAR Goodyear	0.7	68°	0.5	12	0.011	0.06	0.05	0.04	0.04
	13.5	65°	23°	12	0.720	3.6	3.2	1.60	1.60
Flugzeug RAR Motorola	10	81°	10°	4	0.215	1.1	0.9	0.95	0.85
	48	80°	160°	4	0.414	2.1	1.8	2.01	1.74
Apollo17 ALSE Mond	0.7	10°	0.3	116	0.383	1.9	0.9	0.00	0.00
	3.9	10°	1.9	116	3.422	17.1	6.8	0.03	0.03
	10.0	13°	4.7	116	2.584	12.9	6.4	0.07	0.07
	10.0	13°	4.8	116	5.220	26.1	10.6	0.08	0.08

Tabelle 2: Überhöhungsfaktoren für Radarstereomodelle im Falle von Horizontal- und Schrägdistanzdarstellungen.

Tabelle 2 faßt die relevanten Werte für die Ermittlung der Überhöhungsfaktoren q (streng) und q' (näherungsweise) für einige Stereomodelle zusammen. Daraus ist zu ersehen, daß in der Horizontal-distanzdarstellung Parallaxen erhalten werden können, welche jenen des photographischen Stereofalles entsprechen. Mit kleineren Nadirdistanzen wachsen die Parallaxenunterschiede bei fester Stereoanordnung und gleichbleibenden Geländehöhenunterschieden stark an. Im Falle des Apollo 17 Radar werden extreme Parallaxen-Werte mit sehr kleinen Schnittwinkeln erhalten.

Während also in der herkömmlichen Photogrammetrie die erhaltenen Parallaxenunterschiede nicht größer als die Höhenunterschiede selbst werden, ist im Radarfall zu zeigen, daß kleine Nadirdistanzen Ω', Ω'' auch bei kleineren Schnittwinkeln $\Delta\Omega$ schon Parallaxenunterschiede im Ausmaß von Vielfachen des zu untersuchenden Höhenunterschiedes betragen können (vgl. Apollo 17 in Tabelle 2).

Ein überraschendes Ergebnis liefert der Vergleich der Schrägdistanz mit der Horizontal-distanzdarstellung: mit Schrägdistanzen ergeben sich wesentlich kleinere Parallaxenunterschiede als mit Horizontal-distanzen, und damit auch wesentlich kleinere Überhöhungsfaktoren. Nur mit sehr großen Nadirdistanzen ($\Omega', \Omega'' \rightarrow 80^{\circ}$) verschwinden diese Unterschiede. Da jedoch derzeit keine Bilddaten zur Verfügung

stehen, die sowohl in Schräg- als auch in Horizontalabstandsdarstellung gegeben sind, ist über den zu erwartenden subjektiven Eindruck eines Betrachters keine Aussage zu treffen.

Selbst die nahezu 40 untersuchten Stereomodelle lassen keine definitive Abgrenzung des möglichen und optimalen Radarstereofalles zu, da keine ausreichende Variabilität in den Fluganordnungen besteht. LAPRADE (1975) berichtet über einige Experimente mit Radarbildern ebenen Geländes, das Bauten enthält. In diesem Fall kommt LAPRADE zum Schluß, daß optimale Ergebnisse mit Nadirdistanzen Ω', Ω'' zwischen 37° und 67° und Schnittwinkeln $\Delta\Omega$ von 12° bis 15° erhalten werden. Diese Aussagen erscheinen im Lichte der hier beschriebenen Daten nicht begründbar. Sowohl größere Schnittwinkel ($\Delta\Omega = 23^\circ$) führen zu guten Ergebnissen, wie auch kleinere Nadirdistanzen.

4. HÖHENGENAUIGKEIT AUS MESSUNGEN VON PARALLAXEN UNTERSCHIEDEN

Die Vielfalt der vorhandenen Daten kann genutzt werden, um die Genauigkeit der Messung von Höhenunterschieden auf Grund von einfachen Parallaxenmessungen zu prüfen. Statt der präzisen Komparatormessung von Bildkoordinaten und nachfolgender strenger radargrammetrischer Datenreduktion wurden die Gln. (6) und (7) auf gemessene Parallaxenunterschiede angewendet. Das Ergebnis ist für die einfache, schnelle Nutzung der Radardaten in Entwicklungsländern und thematischen Kartierungsprojekten von Bedeutung.

Es wurden sechs Stereomodelle ausgewertet, nämlich

- Fall I Satellitenradar Granite Mtn., Parallaxenmeßstab (Abb. 8).
- Fall II Satellitenradar Granite Mtn., Stereoplotter Planimat (Abb. 8)
- Fall III Flugzeugradar Granite Mtn., Parallaxenmeßstab (Abb. 7)
- Fall IV Flugzeugradar Granite Mtn., Stereoplotter Planimat (Abb. 7)
- Fall V Satellitenradar Los Angeles, optisch korrel., Parallaxenmeßstab (Abb. 9)
- Fall VI Satellitenradar Los Angeles, digital korrel., Parallaxenmeßstab (Abb. 9)

Die Parallaxen wurden mit dem Stereoskop und Parallaxenmeßstab wie auch am Stereoplotter Planimat mit horizontalen Bildträgern gemessen. Ein Bildpaar wurde in zwei Arten erstellt: einmal im herkömmlichen optischen Weg für synthetisches Apertur-Radar, einmal in digitaler Form.

Alle erhaltenen Höhen wurden mittels Paßpunkten korrigiert. Hierzu wurde ein Polynom allgemeiner Form verwendet:

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^{I+1} \sum_{j=1}^{J+1} \sum_{k=1}^{K+1} a_{ijk} x^{i-1} y^{j-1} z^{k-1} \dots \quad (13)$$

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse für die 6 Meßfälle und verschiedene Korrekturpolynome zusammen.

Polynom			Anzahl der Koeffizienten	Punkteanzahl					
I	J	K		I	II	III	IV	V	VI
				28	28	21	21	28	28
1	- 1	- 0	4	350	352	365	365	474	456
1	- 1	- 1	8	140	139	138	134	274	202
2	- 1	- 1	11	135	130	78	106	199	230
1	- 2	- 1	11	121	134	133	128	256	207
1	- 1	- 2	11	136	124	124	120	217	218
1	- 2	- 2	14	99	122	99	70	180	141
2	- 2	- 2	17	96	121	49	48	143	121

Tabelle 3: Restfehler der Höhe in Metern nach Polynomkorrektur der Rohhöhen. Die Genauigkeiten entsprechen theoretischen Erwartungen (LEBERL, 1979), sind aber im Vergleich zu den aus der Photogrammetrie vertrauten Werten sehr gering. Immerhin sind alle untersuchten Bilddarstellungen im Maßstab 1:500 000. Somit entsprechen die in Tabelle 3 dargestellten Werte, welche dort in Metern im Gelände angegeben sind, im Bild einigen Zehntel Millimetern: Das Flugzeugradarstereomodell von Granite Mtn. liefert zwar die besten Genauigkeiten mit etwa ± 50 m, jedoch nur mit einem 17-parametrischen Korrekturpolynom nach Gl. (13).

Der große Genauigkeitsgewinn bei Verwendung eines von der Höhe selbst abhängigen Korrekturgliedes in allen Fällen (Polynom 1-1-1 versus 1-1-0) führt zum Schluß, daß in allen ermittelten Höhen lineare (Maßstab-) Fehler auftreten.

5. SCHLUSS UND AUSBLICK

Dem räumlichen Eindruck bei Stereoradar liegen wesentlich andere geometrische Verhältnisse zugrunde als dem herkömmlichen photographischen Stereo. So zeigt sich im Versuch eines Vergleiches zwischen Kamera und Radar, daß zum Teil sehr große Stereoüberhöhungseffekte bei Radar erreichbar sind, obwohl die geometrische Lösung des Stereofalles unscharf ist (schleifende Schnitte). Dem Betrachter bietet sich ein überhöhtes Stereomodell dar, in dem jedoch Höhenmessungen nur beschränkt genau sind.

Es wurden nahezu 40 Radar-Stereomodelle im einzelnen geprüft. Die daraus zu gewinnenden Aussagen bestätigen, daß der Radarstereobetrachtung Grenzen gesetzt sind, die durch die Fluganordnung definiert sind: so ist beidseitiges Stereo kaum sinnvoll zur Betrachtung verwendbar. Interessante Aussagen ergeben sich bei selbstseitigen Radaraufnahmen mit kleinen Nadirdistanzen der Aufnahme- richtung: hier bestehen große Unterschiede bei der Überhöhung im Fall der Schräg- und Horizontal- dinstanzdarstellung.

Die vorhandenen Stereomodelle lassen erkennen, in welchen Bereichen Stereo möglich ist. Sie erlauben es nicht, die Grenzen des Möglichen zu beschreiben. Dazu fehlt die entsprechende Variation der Aufnahmefälle. Um hierüber Aussagen machen zu können, sind weitere Arbeiten mit simulierten Radarbildern sinnvoll. Derartige Untersuchungen stehen derzeit am Beginn.

In jüngster Zeit wurde mit der U.S. Space Shuttle ein SLR-Gerät in eine Erdumlaufbahn gebracht (Oktober 1981, SIR - A Mission). Daraus wurden Stereoaufnahmen gewonnen, welche jedoch eher zufällig zustande kamen, jedenfalls nicht ein Element des Experimentes waren. Das bessere von insgesamt zwei brauchbaren Stereomodellen zeigt in Abb.12 die griechischen Inseln Ithaka und Cephalonia:

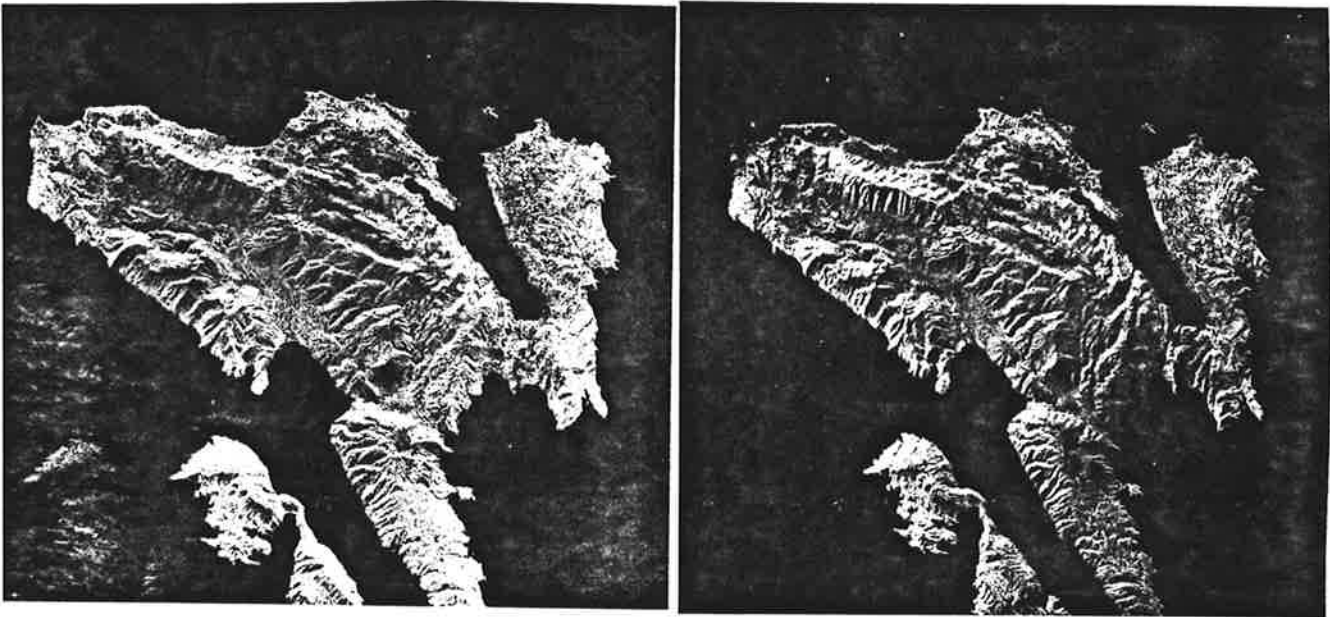


Abbildung 12: Stereomodell aus dem Space-Shuttle Flug Nr.2 im Rahmen des SIR-A Experimentes (Oktober 1981). Wellenlänge ist 25 cm, Flughöhe $H = 250$ km, Aufnahmerichtung α ist 50° . Dieses Material wurde von Dr.Ch.EIachi und Dr. M.Kobrick, Jet Propulsion Laboratory, zur Verfügung gestellt.

Die Frage des Radarstereo erhält im Hinblick auf geplante Satellitenradarmissionen zunehmend Gewicht (ERS-1 der ESA, Space-Shuttle-SIR-B, Venus Radar Mapping Mission usw.). Diese begründen eine Vielzahl von Radarstudien.

In Verbindung mit verbesserten Navigationsverfahren und Positionsbestimmungsmethoden kann auch die Nutzung von Flugzeug-Radar für Meßwerte neue Impulse erhalten. Nicht nur die Stereobetrachtung, auch die radargrammetrische Stereoauswertung, z.B. am analytischen Stereoauswertegerät, ist damit ein Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten.

DANK

Ich erhielt seit 1976 durch Prof. Rinner großzügige Möglichkeiten der Betätigung in modernen Fragen der Photogrammetrie. Prof. Rinner hat selbst erste vielbeachtete Überlegungen zur Radargrammetrie angestellt und ist daher ein verständnisvoller Förderer der Arbeiten, wovon ein Teilergebnis hier beschrieben wurde. Für die Förderung danke ich Herrn Prof. Rinner herzlich.

Die Arbeit wird im Rahmen eines Forschungsauftrages des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung geleistet (Zahl 6.931/ 3-27/1980, Internationale Kooperation auf dem Gebiet des Weltraumes Österreich - NASA), wobei Herrn Dipl. Ing.J.Raggam für seine engagierte Mitarbeit im Projekt mein Dank gebührt.

LITERATUR

1. BAIR G L und CARLSON D E 1975, Height Measurement with Stereo radar, Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol XLI.
2. BAIR G L und CARLSON G e 1974, Performance Comparison of Techniques for Obtaining Stereo Radar Images, IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-11.
3. CARLSON G E 1973, An Improved Single Flight Technique for Radar Stereo, IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-11, No.4.
4. 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.
5. DERENYI E E 1975, Topographical Accuracy of Side Looking Radar Imagery, Bildmessung und Luftbildwesen, 1975, No. 1.
6. GOODYEAR 1974, Preliminary Imagery Data Analysis Goodyear Electronic Mapping System (GEMS), Goodyear Aerospace Corp., Report GIB-9342, Code 99696.
7. GRACIE G et al 1970, Stereo Radar Analysis, US Engineer Topographic Laboratory, Ft. Belvoir, Virginia. Report No. FTR-1339-1.
8. GRAHAM L 1975, Flight Planning for Radar Stereo Mapping, Proc. Am. Soc. Photogramm., 41 st. Meeting, Washington, D.C.
9. INNES R B 1964, Principles of SLAR Measurements of the Third Coordinate of Target Position, Report of Project Michigan No. 2900-474-T.
10. KONECNY G 1972, Geometrische Probleme der Fernerkundung, Bildmessung und Luftbildwesen, Vol.42, No. 2.
11. LAPRADE G L 1963, An Analytical and Experimental Study of Stereo for Radar, Photogramm.Eng., Vol. XXIX,
12. LAPRADE G.L 1970 , Subjective Considerations for Stereo Radar, Goodyear Aerospace Corp., Report GIB-9169 und Photogramm.Eng.
13. LAPRADE G 1975, Addendum to GIB-9169, Subjective Considerations for Stereo-Radar, Goodyear Aerospace Corp.m Arizona Division.
14. LAPRADE G et al 1980, Stereoscapy, Manual of Photogrammetry, 4th Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, USA.
15. LEBERL F 1975, Lunar Pradargrammetry with ALSE-VHF-Imagery, Proc. Am. Soc. Photogramm., Fall Tech. Meeting. Phoenix, Arizona.
16. LEBERL F 1972, On Model Formation with Remote Sensing Imagery, Österr.Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol 60.
17. LEBERL F 1978, Satellitenradargrammetrie, Deutsche Geodätische Kommission, Serie C., No. 239, München 156 p.
18. LEBERL F 1979, Accuracy Aspects of Stereo-Side-Looking Radar, JPL-Publication 1979 - 17, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA.

19. RINNER K, R. BURKHARDT 1971 Photogrammetrie. Band III a, Handbuch des Vermessungswesens. Jordan-Eggert-Kneissl, 10. Auflage, Metzler. Stuttgart, 2371 Seiten.
20. RINNER K 1948 Die Geometrie des Funkmeßbildes. Öst. Akademie der Wissenschaften, Math.-Naturw. Klasse. Im Handbuch der Vermessungskunde. Band VI. Herg. Jordan-Eggert-Kneissl. Metzler. Stuttgart.
21. ROSENFELD G. H, 1968 Stereo Radar Techniques, Photogramm. Eng., Vol. XXXIV.