

# BESTIMMUNG VON MEERESTIEFEN UND IHRE PRAKTISCHEN PROBLEME

Joachim Höhle  
Aalborg Universitets Center  
Fibigerstræde 11, 9220 Aalborg  
Danmark  
Kommission IV, Arbeitsgruppe 5

## Zusammenfassung

Die photogrammetrische Methode kann für die Bestimmung von Tiefen in Flachwassergebieten benutzt werden. Die praktische Anwendung dieser Zweimedienphotogrammetrie ist von grossem wirtschaftlichem Interesse, aber auch mit zahlreichen Schwierigkeiten verbunden. Neue Versuche an der dänischen Ostseeküste werden beschrieben und die erhaltenen Resultate mitgeteilt. Dabei standen neuere technische Hilfsmittel (analytisches Auswertegerät, Korrelator u.a.) zur Verfügung. Die Einflüsse von verschiedenen Parametern auf die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Resultate werden diskutiert und durch Simulationsrechnungen belegt. Ausserdem werden Hinweise für die Aufstellung eines Produktionsverfahrens gegeben, in dem hydrographische und photogrammetrische Daten kombiniert werden können.

## 1. Einleitung

Die Bestimmung von Wassertiefen in flachen Gewässern, zum Beispiel in küstennahen Meeresgebieten, ist mittels hydrographischer Methoden nicht nur aufwendig, sondern auch gefährlich und obendrein ungenau. Photogrammetrische Verfahren zur Wassertiefenbestimmung wurden schon seit langem mit Erfolg in Nordamerika eingesetzt /ASP 1972/, /ASP 1978/. Praktische Arbeiten an europäischen Küsten sind bisher selten. Neuere Tests sind aus Norwegen /Jørgensen 1983/, der DDR /Linke 1985/ und aus Dänemark /Höhle 1986/ bekannt geworden. In Dänemark mit seiner 7500 km langen Küste bemüht man sich zur Zeit, die zum Teil 100 Jahre alten Seekarten zu erneuern. Die umfangreichen Arbeiten sollen möglichst mit noch wirtschaftlicheren Methoden gelöst werden als bisher. Auch andere Anwendungen eines digitalen Geländemodells in Küstengebieten sind in Dänemark von Bedeutung. Sie reichen von wissenschaftlichen Studien über Sandtransport bis zur Planung von Ingenieurbauwerken. Diese und andere Anwendungen sind in /Höhle 1986/ behandelt worden. Vor Benutzung der photogrammetrischen Methode für die Tiefenbestimmung muss genügend Klarheit über die mögliche Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit bestehen, bzw. Erfahrungen gesammelt werden über die Aufnahmeposition und die Auswertemethode und über Parameter, welche die Ergebnisse beeinflussen können oder die Grenzen des Verfahrens festlegen. Insbesondere müssen genaue und verlässliche Referenztiefen in genügender Zahl geschaffen werden, um die mögliche Genauigkeit abschätzen zu können. Dieses Bemühen ist Gegenstand dieser Arbeit. Eine weitergehende Aufgabenstellung ist es, ein mögliches Produktionsverfahren für die in der Praxis vorhandenen oder möglichen Auswertesysteme aufzuzeigen.

## 2. Versuchsbeschreibung

### 2.1. Testgebiet

Das Testgebiet gehört zur dänischen Insel Fünen im Meeresgebiet des Grossen Belt. Der untersuchte ca. 2 km lange Küstenstreifen südlich der Stadt Kerteminde hat einen klaren Wasserkörper über ausgedehnten Sand- und Grasflächen. Die Auswirkung von Gezeiten sind hier gering, dagegen können durch Wind bedingte Strömungen den Wasserspiegel bis ca. 1,5 m verändern.

### 2.2 Bildflug, Passpunkte und photogrammetrische Hilfsgrössen

Der Bildflug erfolgte an einem sonnigen Tag im Spätherbst bei einer glatten Wasseroberfläche. Photographiert wurde mit einer Weitwinkelkammer und Farbfilm aus einer Flughöhe von 1525 m. Als Passpunkte dienten luft sichtbare Festpunkte des Landesnetzes sowie nivellierte Höhenpasspunkte. Ausserdem wurden bei der Auswertung Höhen entlang der Küstenlinie gemessen. Die Höhe des Wasserspiegels zum Aufnahmezeitpunkt war aus der Ablesung eines Pegels bekannt. Der Brechungsindex des Wassers wurde aus ozeanographischen Tabellen mittels geschätzter Werte für den Salzgehalt und die Temperatur des Meerwassers festgelegt.

### 2.3 Kontrollpunkte

Zur Ueberprüfung der photogrammetrischen Messungen müssen eine genügende Anzahl von Kontrollpunkten zur Verfügung stehen. Deren Genauigkeit in Tiefe und Lage sollte ca. eine Grössenordnung besser sein als diejenige der zu überprüfenden Messungsmethode. Im Meeresbereich ist die Forderung nach Fehlern  $< 0.1$  m nicht leicht zu erfüllen. Das Messungsverfahren sollte insbesondere unabhängig von den Schwankungen des Meeresspiegels ebenso von der Beschaffenheit des Meeresbodens und des darüberliegenden Wasserkörpers sein. Das hydrographische Verfahren erfüllt die genannten Forderungen nicht. Gewählt wurde daher das Einschneideverfahren mittels zweier Theodolite an Land zu einer von einem Boot aufgehaltene Stange mit Zielmarke. Aus dem gemessenen Vertikal- und Horizontalwinkel sind unter Berücksichtigung von Erdkrümmung und Refraktion die räumlichen Koordinaten ermittelt worden. Die Koordinaten der Theodolit-Standpunkte wurden durch Polygonzugsmessung und Nivellement bestimmt. Zur Ueberprüfung auf grobe Fehler wurden zusätzlich noch unabhängige Tiefenmessungen mittels der Stange ausgeführt, welche um den aktuellen Wasserspiegel korrigiert wurden. Diese Änderungen betragen für die Dauer der Messungen (ca. 3 Stunden) 0.3m. Diese Tiefen wurden jedoch nicht für die weitere Genauigkeitsanalyse verwendet. Die durchschnittliche Differenz zwischen den beiden unabhängigen Tiefenbestimmungen ergab sich zu  $\pm 0.09$  m. Aus den festgestellten Differenzen zwischen den Bestimmungen von beiden Theodolit-Standpunkten liess sich die innere Genauigkeit der Tiefenbestimmung ermitteln. Sie lag bei  $\sigma = \pm 0.03$  m. Die örtlichen Messungen erfolgten jedoch 18 Monate nach den Luftaufnahmen. Nach Aussagen eines Meeresgeologen ist das Testgebiet jedoch relativ stabil bezüglich Sandbewegungen. Kleinere Differenzen können jedoch nicht ausgeschaltet werden. Die maxi-

male Tiefe betrug nahezu 5 m. Die Messungen erfolgten entlang Tiefenlinien und in Profilen senkrecht zur Küstenlinie. Bei der Wahl der 50 Kontrollpunkte wurden Struktur und Kontrast in der unmittelbaren Umgebung nicht berücksichtigt.

## 2.4 Auswertung und Resultate

Die Ausmessung der Bilder erfolgte mit dem analytischen Plotter Planicomp C130. Die Einpassung der Bilder auf Passpunkte an Land ergab mittlere Restfehler in den Höhen von  $\pm 0.12$  m oder  $\pm 0.08\%$  der Flughöhe. Danach wurden sämtliche Kontrollpunkte automatisch angefahren und die Tiefen eingestellt. Zur Bestimmung und Verbesserung der Einstellgenauigkeit wurden insgesamt 4 Messungsreihen ausgeführt. Die gemessenen "scheinbaren Tiefen" wurden wegen des Einflusses der Strahlenbrechung nachträglich korrigiert. Die geometrischen Verhältnisse und die Methodik des Korrekturverfahrens sind aus Bild 1 ersichtlich.

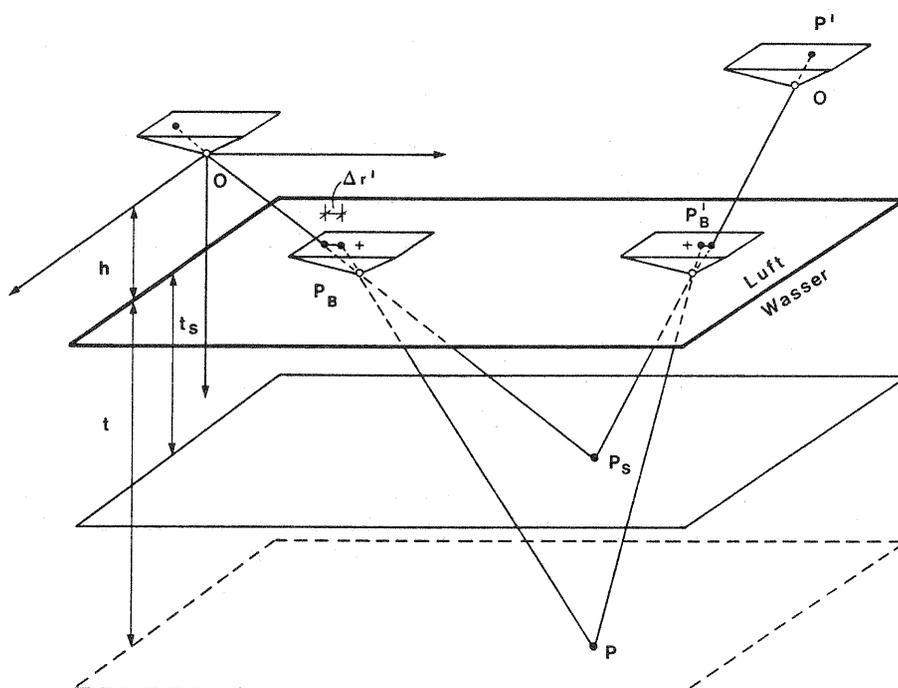


Bild 1: Ausmessung von Unterwassergelände in einem photogrammetrischen Standardgerät. Gemessen werden scheinbare Tiefen ( $t_s$ ), welche nachträglich in wahre Tiefen ( $t$ ) umgeformt werden müssen. Dabei ist die an der Grenzfläche Luft/Wasser aufgetretene Strahlenbrechung zu rekonstruieren. Diese lässt sich als radialsymmetrische Objektivverzeichnung ( $\Delta r'$ ) einer fiktiven Kammer interpretieren, welche entlang dem jeweiligen Abbildungsstrahl vom Aufnahmeort (O) bis zur Wasseroberfläche verschoben wurde. Die Bestimmung des Unterwasserpunktes (P) erfolgt dann durch Vorwärtseinschneiden von den jeweiligen fiktiven Aufnahmeorten ( $P_B'$ ) mit den korrigierten Bildpunkten ( $P_B$ ) /Höhle 1971/.

In dem vom Verfasser erstellten Korrekturprogramm werden die Koordinaten der Projektionszentren, die Wasserspiegelhöhe und der Brechungsindex des Wassers benötigt. Die auf diese Weise ermittelten photogrammetrischen Tiefenwerte werden mit den geodätisch bestimmten Werten verglichen. Aus den Differenzen ( $\epsilon^*$ ) ergaben sich nach den Formeln (1) mittlere Fehler von  $\sigma = \pm 0.33\text{m}$ .

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{[\epsilon\epsilon]}{n}}$$

$$\epsilon = \epsilon^* - \frac{[\epsilon^*]}{n} \quad (1)$$

Die aus den Doppelmessungen nach den Formeln (2) ermittelten Einstellfehler betragen dabei  $\sigma_E = \pm 0.25\text{ m}$ . Messungen mit Differenzen  $d > 1\text{ m}$  zwischen zwei Messungen wurden zuvor eliminiert.

$$\sigma_E = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} \quad (2)$$

Die photogrammetrisch gemessenen Tiefen hatten somit infolge der Mittelbildung aus 4 Einzelmessungen eine innere Genauigkeit von  $\sigma = \pm 0.12\text{ m}$  oder  $0.08\%$  der Flughöhe. Bemerkt werden soll noch, dass geübte Operateure noch bessere Einstellfehler bzw. geringere Ausfallquoten erzielen werden. Der erzielte mittlere Fehler von  $\sigma = \pm 0.33\text{ m}$  oder  $0.22\%$  der Flughöhe ist jedoch besser als die aus anderen Arbeiten in Europa bekannt gewordenen Resultate (Vgl. Tab. 1).

Autor	Jahr	Gebiet	$\sigma$ (m)	$\sigma$ (% von h)
Jørgensen	1983	Norwegen	0.7	0.31
Linke	1985	DDR	1.0	0.33
Höhle	1988	Dänemark	0.3	0.22

Tab. 1: Mittlere Tiefenfehler von verschiedenen Tests zur Bestimmung von Meerestiefen.

Das bisher ausgewertete Testmaterial ist jedoch noch zu gering, um allgemeine Aussagen machen zu können. Näher untersucht werden muss auch noch der systematische Fehleranteil ( $s = -0.7\text{ m}$ ) sowie die Ausfallquote ( $Q = 58\%$ ) aufgrund von mangelnder Einstellbarkeit an den gewählten Kontrollpunkten.

### 3. Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Genauigkeit und Vollständigkeit von Tiefenmessungen.

Die Resultate der Tiefenbestimmungen, das sind insbesondere die Genauigkeit und die Vollständigkeit in der Erfassung, werden von zahlreichen Parametern beeinflusst. Im Gegensatz zu den üblichen photogrammetrischen Modellen liegen besondere Bedingungen bei den Zweimedien-Aufnahmen vor:

- Der Wasserspiegel und der Brechungsindex des Wassers müssen zusätzlich erfasst werden. Eventuelle Ungenauigkeiten können sich auswirken.
- Die Wasseroberfläche wird in den Berechnungen als eben und horizontal vorausgesetzt. Wellen und Strömungen stören jedoch

dieses mathematische Modell.

- Da der Bildflug i.a. entlang der Küstenlinie erfolgt, sind die photogrammetrischen Modelle nur ca. zur Hälfte mit Landflächen bedeckt. Diese unvollständigen Modelle können Modellverbiegungen aufweisen.
- Die Unterwassergebiete sind i.a. struktur- und kontrastarm. Dadurch ist die Einstellgenauigkeit geringer als an Land. Mit zunehmender Wassertiefe nehmen die Kontraste infolge Streuung noch weiter ab. Ausserdem kann die Transparenz des Wasserkörpers örtlich als auch zeitlich verschieden sein. Die Einstellgenauigkeit bestimmt somit in starkem Masse die photogrammetrische Auswertegenauigkeit.

Im folgenden soll der Einfluss von Fehlern in der Wasserspiegelhöhe und im Brechungsindex abgeschätzt werden. Bei Ungenauigkeiten in der Erfassung des Wasserspiegels ( $\Delta z_{was}$ ) entstehen Verschiebungen in den ermittelten Wassertiefen bzw. Z-Koordinaten (vgl. Bild 2). Für den betrachteten Aufnahmefall ( $n = 0.61$ ) können die Verschiebungen nach (3) abgeschätzt werden.

$$\Delta z \approx - \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \cos \beta} \cdot n \cdot \Delta z_{was} \quad (3)$$

Die Werte liegen bei  $\approx 0.4 \cdot \Delta z_{was}$ . Die Simulationsrechnung mit den Testpunkten erbrachte Veränderungen von  $Z = + 0.23$  m, wenn der Wasserspiegel um  $\Delta z_{was} = -0.42$  m verändert wurde. Falls auch

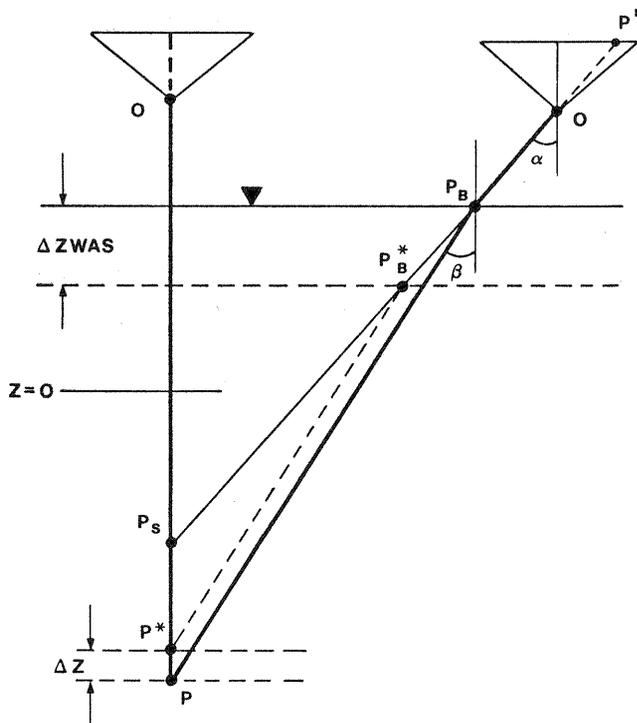


Bild 2

Auswirkung von Ungenauigkeiten in der Erfassung des Wasserspiegels ( $\Delta z_{was}$ ) und ihre Auswirkungen auf systematische Verschiebungen in den Tiefen bzw. Z-Koordinaten ( $\Delta Z$ ).

Es bedeuten:

$\alpha$  ... Neigung des Abbildungsstrahles in Luft

$\beta$  ... Neigung des Abbildungsstrahles in Wasser

$n$  ... Brechungsindex des Wassers (1.33)

Höhenpasspunkte entlang der Küstenlinie verwendet wurden, verändern sich die Z-Koordinaten um  $s \approx \Delta z_{was}$  (vgl. Bild 3).

Fehler im Brechungsindex des Wassers ( $\Delta n$ ) können mittels Bild 4 abgeschätzt werden. Diese sind jedoch klein. Z.B. betragen sie in dem betrachteten Test für  $\Delta n < 0.006$ , das entspricht Aender-

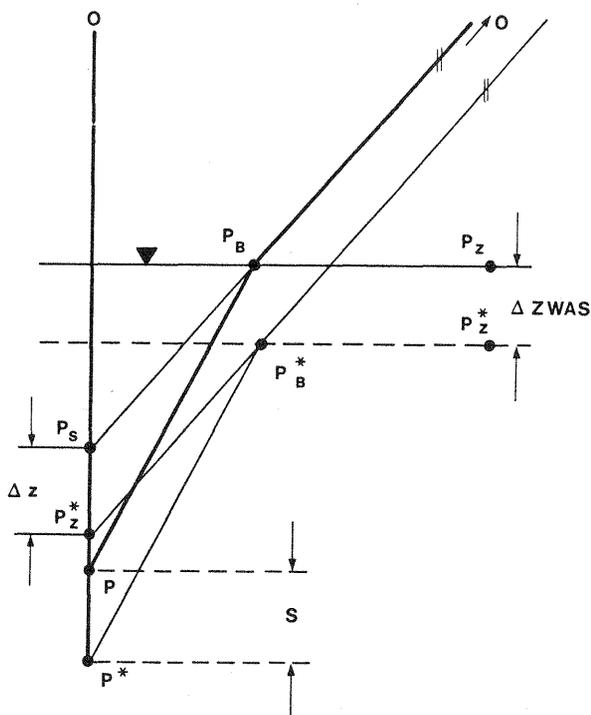


Bild 3

Auswirkungen von Ungenauigkeiten in der Erfassung des Wasserspiegels ( $\Delta z_{WAS}$ ) auf die Passpunkte ( $P_Z$ ) entlang der Küstenlinie und auf die Unterwasser-Punkte ( $P$ ). Die Verschiebung ( $\Delta z$ ) in den gemessenen Punkten ( $P_S^*$ ) ist gleich dem Fehler im Wasserspiegel ( $\Delta z_{WAS}$ ) und auch (nahezu) gleich der Verschiebung ( $s$ ) in dem korrigierten Punkt ( $P^*$ ).

Es bedeuten:

- \* ... fehlerhafte Lage
- ▼ ... Wasserspiegel
- O ... Projektionszentrum
- $P_Z$  ... Höhenpasspunkt entlang der Küstenlinie
- $P_B$  ... Brechpunkt

ungen in der Wassertemperatur von  $\Delta T = 10^\circ C$  und Änderungen im Salzgehalt von  $\Delta S = 25\text{‰}$ , nur maximal 5‰ der Wassertiefe. Die Simulationsrechnung mit den Testpunkten erbrachte z.B. für  $\Delta n = 0.0024$ , welches einem möglichen Erfassungsfehler ( $\Delta T = 5^\circ$ ,  $\Delta S = 10\text{‰}$ ) entspricht, eine systematische Verschiebung in den Z-Koordinaten von nur  $\Delta t = 0.01$  m.

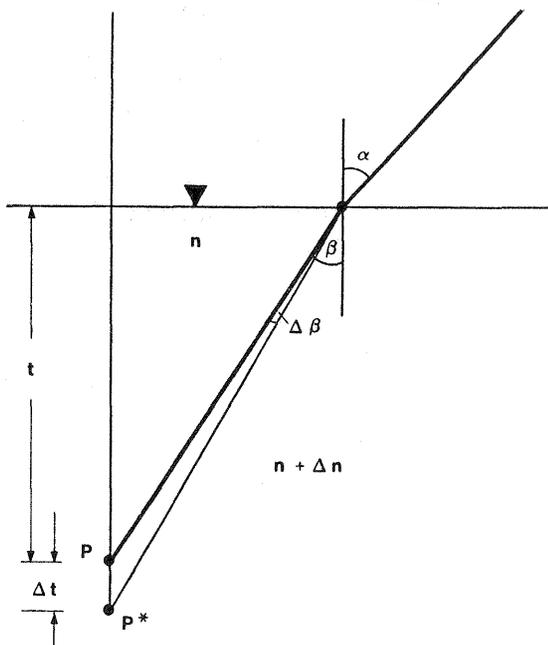


Bild 4

Änderungen im Brechungsindex des Wassers ( $\Delta n$ ) bewirken Tiefenfehler  $\Delta t$ .

#### 4. Möglichkeiten zur Verbesserung der Resultate

Aus dem Kapitel 3 kann man schlussfolgern, dass insbesondere systematische Verschiebungen in Z-richtung vermieden werden müssen. Insbesondere kommt es auf eine genaue Erfassung der Wasserspie-

gelhöhe im Moment der Aufnahme an. Dies muss eventuell an mehreren Stellen erfolgen, da Strömungen lokale Unterschiede hervorrufen können. Evtl. müssen einige Kontrollpunkte am Meeresboden ausgelegt und ihre Tiefen örtlich ermittelt werden. Mit derartigen Kontrollen könnte auch eine Festlegung der Wasserspiegelhöhe erfolgen.

Vor groben Einstellungsfehlern muss man sich durch Mehrfachmessungen schützen. Die Messungen müssen anschliessend sofort analysiert werden und zusätzliche Nachmessungen vorgenommen werden. Die Eigenschaft des analytischen Auswertegerätes, Punkte automatisch anfahren zu können, sollte in ein Messungsprogramm einbezogen werden.

Die Verwendung von Korrelatoren bringt nach Erkenntnissen in /Pedersen, H.B. 1987/ keine Verbesserung in der Einstellgenauigkeit. In dem struktur- und kontrastarmen Unterwasser-Gelände ist der menschliche Operateur immer noch die beste Lösung.

#### 5. Grenzen der photogrammetrischen Methode und ihre Einsatzmöglichkeiten

Der Anwendung der photogrammetrischen Methode sind auch Grenzen gesetzt. Diese liegen insbesondere in der wechselhaften und geringen Einstellgenauigkeit infolge der mangelnden Kontraste oder Strukturen in manchen Unterwasser-Gebieten. Die Punktverteilung muss insbesondere vom Operateur gewählt werden können, d.h. Die Messungspunkte können nicht im regelmässigen Raster angeordnet werden. In tieferen Zonen oder in Zonen mit ausgedehnten Seegrassflächen sind keine Messungen oder nur sehr fehlerhafte Messungen möglich. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die photogrammetrische Methode nur in Kombination mit der hydrographischen Methode angewendet werden kann.

Zu bemerken ist noch, dass mit der photogrammetrischen Methode auch die lagemässige Bestimmung von Unterwasser-Objekten (z.B. zwecks Abgrenzung von Rohstoff-Grenzen, Kartierung von Einleitern, Pipelines usw.) im küstennahen Bereich möglich sind. Ausserdem kann die Küstenlinie eindeutig aufgrund ihrer Definition (DNN = 0) kartiert werden. Die zuletzt genannten Möglichkeiten setzen jedoch eine on-line Korrektur voraus. Eine Lösung dafür wurde in /Höhle 1986/ für das analytische Auswertegerät DSR 11 erarbeitet.

#### 6. Ausblick auf eine mögliche Produktionsmethode

Bei einer Produktion von Seekarten in küstennahen Zonen oder von technischen oder topographischen Karten mit Ausdehnung in Flachwasserbereiche sind die Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenausgabe den heutigen Konzepten in der digitalen Kartenherstellung anzupassen. Die Technologie ist derzeit sehr im Fluss. U.a. können für die Zwecke der Navigation bereits mittels kommerziell erhältlicher Systeme alle Seekarten der Erde auf 5 Laserplatten gespeichert werden und an Bord des Schiffes zusammen mit der aktuellen Schiffsposition am Bildschirm angezeigt werden /Discnavigation ab 1986/. Moderne Datenerfassungssysteme in der Photogrammetrie besitzen ein effektives Daten-Management und können die gespeicherten Karteninformationen den aktuellen Luftbildern überlagern. Damit ergeben

sich zahlreiche neue Möglichkeiten. Die wichtigsten Schritte eines photogrammetrischen Produktionsverfahrens sollen nunmehr kurz skizziert werden.

1. Erfassung der Wasserspiegelhöhe und des Brechungsindex zum Zeitpunkt der Aufnahmen
2. On-line Korrektur der Strahlenbrechung in der System-Software des analytischen Auswertegerätes
3. Sichtbarmachung der alten Seekarte bzw. der neuesten hydrographischen Messungen im Strahlengang des photogrammetrischen Auswertesystems
4. Sofortige Ueberprüfung der Mehrfach-Messungen und nachträgliches automatisches Anfahren von Punkten mit grossen Einstelldifferenzen
5. Berechnung eines regelmässigen Punktrasters (DTM) aus den unregelmässig verteilten Messpunkten
6. Optische Ueberlagerung des berechneten DTM auf die Messbilder zwecks Kontrolle auf grobe Fehler und anschliessende Korrektur oder Ergänzung
7. Kartierung der Küstenlinie und diverser Unterwasser-Topographie

Das angedeutete Verfahren kann mit den heutzutage bekannten Mitteln realisiert werden.

#### Danksagung

Unterstützung bei den praktischen Messungen zur Bestimmung der Kontrollpunkte wurde mir von Mitarbeitern des Labors für Photogrammetrie und Landmessung des Aalborger Universitätszentrums und des Institutes für Landmessung und Photogrammetrie der Dänischen Technischen Hochschule in Lyngby gegeben. Dank sagen möchte ich besonders Prof. O. Jacobi für die Vorbereitung der Aufgabe und für die praktische Hilfe bei den geodätischen Messungen. Finanzielle Unterstützung für diese Untersuchung gewährte auch das "Institut for samfundsudvikling og planlægning" des Aalborger Universitätszentrums und der Thomas B. Thrige's Fond, Kopenhagen.

#### Literatur

- Höhle, J. 1971            Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-  
Photogrammetrie  
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C,  
München
- ASP 1972                Proceedings of a Symposium on Coastal Map-  
ping in Washington, D.C., 311 S., Falls  
Church, Virginia/USA
- ASP 1978                Proceedings of the Coastal Mapping Sympo-  
sium in Rockville, Maryland, 187S., Falls  
Church, Virginia/USA
- Jørgensen, J.B. 1983    Sjøkartlegging med Flyfotogrammetri(norw.),  
unveröffentlichte Arbeit des "Institut  
for Landmåling", Norges Landbrugshojkskole,  
63 S., Ås/Norwegen

- Linke, K. 1985                    Untersuchungen zur Anwendung der Zwei-  
medien-Photogrammetrie für die Bestim-  
mung von Wassertiefen in Flachwasser-  
gebieten  
Vermessungstechnik, 22.Jg., Heft 10,  
S. 346-349
- Höhle, J. 1986                    Versuche zur photogrammetrischen Kar-  
tierung von Küsten  
14 S., Lyngby/Dänemark, unveröffent-  
licht
- Disc Navigation ab 1986        The Integrated Navigation System  
Utilizing Electronic Chart  
Sjöbo/Schweden
- Pedersen, H.B. 1987            Korrelator og måling af havdybder (dä-  
nisch), 91S.,  
Studentenarbeit am Aalborger Universi-  
tätszentrum/Dänemark
- Höhle, J. 1987                    Application of Terrain Modelling in  
Coastal Areas  
Proceedings of the Colloquium "Pro-  
gress in Terrain Modelling", 10 S.,  
Lyngby/Dänemark