

Nr. 259

Folke Santel

**Automatische Bestimmung von  
Wasseroberflächen  
in der Brandungszone aus Bildsequenzen  
mittels digitaler Bildzuordnung**

HANNOVER 2006

---



Nr. 259

**Automatische Bestimmung von  
Wasseroberflächen  
in der Brandungszone aus Bildsequenzen  
mittels digitaler Bildzuordnung**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Folke Santel

HANNOVER 2006

---

Vorsitzender der Prüfungskommission: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Zielke  
Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reulke

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 2006

*„Jede Welle hat sozusagen eine eigene Statur, ein eigenes Gesicht und schließlich eine eigene Frisur in Form von Gischt auf ihrem Kopf.“*  
(MOERS 1999)

## **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur automatischen, dreidimensionalen und zeitlich kontinuierlichen Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen vorgestellt. Die wichtigsten Grundlagen, die zur Entwicklung des Verfahrens geführt haben, werden detailliert beschrieben. Das Verfahren beruht auf der Verwendung synchron erfasster photogrammetrischer Stereobildsequenzen und digitaler Bildzuordnung im Objektraum. Die Verifizierung des Verfahrens erfolgt über praktische Versuchsreihen in einem Bühnenfeld vor Norderney, bei denen vier synchronisierte digitale Videokameras zur Datenerfassung eingesetzt wurden.

Neben den Bildsequenzen selbst sind die Parameter der inneren und äußeren Orientierung und gegebene Startpunkte für das erste Stereomodell als Eingangsinformationen notwendig. Die Orientierungen der Bilddaten werden für die Dauer der Aufnahme der Bildsequenz als konstant angenommen. Die grundlegende Strategie basiert auf der punktwisen Zuordnung, der flächenhaften Ausbreitung und der Bildsequenzauswertung.

Die zuerst durchgeführte sukzessive punktwise Zuordnung erfolgt unter Verwendung des Kreuzkorrelationskoeffizienten und einer Variante des Vertical Line Locus. Durch die flächenhafte Ausbreitung dieses Prozesses mittels eines verfeinerten Region-Growing-Verfahrens unter Berücksichtigung der gegebenen Startpunkte wird eine dreidimensionale Punktwolke generiert. Das digitale Oberflächenmodell (DOM) entsteht durch anschließende Interpolation.

Die Grundidee der Bildsequenzauswertung ist, dass die Änderung der Höhe des DOMs in aufeinander folgenden Bildern einer Bildsequenz sehr gering ist. Die Größenordnung dieses Werts ist abhängig von der Aufnahmefrequenz, der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und der Wellenform. Der Prozess der Bildzuordnung wird durch die gegebenen Startpunkte initialisiert. Eine weitere Interaktion des Anwenders ist nicht notwendig, da das Verfahren für die folgenden Zeitpunkte die benötigten Startpunkte eigenständig aus den Ergebnissen der Auswertung des vorangegangenen Zeitpunkts ermittelt.

Die Bildzuordnung einer Sequenz von 14½ min, aufgenommen mit einer Frequenz von 8 Hz, konnte mit dem entwickelten Verfahren erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse der automatischen Auswertung werden zur Verifizierung manuellen Kontrollmessungen und Seegangsmessungen gegenüber gestellt. Für einen flächenhaften Vergleich werden manuelle Kontrollmessungen zu einzelnen stichprobenartig ausgewählten Zeitpunkten durchgeführt. Ein Vergleich über die Zeit erfolgt zu punktwisen Messungen eines Wellenmessdrahts und einer Geschwindigkeits-Druck-Sonde.

Die Ergebnisse der digitalen Bildzuordnung und die erzielte Genauigkeit im Bereich weniger Dezimeter zeigen, dass das vorgestellte Verfahren zur automatischen Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen geeignet ist.

Stichworte: Bildsequenzauswertung, digitale Bildzuordnung, Wasseroberfläche

## Summary

A new method for generating three-dimensional and temporally quasi-continuous wave surfaces in the surf zone from image sequences is introduced in this thesis. A detailed description of the fundamental basics leading to the development of the method is given. The method is based on synchronously acquired stereoscopic image sequences and image matching in object space. The verification of the method is carried out by a series of experiments at a groyne field on Norderney Island. For data acquisition four synchronised digital video cameras were used.

The computation of the digital surface model (DSM) from the images requires the interior and exterior orientation as well as seed points for the first stereo pair as input. The orientations are assumed to be constant for the duration of the acquisition of the image sequence. The basic idea of the strategy consists of point-wise correlation, region growing and image sequence analysis.

First a successive point-wise matching based on cross correlation using a variation of the vertical line locus method is carried out. A three-dimensional point cloud is generated through a sophisticated region growing algorithm starting from the given seed points. Subsequently, a digital surface model for one time step is obtained by interpolation.

The processing principle of image sequences in this method is that the change in height of the DSM from one time step to the next is very small. This value obviously depends on the recording frequency and the wave velocity as well as the shape of the wave. The process of image matching is started using the given seed points. No additional interaction of the user is needed. The method is able to find the needed seed points for the following time steps automatically.

Matching of a 14½ min image sequence acquired with a frequency of 8 Hz using the developed method was successfully carried out as described. The image matching results were checked by manual stereo analysis and conventional wave measurements. The comparison was first carried out with the manual measurement for one time step and afterwards with wave gauge and pressure transducer data for a comparison in time.

The digital image matching results and the calculated accuracy in the range of a few decimetres demonstrate the suitability of the presented method for the automatic determination of wave surfaces in the surf zone using image sequences.

Keywords: image sequence analysis, digital image matching, sea surface

# Inhalt

1	Einleitung.....	7
1.1	Zielsetzung der Arbeit.....	7
1.2	Inhalt der Arbeit.....	8
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	9
2.1	Digitale Bildzuordnung.....	9
2.1.1	Annahmen.....	9
2.1.2	Lösungsansätze.....	10
2.1.3	Block-Matching.....	12
2.1.4	Gradienten-Methode.....	13
2.1.4.1	Kleinste-Quadrate-Ansatz.....	13
2.1.4.2	Optischer Fluss.....	15
2.1.5	Merkmalszuordnung.....	16
2.2	Statistische Grundlagen.....	17
2.2.1	Berechnung von Schiefe und Exzess und deren Signifikanz.....	17
2.2.2	Zeitreihenanalyse.....	18
2.2.2.1	Autokovarianz- und Autokorrelationsfunktion.....	18
2.2.2.2	Energiespektrum.....	19
2.3	Bestimmung von Wasseroberflächen.....	20
2.3.1	Verfahren im Nahbereich.....	20
2.3.2	Fernerkundungsverfahren.....	22
2.3.3	Verfahren unter Laborbedingungen.....	23
2.4	Bewertung.....	23
3	Entwickelte Methode.....	25
3.1	Strategie.....	25
3.2	Punktweise Zuordnung.....	26
3.3	Flächenhafte Ausbreitung.....	28
3.4	Bildsequenzauswertung.....	29
3.5	Frei wählbare Steuerungsparameter.....	30
4	Experimentelle Überprüfung.....	31
4.1	Planungsgrundlagen.....	31
4.1.1	Aufnahmekonfiguration.....	32
4.1.2	Genauigkeitsabschätzung.....	32
4.1.3	Abschätzung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit.....	34

4.2	Verwendete Hardware .....	35
4.3	Durchgeführte Messkampagnen .....	36
5	Auswertung .....	37
5.1	Verwendete Steuerungsparameter .....	38
5.2	Oberflächenberechnung.....	39
5.3	Erstellung eines Referenzmodells .....	40
5.3.1	Transformationsbeziehungen.....	41
5.3.2	Beschreibung der Referenzmessung und Genauigkeitsabschätzung .....	41
6	Analyse der Ergebnisse .....	43
6.1	Innere Genauigkeit .....	43
6.1.1	Bewertung der Differenzmodelle .....	43
6.1.2	Problembereiche .....	44
6.2	Äußere Genauigkeit.....	44
6.2.1	Flächenhafte statische Verifizierung .....	45
6.2.2	Punktförmige dynamische Verifizierung.....	49
6.3	Bewertung .....	55
7	Bewertung und Ausblick .....	56
8	Literatur.....	58
	Dank.....	63
	Lebenslauf .....	64

# 1 Einleitung

Das Brechen der Brandung ist eines der spektakulärsten Naturschauspiele am Strand. Doch trotz aller Vertrautheit der Menschen mit dem Wasser hat es bis weit ins 19. Jahrhundert hinein gedauert, bis man zu einem vollständigen theoretischen Verständnis der einfachsten Wellen gelangte (TREFIL 2002).

Zusammen mit Windstau und Gezeitenhub führen Wellen auf Dauer zu einer stetigen und natürlichen Umgestaltung der Küsten. Fast immer stellen Wellen die Hauptbelastung für Küstenschutz und Meeresbauwerke dar. Bei den dadurch verursachten dynamischen Veränderungen in den Küstengebieten handelt es sich meist um komplizierte, dreidimensionale Prozesse mit großer horizontaler Ausdehnung. Der Verlauf der Veränderung gibt wichtige Hinweise auf den Zustand und die Effizienz bestehender Küstenschutzsysteme und bestimmt damit auch den Handlungsbedarf des Küstenmanagements.

Im Küstenschutz weicht der Neubau von Systemen aus Deckwerken und Buhnen zunehmend einer Kombination aus Strandaufspülungen und ingenieurbioologischen Maßnahmen, wie z.B. dem Dünenbau. Aus diesem Grund rückt verstärkt die Optimierung der Auffüllungen in den Mittelpunkt des Interesses. So wird z.B. Sand mit Hilfe von Schiffen aus tieferen Meeresbereichen abgesaugt und dann auf die besonders kritischen Bereiche der Strände gepumpt. Durch das gezielte Einbringen möglichst kleiner Massen an speziell ausgewählten Positionen soll die Standzeit von Strandaufspülungen erhöht und damit die Zahl notwendiger und kostenintensiver Wiederholungen reduziert werden.

Zur Prognose von Entwicklungen und Ereignissen in der Brandungszone sowie zur zielorientierten, kontrollierten und wirtschaftlichen Reaktion, werden im Küsteningenieurwesen physikalische und mathematische Modelle zur Simulation der Wasseroberfläche in der Brandungszone eingesetzt. Durch die Modellierung der Prozesse in der Brandungszone wie dem Wellenbrechen, dem Wellenaufbau und dem Wellenüberlauf können z.B. langfristig Gebiete des Massenauf- und Massenabtrags bestimmt werden.

Bei den mathematischen, insbesondere den numerischen Modellen besteht großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Weiterentwicklungen der Computertechnologie ermöglichen eine fortlaufende Verbesserung der numerischen Verfahren. Ein Problem stellt aber nach wie vor die Validierung der hydrodynamisch-numerischen Modelle dar (KFKI 2001). Hier fehlen oft geeignete Naturmessungen. So sind z.B. bisher eingesetzte Pegel- und Bojenmessungen zur Validierung solcher Modelle nur als Punktdaten verfügbar.

Die Entwicklung von Strategien für die Berechnung von brechenden Wellen und Wellenaufbau auf der Basis von numerischen Modellen bildete einen Schwerpunkt des Projekts *WaveScan*, das den Rahmen der vorliegenden Arbeit lieferte. Vor dem späteren Einsatz solcher Modelle muss eine umfassende Validierung erfolgen, die sich an der Auflösung des numerischen Modells orientiert. Punktmessungen z.B. mit Wellenmessdrähten oder Geschwindigkeits-Drucksonden sind in diesem Fall unzulänglich. Der zweite Schwerpunkt des Projekts war die Entwicklung photogrammetrischer Methoden zur Bestimmung flächendeckender und zeitaufgelöster Daten der Wasseroberfläche. Das Projekt *WaveScan – Automatisierte Erfassung und Modellierung von Brandungszonen auf Basis digitaler Bildsequenzen* war ein Gemeinschaftsprojekt des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen (ISEB) der Universität Hannover und des Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover.

## 1.1 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die automatisierte, flächendeckende, dreidimensionale und zeitlich kontinuierliche Bestimmung der Wasseroberfläche in der Brandungszone aus Bildsequenzen mit einer Genauigkeit in der Höhe im Dezimeterbereich zur Validierung numerischer Modelle. Untersuchungsgebiet ist ein Buhnenfeld vor Norderney mit einer Größe von 200 x 200 m<sup>2</sup>.

Zur Validierung der numerischen Modelle muss die räumliche Auflösung des photogrammetrischen Systems mit dem Gitterabstand des Modells übereinstimmen, welches von der Wellenlänge abhängig ist (STRYBNY & WEGMANN 2001).

In NIEMEYER & KAISER (1997) sind typische im Küstenvorfeld von Norderney auftretende Wellenspektren beschrieben. Die Periode der kürzesten zu untersuchenden Wellen liegt zwischen 2 und 3 s mit einer Länge im Flachwasser zwischen 5 und 10 m. Messungen eines Wellenmessdrahts in der Mitte des Untersuchungsgebiets ergaben eine Wellenperiode von 8.6 s und eine Wellenlänge von 29.5 m. Zur eindeutigen Beschreibung der Wellen im numerischen Modell sollen die kürzesten Wellen mit mindestens 10 Stützstellen pro Wellenlänge dargestellt werden. Daraus resultiert eine Gitterweite von 0.5 bis 1 m.

Die minimale Dauer der Datenerfassung ist durch die Zeit festgelegt, die eine Welle zum Durchqueren der Brandungszone von der äußeren seewärtigen Begrenzung bis zum Wellenauflauf benötigt. Dieser im Untersuchungsgebiet vorliegende Prozess erfordert eine Aufnahmezeit von ca. 1 min. Zur statistischen Analyse des Wellenverlaufs und Wellenaufbaus sind Messungen über eine längere Zeitdauer durchzuführen. Um hinreichende statistische Aussagen über die Wellenparameter in einer anschließenden Zeitreihenanalyse treffen zu können, müssen nach FRÖHLE (2000) ca. 200 Wellen analysiert werden. Bei einer mittleren Wellenperiode von 8 s im Untersuchungsgebiet muss das photogrammetrische Aufnahmesystem daher in der Lage sein, Daten über einen Zeitraum von bis zu 20 min aufzuzeichnen. Zur Beschreibung der Kinematik der Wasseroberfläche, verursacht durch den Seegang, muss eine hohe zeitliche Auflösung gegeben sein, welche sich nach der zeitlichen Auflösung des numerischen Modells richtet. Diese darf nicht größer sein als die Zeit, die ein Wasserpartikel zum Zurücklegen der Strecke von einem bis zum nächsten Gitterknoten des numerischen Modells benötigt. Für die numerische Modellierung ist in diesem Fall eine Aufnahmefrequenz von 8 Hz mehr als ausreichend.

## 1.2 Inhalt der Arbeit

In Kapitel 2 werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen allgemeinen theoretischen Grundlagen dargestellt. Zunächst wird die Theorie der digitalen Bildzuordnung beschrieben. Es wird sowohl auf die Voraussetzungen für die digitale Bildzuordnung als auch auf existierende Bildzuordnungsverfahren eingegangen. Im zweiten Abschnitt des Kapitels werden die in dieser Arbeit verwendeten statistischen Methoden erläutert. Abschließend werden die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Bestimmung von Wasseroberflächen vorgestellt und bewertet.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren wird in Kapitel 3 erläutert. Dieses setzt sich aus der punktwweisen Zuordnung, der flächenhaften Ausbreitung und der Bildsequenzauswertung zusammen.

Auf die zur Verifizierung des Verfahrens notwendige Datenerfassung inklusive der Planungsgrundlagen, der verwendeten Hardware und der durchgeführten Messkampagnen wird in Kapitel 4 detailliert eingegangen.

Kapitel 5 enthält die Beschreibung der verwendeten Steuerungsparameter des entwickelten Verfahrens und die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung eines ausgewählten Datensatzes. Des Weiteren wird die Erstellung eines Gesamtmodells aus der Kombination zweier Stereomodelle und eines manuell bestimmten Referenzmodells beschrieben.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung analysiert und bewertet. Für einzelne Zeitpunkte wird ein flächenhafter Vergleich von manueller und automatischer Auswertung durchgeführt. Es folgt ein Vergleich in der Zeit für einzelne Punkte durch den Vergleich mit zusätzlich durchgeführten Seegangsmessungen. Ferner werden die erzielten Ergebnisse diskutiert und die Problembereiche des Ansatzes herausgearbeitet.

Die abschließende Bewertung in Kapitel 7 zeigt die methodischen Stärken und Schwächen des entwickelten Verfahrens auf. Im Ausblick werden Vorschläge für weitere Entwicklungen und Optimierungen des Verfahrens gegeben.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Grundlagen zur photogrammetrischen Bestimmung von Wasseroberflächen aus digitalen Bildsequenzen werden im Folgenden wiedergegeben. Es wird auf die Annahmen und Ansätze zur Lösung des Korrespondenzproblems eingegangen und die verschiedenen Ansätze der digitalen Bildzuordnung zur Auswertung von Bildpaaren vorgestellt. Des Weiteren werden die in dieser Arbeit zur Analyse der Ergebnisse der digitalen Bildzuordnung mittels Kreuzkorrelation verwendeten statistischen Grundlagen erläutert. Abschließend wird die Anwendung der digitalen Bildzuordnung zur Bestimmung von Wasseroberflächen beschrieben.

### 2.1 Digitale Bildzuordnung

Die Herausforderung der automatischen Zuordnung korrespondierender Bildmerkmale (Korrespondenzproblem) ist sowohl eine der ältesten als auch eine der aktuellsten Fragestellungen des Bildverstehens. Die Grundlagen wurden in den Bereichen Photogrammetrie (SHARP et al. 1965), Psychologie und Biokybernetik (MARR & POGGIO 1979) und Computer Vision (HORN 1986, SHIRAI 1987) gelegt. Das Ziel der Anwendungen ist die automatische Auswertung von Bildern ohne manuellen Eingriff. Die Bildzuordnungsverfahren werden in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. der Oberflächenrekonstruktion, der Bildorientierung oder der Bildsequenzanalyse eingesetzt.

Die zum Teil erheblichen Disparitäten zwischen den homologen Punkten in den Stereobildern beruhen auf unterschiedlichen Kameraorientierungen und damit auf verschiedenen perspektivischen Abbildungen eines dreidimensionalen Objekts. Da einzelne Bildpunkte nur aufgrund ihrer Intensität und Farbe unterschieden werden können, werden bestimmte Bereiche um die Bildpunkte betrachtet und diese Bereiche im linken und im rechten Bild miteinander verglichen.

Das allgemeine Korrespondenzproblem basiert auf der eindeutigen Zuordnung zweier oder mehrerer unterschiedlicher Objektbeschreibungen im Bild. Eine Bildzuordnung ist in diesem Sinne erfolgreich, wenn sich die Strahlen, ausgehend von den jeweiligen Projektionszentren, durch die gefundenen korrespondierenden Bildpunkte in einem Punkt der Oberfläche schneiden. Das Korrespondenzproblem gehört zu der Gruppe der „schlecht gestellten Probleme“. Es ist nicht gewährleistet, dass eine Lösung existiert und diese eindeutig und robust gegenüber Änderungen in den Eingangsdaten ist. Zum einen gibt es Bereiche, in denen grundsätzlich keine Korrespondenz existiert. Aufgrund der unterschiedlichen Perspektive haben beide Kameras verschiedene Sichtbereiche, in welchen im jeweils anderen Bild kein entsprechendes Bildmerkmal gefunden werden kann. Zum anderen können durchsichtige Oberflächen sowie bestimmte Bildmuster zu Schwierigkeiten bei der Korrespondenzanalyse führen. In der Regel treten Probleme bei periodischen oder mehrdeutigen Strukturen und in texturarmen Regionen auf (LUHMANN 2000).

Es existiert keine generelle Lösung des Korrespondenzproblems. Es können jedoch verschiedene Ähnlichkeitsbedingungen formuliert werden, die den Verarbeitungsprozess wesentlich vereinfachen und zuverlässigere Ergebnisse liefern (z.B. KLETTE et al. 1998, SCHREER 2005). Im Folgenden werden entsprechende Annahmen und Lösungsansätze vorgestellt.

#### 2.1.1 Annahmen

Die Projektion eines dreidimensionalen Punkts in die Bildebene kann nur zu jeweils einer Abbildung im linken und im rechten Bild führen. Mit der Eindeutigkeitsbedingung wird die Mehrdeutigkeit von Punktkorrespondenzen überprüft. Zu einem Punkt im linken Bild können z.B. aufgrund von mehrdeutigen Objektstrukturen mehrere Kandidaten im rechten Bild existieren.

Die Glattheitsbedingung geht davon aus, dass sich die Tiefe von Objektpunkten nur kontinuierlich ändert, d.h. dass sich die Disparität örtlich benachbarter Bildpunkte nur innerhalb einer vorgegebenen Toleranz bewegt. Diese Bedingung ist nicht erfüllt in Bereichen, in denen sich verschiedene Objekte in unterschiedlicher Tiefe verdecken. Hier liegen so

genannte Tiefensprünge vor, die sich in den Stereoansichten in Diskontinuitäten bzw. in Sprüngen in den Disparitäten auswirken.

Eine weitere Reduzierung der Mehrdeutigkeiten bei der Korrespondenzanalyse wird durch eine Annahme über die Reihenfolge der abgebildeten Punkte entlang korrespondierender Linien in den Bildern erreicht (LITTLE & GILLET 1990, SILVA & SANTOS-VICTOR 2000). Punkte, die in einem Stereobild auf einer Linie liegen, werden in genau derselben Reihenfolge auf der korrespondierenden Linie des anderen Bilds abgebildet. Durch eine extrem unterschiedliche Perspektive in beiden Bildern kann es bei transparenten Oberflächen zu einer Verletzung der Reihenfolge-Bedingung kommen. Der perspektivische Unterschied hängt sowohl von der Anordnung der Kameras zueinander als auch von der Tiefenstruktur innerhalb der Szene ab.

Ferner kann der Bereich möglicher Lösungen durch das Einbringen von Vorwissen über die Bildentstehung zur Herstellung von Beziehungen zwischen den aufgenommenen Bildern und dem dreidimensionalen Objekt eingeschränkt werden. Bei bekannten Orientierungsparametern wird z.B. durch die Anwendung der Epipolarometrie ein weiterer Zusammenhang zwischen dem linken und dem rechten Bild hergestellt. Homologe Punkte befinden sich in der Epipolarebene und somit auch auf den zugehörigen Epipolarlinien. Für den Sonderfall des Stereonormalfalls liegen die Epipolarlinien parallel zur Basis. Durch den Einsatz der Epipolarometrie wird der Suchbereich für die Zuordnung homologer Punkte auf eine Dimension begrenzt, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht und die Bestimmung von Oberflächenmodellen beschleunigt.

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Bedingungen geht der Vertical Line Locus (VLL) nicht vom Bild- sondern vom Objektraum aus. Durch das Verfahren des VLL können die Bildzuordnung und die Objektrekonstruktion zu einem geschlossenen Auswerteprozess zusammengefasst werden. Entlang der Lotlinie eines Objektpunkts wird eine Serie gleichabständiger Punkte in Z-Richtung definiert und das Ähnlichkeitsmaß der zugehörigen Bildausschnitte für jeden dieser Punkte berechnet (BETHEL 1986). Im Gegensatz zur Epipolarometrie verändert sich die Position der zu korrelierenden Bildausschnitte in beiden Bildern. Für jede Zuordnung muss daher die Position der beiden Bildausschnitte neu berechnet werden. Der gesuchte Objektpunkt wird durch das maximale Ähnlichkeitsmaß definiert. Das Verfahren ist nicht auf den Stereofall beschränkt und lässt sich auf beliebig viele Bilder pro Punkt erweitern.

### 2.1.2 Lösungsansätze

Zur Überprüfung korrespondierender Punkte ist der Konsistenztest ein sehr wirksames Verfahren (HANNAH 1989, CHANG et al. 1991, FUA 1993). Beim Konsistenztest wird vorausgesetzt, dass die Bildzuordnung in beiden Richtungen, also vom linken zum rechten Bild und vom rechten zum linken Bild, erfolgreich durchgeführt wurde und die gefundenen Objektpunkte identisch sind. Um Ungenauigkeiten in der Berechnung zu berücksichtigen, wird eine Schwelle eingeführt, unterhalb derer sich die Differenz der beiden Objektpunktkoordinaten befinden muss. Der Konsistenztest weist falsche Korrespondenzen zurück. Dies geschieht verstärkt in Bereichen mit Objektverdeckungen und in texturschwachen Bildbereichen, da dort aufgrund geringer Struktur Fehlkorrespondenzen geschätzt werden können.

Eine andere Herangehensweise an das Problem der Lokalisierung ist die geeignete Anpassung der Umgebungen um potentielle homologe Punkte an den Bildinhalt. Um eine zuverlässige Bestimmung der Disparität zu erreichen, ist eine große Grauwertvariation und damit ein genügend großer Bildausschnitt, ein so genanntes Fenster, notwendig. Auf der anderen Seite kann ein großes Fenster Regionen erfassen, in welchen die Tiefe der Szenenpunkte stark variiert. Durch unterschiedliche perspektivische Verzerrungen kann dies zu Ähnlichkeitsmaxima oder -minima führen, die keiner korrekten Korrespondenz zwischen linkem und rechtem Stereobild entsprechen. Wird das Fenster klein gewählt, kann der Einfluss durch perspektivische Verzerrungen vermindert werden. Allerdings reduziert sich dadurch die Grauwertvariation, und die Disparitätsbestimmung verschlechtert sich. Es liegt ein sich gegenseitig beeinflussender Zusammenhang zwischen der Genauigkeit der Disparitätsbestimmung und der Korrektheit der Zuordnung zweier Bildpunkte vor. In KANADE & OKUTOMI (1994) wird ein Konzept zu adaptiven Fenstern vorgestellt. Für jeden Bildpunkt wird ein geeignetes Fenster hinsichtlich Größe und Form gefunden. Innerhalb des Fensters sollten die Grauwertvariationen möglichst groß und keine Disparitätssprünge enthalten sein. Die Grauwertvariation in einem Fenster kann einfach berechnet werden. Hingegen sind die Disparitätssprünge das Ergebnis einer Korrespondenzanalyse. Durch die Einführung eines stati-

schen Modells für die Disparität wird in einem iterativen Prozess die Größe und Form des Messfensters variiert bis sich eine maximale Korrespondenz ergibt. BOBICK & INTILLE (1999) stellen ein Verfahren vor, bei dem für jeden Bildpunkt neun Fenster mit konstanter Fenstergröße und unterschiedlichen Fenstermittelpunkten überprüft werden. Es wird angenommen, dass das Fenster mit dem größten Ähnlichkeitsmaß eine Bildregion mit annähernd konstanter Tiefe, also ohne Disparitätssprünge, aufweist.

Zur Vereinfachung der Bildzuordnung kann eine Musterprojektion auf das Objekt eingesetzt werden. Durch die Projektion von Mustern auf texturarme oder texturlose Oberflächen werden die für die Bildzuordnung notwendigen lokalen Grauwertunterschiede erzeugt. Die Oberflächenbestimmung wird möglich. Bei einigen Verfahren kann dadurch die Zuordnung homologer Bildstellen erleichtert werden. Die unterschiedlichen Verfahren der Musterprojektion sind der Literatur zu entnehmen (SCHEWE 1988, KRAUS 1996).

Alternativ kann die geometrische Beziehung zwischen den Orthophotos und dem zu erstellenden Oberflächenmodell berücksichtigt werden. SCHENK et al. (1990) und NORVELLE (1992) nehmen z.B. die beiden aus einem Stereobildpaar und dem zugehörigen Oberflächenmodell erzeugten Orthophotos als identisch an. Die Fehlzuordnungen in den Orthophotos können durch digitale Bildzuordnung bestimmt werden. Daraus werden die entsprechenden Fehler in der Höhe des Oberflächenmodells abgeleitet und zu dessen Verbesserung verwendet.

Bei fast allen Methoden in der Bildzuordnung werden für die genaue Lokalisierung homologer Bildinformation hierarchische Verfahren, wie z.B. die Verwendung von Bildpyramiden, eingesetzt (ACKERMANN & HAHN 1991). Eine Bildpyramide enthält die Informationen eines Bilds in unterschiedlichen Auflösungsstufen. Eine höhere Bildpyramidenstufe wird durch die Zusammenfassung benachbarter Bildelemente und durch die Verwendung eines Tiefpassfilters erzeugt. Ausgehend vom Originalbild in der untersten Stufe verschwinden in jeder Pyramidenstufe mit abnehmender Bildauflösung kleine Bildstrukturen und der Informationsgehalt sinkt mit zunehmender Verkleinerung. Markante Strukturen sind leichter zu detektieren, aber weniger genau zu lokalisieren. Bildpyramiden erlauben die schrittweise Verfeinerung des Oberflächenmodells. Die Ergebnisse der Zuordnung einer Pyramidenstufe mit geringerer Auflösung dienen als Näherungswerte für die Bildzuordnung in der jeweils höheren Auflösungsstufe. Die Ergebnisse müssen zuverlässig von der obersten Pyramidenstufe bis zum Originalbild übertragen werden. Aufgrund der Eigenschaften der Pyramidenstruktur können Merkmale bei der Übertragung zwischen zwei Stufen nicht eindeutig sein. Ein Merkmal einer bestimmten Pyramidenstufe kann ein Indikator für ein gutes Merkmal, eine Repräsentation mehrerer Merkmale oder für ein Pseudo-Merkmal sein, das auf einer unteren Pyramidenstufe nicht mehr auftritt (WANG 1994, HEIPKE 1995). Wegen der unsicheren Lokalisierbarkeit von Merkmalen in höheren Stufen wird in der Regel jedes Paar homologer Punkte auf die nächst tiefere Pyramidenstufe projiziert und dort eine unabhängige Zuordnung durchgeführt.

Die vorgestellten Ähnlichkeitsbedingungen und Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems bilden die Grundlagen für die automatische Bildzuordnung. Unter Berücksichtigung dieser werden im Folgenden Verfahren zur photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion dreidimensionaler Objekte beschrieben. Die verschiedenen digitalen Bildzuordnungsverfahren lassen sich in Anlehnung an BROWN et al. (2003) in zwei Gruppen unterteilen: lokale und globale Bildzuordnungsverfahren. Die lokalen Verfahren beschränken sich auf eine geringe Anzahl an Pixel, die das interessierende Pixel umgeben, die globalen Verfahren auf Abtastlinien oder das gesamte Bild. Einen detaillierten Überblick über die lokalen und globalen Verfahren zur Bildzuordnung von Stereobildpaaren sowie einen Vergleich der verschiedenen Verfahren geben SZELISKI & ZABIH (1999) und SCHARSTEIN & SZELISKI (2002).

Das Ziel der globalen Verfahren ist die Zerlegung eines komplexen Problems in weniger komplexe Teilprobleme mit aufeinander aufbauenden Teillösungen. Durch die große Anzahl an Ähnlichkeitsberechnungen und dem daraus resultierenden hohen Rechenaufwand ist die globale Korrespondenzanalyse nur begrenzt einsetzbar. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten nur die wichtigsten lokalen Bildzuordnungsverfahren diskutiert. Die lokalen Bildzuordnungsverfahren können in drei Gruppen eingeteilt werden: das Block-Matching, die Gradienten-Methode und die Merkmalszuordnung.

### 2.1.3 Block-Matching

Beim Block-Matching bilden die originären Grauwerte in einer lokalen Umgebung der zu untersuchenden Punkte in zwei Bildern die Grundlage für den Vergleich. Eine Mustermatrix aus dem ersten Bild wird pixelweise über eine größere Suchmatrix des zweiten Bilds geschoben. Die Mustermatrix besteht aus  $R$  Zeilen und  $C$  Spalten. Unter Verwendung eines zu definierenden Ähnlichkeitsmaßes und durch die Erfüllung der Ähnlichkeitsbedingungen wird die Bildposition ermittelt, die für die gewählte Mustermatrix die Position mit dem besten Ähnlichkeitsmaß in der Suchmatrix angibt.

Ein einfacher Ansatz zur Bestimmung eines Ähnlichkeitsmaßes ist die Bildung der Quadratsumme der Abstände der Grauwerte  $g_1(x, y)$  des ersten und  $g_2(x, y)$  des zweiten Bilds, die sich an  $R \cdot C$  korrespondierenden Matrizenpositionen befinden. Dieses Vorgehen führt unter Verwendung der quadrierten, euklidischen Distanz zwischen den Grauwerten an den jeweiligen Matrizenpositionen zur Summe der quadrierten Differenzen:

$$C_{SSD} = \sum_{x=1}^R \sum_{y=1}^C (g_1(x, y) - g_2(x, y))^2 \quad (2.1)$$

mit

$g_1(x, y)$  : einzelner Grauwert der Mustermatrix im ersten Bild

$g_2(x, y)$  : einzelner Grauwert der gewählten Mustermatrix in der Suchmatrix des zweiten Bilds

Eine optimale Übereinstimmung von Muster- und Suchmatrix ergibt sich bei  $C_{SSD} = 0$ . Helligkeits- und Kontrastunterschiede zwischen Muster- und Suchmatrix können ebenso wie Maßstabs- und Rotationsunterschiede zu Fehlzuordnungen führen.

Ein weiteres parametrisches Maß für die Ähnlichkeit zweier Muster ist der Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho$ . Dieser wird definiert durch:

$$\rho = \frac{\sum_{x=1}^R \sum_{y=1}^C (g_1(x, y) - \bar{g}_1) \cdot (g_2(x, y) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{x=1}^R \sum_{y=1}^C (g_1(x, y) - \bar{g}_1)^2 \cdot \sum_{x=1}^R \sum_{y=1}^C (g_2(x, y) - \bar{g}_2)^2}} \quad (2.2)$$

mit

$\bar{g}_1$  : mittlerer Grauwert der Mustermatrix im ersten Bild

$\bar{g}_2$  : mittlerer Grauwert der gewählten Mustermatrix in der Suchmatrix des zweiten Bilds

Der maximale Betrag des Kreuzkorrelationskoeffizienten  $\rho$  wird als beste Lageübereinstimmung von Muster- und Suchmatrix betrachtet. Der Wert  $\rho$  kann zwischen  $-1$  und  $+1$  variieren. Nimmt  $\rho$  den Wert  $-1$  an, wird eine negative Entsprechung innerhalb der Suchmatrix gefunden, bei  $+1$  eine positive.

Die Kreuzkorrelation ist ein robustes, flächenhaftes sowie helligkeits- und kontrastunabhängiges Verfahren mit hohem Rechenaufwand. Maßstabsunterschiede, Rotationen und Verzerrungen zwischen Muster- und Suchmatrix werden nicht berücksichtigt und führen zu einem geringeren Korrelationskoeffizienten. Das Verfahren ist auf Maßstabsunterschiede bis ca. 30 % und Rotationen bis ca. 20° beschränkt (FÖRSTNER 1985). Die erreichbare Bildmessgenauigkeit liegt bei 0.1 Pixel (LUHMANN 2000). In Gebieten mit schwachem Informationsgehalt, z.B. verursacht durch homogene Oberflächen, ist eine sichere Zuordnung nicht möglich. Fehlzuordnungen bei sich wiederholenden Strukturen sind nicht auszuschließen.

Bei einem Vergleich von Bildpunkten in zwei Matrizen können nicht nur die Grauwerte selbst verwendet werden, sondern auch die relative Anordnung der Bildpunktintensitäten zueinander. Vor einem Vergleich wird dafür eine so genannte nicht-parametrische Transformation durchgeführt. Als wichtigste Transformationen sind hier die Rank- und Census-Transformation zu nennen (ZABIH & WOODFILL 1994).

Die Rank-Transformation berechnet für jeden Bildpunkt  $g_i(x, y)$  in einem Messfenster um diesen die Anzahl der Bildpunkte, deren Grauwert kleiner als der Grauwert des Bildpunkts selbst ist. Für jeden Bildpunkt wird so ein neuer Wert  $g_i'(x, y)$  ermittelt. Die beiden rank-transformierten Bilder werden anschließend mit einem parametrischen Ähnlichkeitsmaß, wie z.B. der Summe der quadrierten Differenzen verglichen. Die Matrixgröße zur Bestimmung des Ähnlichkeitsmaßes kann sich von der Größe des Messfensters der Rank-Transformation unterscheiden.

Der Vorteil der Rank-Transformation ist zum einen die geringe Empfindlichkeit gegenüber radiometrischen Veränderungen im Bild und zum anderen die Robustheit gegenüber Ausreißern und Verdeckungen. Von Nachteil ist, dass durch die Anwendung der Rank-Transformation nicht alle vorhandenen Informationen für die Zuordnung genutzt werden, da die Grauwerte  $g_i(x, y)$  durch die rank-transformierten Werte  $g_i'(x, y)$  repräsentiert werden und somit die Verteilung der Grauwerte nicht berücksichtigt wird.

Bei der Census-Transformation wird jedem Bildpunkt eine Bit-Kette zugewiesen, die die Relation der Grauwerte der Bildpunkte in einem Messfenster bezüglich des Grauwerts des Fenstermittelpunkts beschreibt. Ist der Grauwert kleiner als der Grauwert des Fenstermittelpunkts, wird die entsprechende Position in der Bit-Kette auf Eins und ansonsten auf Null gesetzt. Die Länge der Bit-Kette entspricht der Anzahl der verglichenen Bildpunkte im Messfenster. Die Bestimmung der Ähnlichkeit von zwei Bildpunkten erfolgt über den Vergleich von Bit-Ketten. Die Anzahl der unterschiedlichen Bits in den zwei Bit-Ketten wird als Hamming-Distanz bezeichnet. Analog zu den Betrachtungen zu den parametrischen Ähnlichkeitsmaßen wird die Ähnlichkeit über die Summe von Hamming-Distanzen berechnet.

Die Census-Transformation ist eine Variation der Rank-Transformation, die zusätzlich die räumliche Verteilung der Grauwerte bei der Zuordnung berücksichtigt. Allerdings erhöht sich dadurch die für die Zuordnung abzuspeichernde Information um einen Faktor, der von der Größe des Messfensters abhängig ist.

## 2.1.4 Gradienten-Methode

Die Gradienten-Methode, auch optischer Fluss genannt, wird zur Berechnung lokaler Verschiebungsfelder z.B. von Bild zu Bild einer Bildfolge verwendet (HORN 1986). Wird in der Gleichung des optischen Flusses die Ableitung nach der Zeit durch die Grauwertdifferenzen eines Stereobildpaars ersetzt, führt dies zum Kleinste-Quadrate-Ansatz. Im Folgenden wird dieser und als eine mögliche Lösung des optischen Flusses das Horn-Schunck-Verfahren beschrieben. Einen guten Überblick über weitere Methoden zur Berechnung des optischen Flusses geben z.B. SONKA et al. (1993).

### 2.1.4.1 Kleinste-Quadrate-Ansatz

Bei der Verwendung des Kleinste-Quadrate-Ansatzes zur Bildzuordnung werden die geometrischen Abweichungen vom Normalfall der Photogrammetrie berücksichtigt (FÖRSTNER 1982, FÖRSTNER 1984, SCHENK 1999). Die geometrische Anpassung der Muster- auf die Suchmatrix kann durch eine Transformation beschrieben werden. Die Abbildung kann z.B. bei Einhaltung der Zentralperspektive durch eine Projektivtransformation oder für genügend kleine Bildausschnitte durch eine ebene Affintransformation bestimmt werden. Exemplarisch wird hier zur geometrischen Transformation die Affintransformation (6-Parameter-Transformation) gewählt:

$$\begin{aligned}x_2 &= a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 \\y_2 &= b_0 + b_1x_1 + b_2y_1\end{aligned}\tag{2.3}$$

Die Translationsparameter  $a_0$  und  $b_0$  geben die relative Verschiebung zwischen Muster- und Suchmatrix an. Die Parameter  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  und  $b_2$  lassen einerseits beliebige Maßstäbe in beiden Koordinatenrichtungen und andererseits Dreh- und Scherungswinkel zwischen den Koordinatenachsen zu. Die Koordinaten  $x_2$  und  $y_2$  sind in der Regel keine ganzzahligen

Werte. Die zugehörigen Grauwerte  $g_2(x_2, y_2)$  müssen in geeigneter Weise interpoliert werden. Vorwiegend wird dazu eine bilineare Interpolation angewendet.

Zur Kompensation radiometrischer Helligkeits- und Kontrastunterschiede zwischen Muster- und Suchmatrix wird eine lineare Transformation angesetzt. Jeder Grauwert der Mustermatrix wird durch den entsprechend radiometrisch transformierten Grauwert der Suchmatrix ausgedrückt:

$$g_1(x_1, y_1) = r_1 + r_2 \cdot g_2(x_2, y_2) \quad (2.4)$$

mit

- $r_1$  : Helligkeitsanpassung
- $r_2$  : Kontrastanpassung

Aus Gleichung (2.4) kann die Beobachtungsgleichung abgeleitet werden:

$$0 = r_1 + r_2 \cdot g_2(x_2, y_2) - g_1(x_1, y_1) \quad (2.5)$$

Aufgrund der Nichtlinearität der Grauwertfunktion  $g_2(x_2, y_2)$  muss die Gleichung im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung linearisiert werden. Zusammengefasst ergeben sich die in einer Taylorreihe linearisierten Verbesserungsgleichungen. Die Verbesserungen  $v(x_1, y_1)$  berechnen sich nach Gleichung (2.6). Die Linearisierung nach Taylor wird nach dem ersten Glied abgebrochen.

$$v(x_1, y_1) = r_1 + r_2 \cdot g_2(a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1, b_0 + b_1 x_1 + b_2 y_1) - g_1(x_1, y_1) \quad (2.6)$$

Die geometrischen Unbekannten  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  und  $b_2$  sowie die radiometrischen Unbekannten  $r_1$  und  $r_2$  werden im Rahmen der Ausgleichung bestimmt. Bedingt durch die Linearisierung der Beobachtungsgleichungen muss die Lösung iterativ erfolgen. Näherungswerte für die Unbekannten können aus bekannten geometrischen Objektparametern und Orientierungsdaten, durch manuelle Messung oder aus der Merkmalszuordnung (siehe Kapitel 2.1.5) gewonnen werden.

Das entscheidende Merkmal für eine erfolgreiche Zuordnung ist die Grauwertverteilung. Die lokale Änderung der Grauwerte in benachbarten Bildelementen wird durch den Grauwertgradienten beschrieben. Die Grauwertgradienten ergeben sich aus der Linearisierung der Grauwerte der Bildausschnitte. Gebiete mit schwacher Textur werden z.B. durch kleine Grauwertgradienten gekennzeichnet.

Der Vorteil der Kleinste-Quadrate-Zuordnung ist das hohe Genauigkeitspotential. Das funktionale Modell ist in der Regel hoch überbestimmt, da für die zu bestimmenden geometrischen und radiometrischen Parameter alle Grauwerte eines Bildausschnitts als Beobachtungen vorliegen. Die nach der Lösung des funktionalen Modells berechneten Verbesserungen stellen die verbleibenden, nicht vom Modell erfassbaren Grauwertdifferenzen zwischen der Mustermatrix und der ausgeglichenen Suchmatrix dar. Aussagen über die geometrische Stabilität und Zuverlässigkeit des funktionalen Modells lassen sich aus Untersuchungen der Kofaktormatrix der Verbesserungen  $Q_{vv}$  ableiten (MAAS 1992). Eine entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Zuordnung ist die Bereitstellung guter Näherungswerte für die unbekannten Parameter. Schlechte Näherungswerte können zu einer hohen Anzahl an Iterationen, zu grob falschen Ergebnissen oder zur Divergenz der Berechnung führen. Die Verwendung von Bildpyramiden entschärft die Forderung nach guten Näherungswerten und verringert die Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung.

Ferner kann das eingeführte funktionale Modell des Verfahrens der Kleinste-Quadrate-Zuordnung erweitert werden. Bei der Mehrpunktzuordnung werden mehrere Punkte innerhalb eines Fensters gleichzeitig bestimmt (ROSENHOLM 1986). Der Bildraum wird dafür in ein Gitter unterteilt und für jedes Bildelement des Gitters wird die Verschiebung der Mustermatrix relativ zur Suchmatrix als eine Funktion der Verschiebung in den Gitterpunkten formuliert. Statt einer Affintransformation werden in einem Ausgleichungsschritt für jedes Gitterelement die unbekannten Verschiebungen

(Gitterparallaxen) simultan bestimmt. Dies führt bei der Ableitung konsistenter digitaler Geländemodelle zu einer Steigerung der Genauigkeit und der Stabilität des Verfahrens.

Die geometrische Objektrauminformation findet Berücksichtigung im Adaptiven Kleinste-Quadrate-Algorithmus (GRÜN 1985). Durch die Einbeziehung von geometrischen Bedingungen können die digitale Bildzuordnung und die photogrammetrische Punktbestimmung simultan in einem gemeinsamen Modell durchgeführt werden. Der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen der Bildelemente und den Änderungen der Objektkoordinaten wird durch die Kollinearitätsgleichungen hergestellt. Aufgrund der Schnittbedingung homologer Strahlen in einem Objektpunkt werden für die Muster- und Suchmatrix je zwei Bedingungsgleichungen formuliert. Die Vorteile der geometrischen Bedingungsgleichungen werden in GRÜN & BALTSAVIAS (1986) aufgezeigt. Die Koordinaten des jeweiligen Objektpunkts werden als zusätzliche Unbekannte in der Ausgleichung mitbestimmt. Unbekannte Bildorientierungen können auf gleiche Weise ermittelt werden. Ferner besteht die Möglichkeit, mehr als zwei Bilder simultan zu verarbeiten. Neben der Lösung der Mehrdeutigkeiten liegt weiteres Potential in der Steigerung der Zuverlässigkeit im Hinblick auf Verdeckungen in einzelnen Bildern aus einem Verband von mehr als zwei Bildern.

Eine weitere Verallgemeinerung stellt die Verbindung der Mehrpunktzuordnung mit dem Adaptiven Kleinste-Quadrate-Algorithmus dar (EBNER et al. 1987, WROBEL 1987, HELAVA 1988). Das Ziel der Bildzuordnung im Objektraum ist die dreidimensionale Oberflächenrekonstruktion durch die simultane Bestimmung der Orientierungsparameter, der Objektpunktkoordinaten und der Parameter zur Oberflächenbeschreibung im Objektkoordinatensystem. Die Grauwerte aller vorliegenden Bilder eines Objekts werden mit den gesuchten Größen zur Objektrekonstruktion verknüpft.

#### 2.1.4.2 Optischer Fluss

Zur Bestimmung des optischen Flusses wird angenommen, dass die Grauwertänderungen von Bild zu Bild einer Bildfolge durch Objektbewegungen verursacht werden. Der optische Fluss ist eine Approximation des lokalen Verschiebungsfelds. Diese Approximation ist mit bestimmten Annahmen behaftet, z.B. ist bei einer vor einer Kamera rotierenden Kugel mit konstanter Oberflächenbeschaffenheit kein optischer Fluss zu beobachten, obwohl eine Bewegung von Oberflächenpunkten stattfindet. Ähnliches gilt für Bewegungen gleichförmig texturierter Oberflächen. Hingegen kann bei einer fest stehenden Kugel und sich ändernden Lichtverhältnissen ein optischer Fluss für die Kugeloberfläche beobachtet werden, obwohl keine Bewegung von Oberflächenpunkten stattfindet. Ein optischer Fluss kann auch durch eine Instabilität der Kamera während der Aufnahme, durch veränderte Schattenwurfssituationen oder durch unterschiedliche Oberflächenreflexion hervorgerufen werden.

Der zu ermittelnde Verschiebungsvektor  $v(x, y) = (v_x(x, y), v_y(x, y))^T$  beschreibt den Verlauf der Grauwertänderungen zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t + \Delta t$ . Es wird angenommen, dass der zeitliche Abstand  $\Delta t$  zwischen den Bildern der Bildfolge konstant ist. Zur eindeutigen Lösung des optischen Flusses werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: die beobachtete Helligkeit ist konstant über die Zeit und benachbarte Objektpunkte bewegen sich in gleicher Art und Weise (Glattheitsbedingung). Die Bestimmung des jeweiligen Verschiebungsvektors erfolgt daher unter Betrachtung einer kleinen Umgebung von  $g(x, y)$ :

$$g(x, y, t) = g(x + v_x(x, y), y + v_y(x, y), t + \Delta t) \quad (2.7)$$

Durch die Anwendung der Gleichung (2.7) kann der Verschiebungsvektor  $v(x, y)$  nicht eindeutig bestimmt werden.

Bei der Anwendung des Horn-Schunck-Verfahrens (HORN & SCHUNCK 1981) erfolgt die Lösung der Gleichung (2.7) durch eine Taylorreihen-Entwicklung unter Vernachlässigung der Glieder quadratischer und höherer Ordnung. Es wird speziell die Taylorreihen-Entwicklung von  $g(x, y, t)$  für einen kleinen Schritt  $(v_x(x, y), v_y(x, y), \Delta t)$  betrachtet:

$$v_x(x, y) \frac{\partial g}{\partial x}(x, y, t) + v_y(x, y) \frac{\partial g}{\partial y}(x, y, t) + \Delta t \cdot \frac{\partial g}{\partial t}(x, y, t) = 0 \quad (2.8)$$

In vereinfachter Form ergibt sich für  $\Delta t = 1$  aus Gleichung (2.8):

$$v_x(x, y) \frac{\partial g}{\partial x}(x, y, t) + v_y(x, y) \frac{\partial g}{\partial y}(x, y, t) + \frac{\partial g}{\partial t}(x, y, t) = 0 \quad (2.9)$$

Bei der Betrachtung eines einzelnen Zeitpunkts der Bildfolge führt Gleichung (2.9) zu einem unterbestimmten Gleichungssystem. Aufgrund der Annahme der Glattheitsbedingung wird zur Bestimmung des jeweiligen Verschiebungsvektors für jeden Grauwert einer kleinen Umgebung von  $g(x, y)$  die Gleichung (2.9) aufgestellt und als eine Bedingungsgleichung in eine Ausgleichung nach dem Allgemeinfall eingeführt.

Für die Auswertung eines Stereobildpaars kann in Gleichung (2.9) die Ableitung nach der Zeit durch die Grauwertdifferenz des linken und rechten Bilds ersetzt werden (LUCAS & KANADE 1981). Auf der Grundlage dieser Annahme kann aus Gleichung (2.9) die Ausgangsgleichung (2.6) der digitalen Bildzuordnung nach dem Kleinste-Quadrate-Ansatz abgeleitet werden.

### 2.1.5 Merkmalszuordnung

Im Gegensatz zu den grauwertbasierten Verfahren werden bei der Merkmalszuordnung nur ausgewählte Bildmerkmale hinsichtlich ihrer Korrespondenz untersucht. In einem ersten Schritt werden geeignete Merkmale wie z.B. markante Punkte, Kanten und Flächen aus den Bildern unabhängig voneinander extrahiert. Neben der genauen geometrischen Lage werden dabei auch die das Merkmal beschreibenden Attribute ermittelt. Für Punkte können das z.B. der minimale und der maximale Grauwertgradient in unterschiedlichen Richtungen, für Kanten deren Länge oder Krümmung und für Flächen die Größe, die Form, der mittlere Grauwert oder die Varianz der Grauwerte innerhalb der Fläche sein. In der Regel werden diese Attribute für lokale Bereiche bestimmt. Aufgrund von vorgegebenen oder automatisch ermittelten Schwellwerten wird festgelegt, ob es sich um ein markantes Merkmal handelt oder nicht. Voraussetzungen an die Merkmale für eine effiziente Zuordnung sind Deutlichkeit, Invarianz gegenüber geometrischen sowie radiometrischen Verzerrungen, Stabilität, Seltenheit und Interpretierbarkeit (FÖRSTNER 1991). Punkten ist die geometrische Invarianz eigen. Die Interpretierbarkeit ist dagegen gering. Da die Interpretierbarkeit im Rahmen der digitalen Bildzuordnung in der Regel nur eine untergeordnete Rolle spielt, eignen sich Punkte besonders gut für die Aufgaben innerhalb der digitalen Bildzuordnung. Kanten und Flächen werden vor allem zur Objekterkennung verwendet. Zur Merkmalsextraktion können Interest- oder Kanten-Operatoren eingesetzt werden. Einige wichtige Interest-Operatoren zur automatischen Extraktion markanter Punkte sind der Moravec- (MORAVEC 1977), der Dreschler- (DRESCHLER 1981) und der Förstner-Operator (FÖRSTNER 1986, 1991). Bei diesen Operatoren werden die Grauwertunterschiede in möglichst vielen Richtungen rund um den markanten Punkt untersucht. Weiterführende Beschreibungen sind der Literatur zu entnehmen (HEIPKE 1995, LUHMANN 2000).

In der auf die Merkmalsextraktion folgenden Zuordnung werden die korrespondierenden Merkmale in den Bildern ermittelt. Im einfachsten Fall wird für jedes Merkmal eines Bilds untersucht, wie gut es mit jedem Merkmal der anderen Bilder übereinstimmt. Aufbauend auf den Attributen der Merkmale wird ein Ähnlichkeitsmaß definiert. Vorhandene Informationen über die Bilder und die abgebildete Objektraumscene können zusätzlich verwendet werden um den Suchraum einzuzugrenzen, Fehlzuordnungen zu minimieren und den Rechenaufwand zu reduzieren. Das Ergebnis der Zuordnung ist eine unstrukturierte Liste möglicher homologer Punkte mit der Angabe eines aus dem Ähnlichkeitsmaß abgeleiteten Qualitätswerts für jede Zuordnung. Die tatsächlichen homologen Punkte werden aufgrund von Kompatibilität, Eindeutigkeit und Kontinuität bestimmt (HEIPKE 1995).

Im Gegensatz zur Kleinste-Quadrate-Zuordnung sind keine sehr genauen Näherungswerte für die Lage der homologen Punkte erforderlich, da die Verteilung der Punkte untersucht wird. Die Genauigkeit der Merkmalszuordnung ist im Vergleich zur Kleinste-Quadrate-Zuordnung oft geringer. In Gebieten mit ausgeprägter Textur können die für die Kleinste-Quadrate-Zuordnung benötigten Näherungswerte durch die Merkmalszuordnung zur Verfügung gestellt werden. Einen ausführlichen Vergleich der beiden Methoden gibt GÜLCH (1994).

## 2.2 Statistische Grundlagen

In dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von Wasseroberflächen wird zur Bildzuordnung die Kreuzkorrelation eingesetzt. Der Korrelationskoeffizient gibt die Lageübereinstimmung zwischen Muster- und Suchmatrix wieder und ist somit ein Ähnlichkeitsmaß. Aus diesem Grund werden zur Beurteilung der Ergebnisse Vergleichsmessungen herangezogen. Im Folgenden werden die in Kapitel 6 zur Analyse verwendeten statistischen Grundlagen, wie z.B. die Berechnung von Schiefe und Exzess sowie die Zeitreihenanalyse erläutert.

### 2.2.1 Berechnung von Schiefe und Exzess und deren Signifikanz

Eine anschauliche Methode zur Prüfung auf Normalverteilung ist die Verwendung einer Häufigkeitsverteilung. Bei eingipfligen Häufigkeitsverteilungen werden zwei Typen möglicher Abweichungen von der Normalverteilung unterschieden, die Schiefe  $g_1$  und der Exzess  $g_2$  (HARTUNG et al. 2002). Schiefe und Exzess entstehen z.B. durch eine Mischung von zwei oder mehreren Normalverteilungen. Größere Abweichungen von der Normalverteilung lassen systematische Fehler oder störende Einflüsse vermuten (BÖHM 1965, GROBMANN 1969).

Die Schiefe gibt an, ob das absolute Maximum der Häufigkeitsverteilung links oder rechts vom Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung liegt. Ist  $n$  die Anzahl der Beobachtungen  $x_i$  und  $\bar{x}$  der zugehörige arithmetische Mittelwert, wird die Schiefe der Häufigkeitsverteilung definiert durch:

$$g_1 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{\left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^3}} \quad (2.10)$$

Für eine symmetrische Häufigkeitsverteilung gilt  $g_1 = 0$ . Je stärker negativ  $g_1$  ist, desto linksschiefer ist die Verteilung und umso rechtsschiefer, je stärker positiv der Wert  $g_1$  ist.

Bei standardisierten Verteilungen gibt der Exzess  $g_2$  an, ob das absolute Maximum der Häufigkeitsverteilung größer oder kleiner als das absolute Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung ist. Die Berechnung erfolgt nach Formel (2.11).

$$g_2 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} - 3 \quad (2.11)$$

Ist  $g_2$  positiv liegt ein positiver Exzess, d.h. Hochgipfligkeit, vor. Bei einem negativen Exzess ist die Häufigkeitsverteilung im Vergleich zur Normalverteilung abgeflacht (Flachgipfligkeit).

Bei einer Normalverteilung haben Schiefe und Exzess den Wert Null. Sind Schiefe und Exzess von Null verschieden, ist das ein Hinweis darauf, dass die zugrunde liegende Verteilung der Beobachtungen von der Normalverteilung abweicht, d.h. nicht alle systematischen Fehler berücksichtigt wurden, die zufälligen Fehler nicht geeignet modelliert wurden oder keine Normalverteilung vorliegt.

Eine Schiefe bzw. eine asymmetrische Verteilungskurve ergibt sich meistens durch eine Mischung mehrerer Beobachtungsgruppen mit unterschiedlichen systematischen Fehlern. Bei graphischer Darstellung fallen die Symmetrieachsen der verschiedenen Beobachtungsgruppen nicht aufeinander, sondern sind je nach Größe des gruppeneigenen systematischen Fehlers seitlich verschoben. Beim Vorliegen eines Exzesses durchdringen einander zwei oder mehrere Beobachtungsgruppen aus normalverteilten Grundgesamtheiten mit gleichem Mittelwert, aber verschiedenen Standardabweichungen. Dadurch entsteht eine symmetrische, zu schlanke (positiver Exzess) oder zu flache Kurve (negativer Exzess).

mit gleich bleibender Fläche unter der Kurve. Bei einer sehr schlanken Kurve sind die kleinen Fehler häufiger als es der Normalverteilung entspricht. Bei einer zu flachen Kurve treten dagegen die Fehler mittlerer Größe häufiger auf.

Zum Test auf Signifikanz werden folgende Nullhypothesen aufgestellt:

$$\begin{aligned} H_0: g_1 \sqrt{\frac{n}{6}} &\sim \text{asympt. } N(0,1) \\ H_0: g_2 \sqrt{\frac{n}{24}} &\sim \text{asympt. } N(0,1) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Diese asymptotische Betrachtungsweise setzt voraus, dass genügend viele Beobachtungen vorliegen. Unter Berücksichtigung einer zweiseitigen Fragestellung und einem Quantil  $Y_{1-\frac{\alpha}{2}}$  gilt eine Kenngröße  $g_1$  oder  $g_2$  als signifikant von Null verschieden, wenn die jeweilige Testregel erfüllt ist:

$$\begin{aligned} |g_1| \cdot \sqrt{\frac{n}{6}} &> Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \\ |g_2| \cdot \sqrt{\frac{n}{24}} &> Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

### 2.2.2 Zeitreihenanalyse

Zur Analyse einer oder mehrerer über einen längeren Zeitraum beobachteter Messgrößen wird zur Beschreibung der zeitabhängigen Messwerte die Zeitreihenanalyse eingesetzt. Eine Zeitreihe ist eine zeitlich geordnete Folge von Realisierungen einer Messung über einen längeren Zeitraum. Die Messgröße wird dabei als zeitlich veränderlich betrachtet. Es handelt sich somit um einen kontinuierlichen zeitabhängigen Prozess  $\xi(t)$ . Die Zeitreihe  $x(t)$  ist die Realisierung des Prozesses  $\xi(t)$  zu diskreten Zeitpunkten. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Messungen ist die Abtastrate  $\Delta t$ , die in der Regel konstant ist. Der Betrag der Abtastrate ist im Wesentlichen von der zu erwartenden Änderungsgeschwindigkeit des Prozesses  $\xi(t)$  abhängig. Bei dem im Folgenden betrachteten Prozess  $\xi(t)$  wird von einem so genannten stationären Prozess, der nicht vollständig vorhersagbar ist, ausgegangen. Des Weiteren wird unterstellt, dass die Zeitfunktion  $\xi(t)$  keine deterministischen Anteile oder langfristige Trends enthält. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, muss die Zeitfunktion zunächst von diesen Anteilen befreit werden. Hierbei handelt es sich um ein Regressionsproblem.

Ohne auf die Theorie der Zeitreihenanalyse detaillierter einzugehen (siehe TAUBENHEIM 1969, PELZER 1980, NIEMEIER 1980, WELSCH et al. 2000), werden im Folgenden die Begriffe Autokovarianz- und Autokorrelationsfunktion eingeführt.

#### 2.2.2.1 Autokovarianz- und Autokorrelationsfunktion

Liegt ein kontinuierlicher zeitabhängiger Prozess vor, der an diskreten Stellen abgetastet wird, sind die Ergebnisse zweier Messungen zu dicht benachbarten Zeitpunkten in der Regel nicht voneinander unabhängig. Somit liefert ein neuer Messwert keine individuelle, unabhängige Information. Diese Eigenschaft einer Zeitreihe wird als Erhaltensneigung bezeichnet.

Als Verallgemeinerung der empirischen Standardabweichung und zur Beschreibung der Erhaltensneigung eines Prozesses kann die diskrete Autokovarianzfunktion  $C(k)$  verwendet werden. Eine Voraussetzung zur Berechnung der Autokovarianzfunktion ist das Vorliegen von  $n \geq 100$  Beobachtungen. Da für große Messwerteabstände die Berechnung von  $C(k)$  zunehmend unsicherer wird, wird die Autokovarianzfunktion nur für Null und ganzzahlige Werte bis maximal  $m \leq n/10$  berechnet.

Liegen die Beobachtungen in Form einer Zeitreihe  $x(t)$  mit  $n$  Messwerten  $x_1, x_2 \dots x_n$  mit einer konstanten Abtastrate  $\Delta t$  vor, so ergibt sich die diskrete Autokovarianzfunktion  $C(k)$  zu:

$$C(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (2.14)$$

mit

$x_i$  : Messwert zum Zeitpunkt  $t_i$  mit  $i = 1, \dots, n$

$n$  : Anzahl der Messwerte

$m$  : Korrelationslänge

und  $k = 0, 1, \dots, m$ , wobei  $m \leq \frac{n}{10}$

Der Wert  $C(0)$  entspricht der Varianz der Messreihe. Die Werte für  $k > 0$  geben die Kovarianz zwischen den Werten im Abstand  $k$  an. Große Werte  $C(k)$  für kleine Abstände  $k$  deuten auf eine hohe physikalische Korrelation von Nachbarwerten und damit auf eine starke Erhaltensneigung des Prozesses hin.

An Stelle der Autokovarianzfunktion kann die Autokorrelationsfunktion  $R(k)$  eingeführt werden, die sich aus  $C(k)$  durch Normierung mit  $C(0)$  ergibt:

$$R(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (2.15)$$

Sinken die Werte der Autokorrelationsfunktion sehr schnell gegen Null, so sind die Messwerte untereinander nur gering korreliert.

### 2.2.2.2 Energiespektrum

Die Beschreibung der Zeitfunktion in Kapitel 2.2.2.1 beschränkt sich auf die Betrachtung im Zeitbereich mit Hilfe der Autokovarianzfunktion. Die Eigenschaften einer Zeitfunktion im Frequenzbereich können aber oftmals von großem Interesse sein. Durch Auftragen der in den Frequenzbereich transformierten Zeitreihe über der Frequenzachse werden Eigenschaften der Messgrößen deutlich, die bei der ausschließlichen Betrachtung im Zeitbereich möglicherweise verborgen bleiben. Die spektrale Betrachtungsweise erlaubt es durch die hervortretenden Frequenzen vorhandene Periodizitäten im Datenmaterial aufzudecken. Die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich erfolgt mittels FOURIER-Transformation unter Verwendung des WIENER-CHINTSCHIN-Theorems (TAUBENHEIM 1969). Es entsteht das so genannte Energiespektrum.

Bei der empirischen Berechnung des Energiespektrums ist zu beachten, dass die Autokovarianzfunktion  $C(k)$  nur an diskreten Stellen bis zur Stelle  $m$  vorliegt. Zusätzlich können wegen der endlichen Abtastfrequenz  $f_A = 1/\Delta t$  hochfrequente Anteile des Prozesses nicht erfasst werden. Dies führt zu Verfälschungen des Energiespektrums im niederfrequenten Bereich. Die obere Frequenzgrenze des Energiespektrums ist gegeben durch die NYQUIST-Frequenz  $f_N$ :

$$f_N = \frac{f_A}{2} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (2.16)$$

Der Frequenzbereich 0 bis  $f_N$  wird in  $m+1$  Einzelfrequenzen  $f_k$  unterteilt:

$$f_k = \frac{k}{m} \cdot f_N \quad (2.17)$$

Das Energiespektrum  $P(f_k)$  wird berechnet mit:

$$P(f_k) = 4 \cdot \Delta t \left( \frac{1}{2} [C(0) + (-1)^k C(m)] + \sum_{i=1}^{m-1} C(i) \cos \left( \pi \cdot k \cdot \frac{i}{m} \right) \right) \quad (2.18)$$

mit

$$k = 0, 1, \dots, m$$

Die mittlere Amplitude  $A(f_k)$  einer Schwingung mit der Frequenz  $f_k$  errechnet sich aus:

$$A(f_k) = \sqrt{\frac{P(f_k)}{m \cdot \Delta t}} \quad (2.19)$$

### 2.3 Bestimmung von Wasseroberflächen

Für die Bestimmung von Wasseroberflächen stehen eine Vielzahl von Messgeräten und -methoden zur Verfügung (AVMK 1984, HORIKAWA 1988). Der Seegang kann z.B. mittels Wellenmessdraht oder Geschwindigkeits-Druck-Sonde ermittelt werden. Diese Messsysteme werden in den Wassermassen der Brandungszone installiert und messen den Seegang an diskreten Punkten.

Der Wellenmessdraht wird üblicherweise senkrecht zur Wasseroberfläche an einem Geräteträger montiert. Das Messprinzip beruht auf einer Widerstandsmessung zwischen zwei in Wasser eingetauchten Metalldrähten (DIETRICH et al. 1975). Die Größe des Widerstands ist somit vom Wasserstand abhängig. Beim Einsatz einer Geschwindigkeits-Druck-Sonde wird im Gegensatz zum Wellenmessdraht nicht die Bewegung der Wasseroberfläche, sondern die durch die Veränderung der Wasseroberfläche hervorgerufene Druckänderung gemessen. Der vorherrschende Druck wird aufgrund der Durchbiegung einer Membran bestimmt (AVMK 1984). In der Praxis werden Geschwindigkeits-Druck-Sonden häufig an Geräteträgern in der Nähe des Meeresbodens oder direkt am Meeresboden eingebaut. Wegen der mit zunehmender Einbautiefe zunehmenden Dämpfung der durch die Oberflächenwellen verursachten Druckschwankungen im Wasser ist der Einsatz von Geschwindigkeits-Druck-Sonden nur in geringen Wassertiefen bis ca. 4 m unter der Oberfläche sinnvoll. Geschwindigkeits-Druck-Sonden in einer Wassertiefe ab 0.5 m können bereits Wellen mit Perioden von unter 4 s nicht mehr einwandfrei identifizieren. Aufgrund ihrer Installation in der Brandungszone messen der Wellenmessdraht und die Geschwindigkeits-Druck-Sonde auch die von ihnen durch die Interaktion mit dem Wasser erzeugte Strömung.

Im Folgenden wird ein Überblick über die photogrammetrischen Anwendungen zur Bestimmung von Wasseroberflächen gegeben. Es werden Verfahren vorgestellt, die die Wasseroberfläche sowohl an diskreten Punkten, in Profilen als auch flächenhaft bestimmen. Die erreichbare Genauigkeit der einzelnen Verfahren wird, wenn vorhanden, angeführt. Die Fernerkundungsverfahren und Verfahren unter Laborbedingungen werden zur Vollständigkeit der Übersicht über die Anwendungen beschrieben.

#### 2.3.1 Verfahren im Nahbereich

Die Stereophotogrammetrie wurde 1904 als erstes Messverfahren für die räumliche Bestimmung einzelner Meeresswellenformationen eingesetzt (KOHLSCHÜTTER 1906). Für die Aufnahme der Meeresswellen im Stereonormalfall wurden zwei für den Einsatz an Bord eines Schiffes veränderte Stand-Phototheodolite verwendet (PULFRICH 1908). Die Auswertung erfolgte am Stereokomparator. Ergebnis waren Schichtlinien und Vertikalschnitte der Meeresoberfläche in verschiedenen Richtungen. Aufgrund der Verwendung von Bildplatten war die Bestimmung zeitabhängiger Wellenparameter nicht möglich. Weitere Expeditionen (LAAS 1906, SCHUHMACHER 1926, WEINBLUM & BLOCK 1936) einhergehend mit technischer Weiterentwicklung der Aufnahme- und Auswertverfahren folgten. Parallel dazu fanden 1918 erste Anwendungen auf dem Gebiet des Wasserbaus (BLOCK 1936), z.B. zur Messung von Wellen an Schiffs-, Brückenpfeiler- oder Schleusenmodellen, statt.

Spezielle Kameraentwicklungen auf Basis einer Reihemesskammer ermöglichten ab 1939 die räumliche und zeitliche Analyse der Wellenbewegungen (SCHUHMACHER 1950). Aufnahmen konnten mit einem Abstand von 1 s und einer maximalen Dauer bei ununterbrochener Messung von 30 s durchgeführt werden. Das Kamerasystem wurde 1941 zur Aufnahme der Wasseroberfläche von der Küste aus eingesetzt (LACMANN 1950). Die Höhe der Kamerastandpunkte betrug 55 m über dem Meer. Aufgrund günstiger Beleuchtungsverhältnisse waren bei diesen Aufnahmen Wellen bis zu einer Entfernung von fast 2 km messbar.

MARESCA & SEIBEL (1976) beschreiben die Durchführbarkeit der Überwachung des Wellenbrechens, der Wellenhöhe und der Strömungen mittels einzelner terrestrischer Stereoaufnahmen. Zur eindeutigen Bestimmung und Verfolgung von Punkten auf der Wasseroberfläche werden Bojen und fluoreszierende Farbstoffe eingesetzt. MITCHELL (1983) ersetzt fehlende Passpunkte zur Auswertung von Stereoaufnahmen mit bekannten Kamerastandpunkten durch die Verwendung des scheinbaren Horizonts zur Orientierung der Kameras. Zwölf Punkte in der Gischt der Wasseroberfläche werden manuell in den Bildern gemessen. Aus dem Ergebnis der Ausgleichung kann ein Wellenprofil abgeleitet werden.

Die Bestimmung von Wasseroberflächen mittels manueller Auswertung, insbesondere von Bildsequenzen, ist äußerst komplex und zeitintensiv. Forschungen und Entwicklungen in Bezug auf automatische Bildzuordnung und Interpretation von digitalen Bildern können diese Einschränkungen überwinden. LIPPMANN & HOLMAN (1992), REDONDO et al. (1994) und MÖSSO et al. (1998) setzen eine videobasierte Methode mit einer Kamera zur qualitativen Ermittlung langperiodischer Zeitreihen im Zusammenhang mit dem in der Brandungszone auftretenden Wellenbrechen ein. Aufgrund der Übereinstimmung der zeitlichen Höhenänderung der Wasseroberfläche und der Veränderung der Helligkeit der Welle, wird zwischen brechenden und nicht brechenden Wellen unterschieden. Das Verfahren stützt sich auf die Verschiedenheit der Grauwerte von turbulenter Gischt und umgebendem dunklen, ruhigen Wasser unter der Annahme konstanter Beleuchtungsverhältnisse während der Datenaufnahme.

Um einen Querschnitt der Wasseroberfläche der auf- und ablaufenden Brandung zu erhalten, platzieren FOOTE & HORN (1999) eine wasserdichte Videokamera innerhalb einer Brandungszone. Zur Datenerfassung wurde parallel zur Wellenlaufrichtung eine Platte mit Passpunkten in den Strandbereich eingebracht. Verlaufen die Wellen nicht parallel zur Platte, werden falsche Wasserhöhen erfasst. Die Kamera wurde rechtwinklig zur Platte mit Blickrichtung auf diese aufgestellt. Zur Weiterverarbeitung wurden die Bilder der Videosequenz entzerrt, die Bereiche Wasser und Platte klassifiziert und die Wasserhöhe abgeleitet. Die schlechtesten Klassifizierungsergebnisse liegen infolge von Reflexionen im Bereich großer Wassertiefen. Alternativ können die Profile der Brandung manuell bestimmt werden. Das Verfahren wurde auch zu Untersuchungen im Wellenkanal eingesetzt. Unter Laborbedingungen wurde das Wasser aufgrund der Lichtdurchlässigkeit zusätzlich mit einer künstlichen Lösung versetzt.

STRAUB & WIGGENHAGEN (2004) stellen ein System zur automatischen Ablesung der Wellenhöhe an einer Messlatte vor, um den Verlauf des Wellengangs während der Durchfahrt eines Schiffs auf einer Schifffahrtsstraße mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu bestimmen. Zur Ermittlung der Wellenhöhe werden ins Wasser eingebrachte Messlatten während der Schiffsdurchfahrt mit einer Videokamera aufgenommen. Die automatische Auswertung der Aufnahmen erfolgt nach einer manuellen Initialisierung im ersten Bild der Sequenz in drei Phasen. In einem ersten Schritt wird mittels Mustervergleich die Position des Wasserstands an der Messlatte grob bestimmt. Durch das Ergebnis der Grobmessung wird der Suchbereich für die folgende Feinablesung eingeschränkt. Die endgültige Bestimmung der Wellenhöhe erfolgt durch Interpolation in einem Dreieck, das von zwei Teilungspositionen auf der Messlatte und dem Ergebnis der Feinmessung aufgespannt wird.

Ein Verfahren zur Bewertung der räumlichen und zeitlichen Veränderung der Strandoberfläche an der Grenzlinie zwischen Wasser und Sand stellen HOLLAND & HOLMAN (1997) vor. Zur Datenerfassung wurden drei auf temporären Türmen befestigte Videokameras eingesetzt. Das Untersuchungsgebiet hat eine Größe von 10 x 10 m<sup>2</sup>. Die Höhe der Türme betrug ca. 10 m relativ zur Strandoberfläche und der Abstand zur Mitte des Untersuchungsgebiets ungefähr 20 m. Als Passpunkte wurden an Stangen befestigte Plastikbälle mit einem Durchmesser von 10 cm verwendet. Die Auswertung erfolgt separat für jeden Zeitpunkt. Die deutlich ausgeprägte Grenzlinie zwischen Wasser und Sand wird in den Bildern extrahiert und die Konturpunkte werden unter Verwendung der Epipolarometrie einander zugeordnet.

Die digitale Bildzuordnung wurde auch erfolgreich zur Ableitung von Seegangsparemtern aus Stereobildern eingesetzt. REDWEIK (1993) beschreibt die Aufnahme von Tiefwasserwellen von einer Forschungsplattform mit zwei synchron ausgelösten Universalmesskammern UMK 10/1318. Die optischen Achsen der Kameras wurden mit Hilfe eingebauter Orientierungsvorrichtungen parallel zueinander und senkrecht zur Basis ausgerichtet. Die Aufnahmen erfolgten im Stereonormalfall. Zur Bestimmung des Oberflächenmodells und der anschließenden Berechnung von Seegangsspektren wurde die Kreuzkorrelation zur Näherungswertbeschaffung und die Kleinste-Quadrate-Zuordnung zur Feinzuordnung eingesetzt. Für die Bildzuordnung wurde das auszuwertende Gebiet in Bereiche unterschiedlicher Entfernungen eingeteilt, zwischen denen sich der Bildmaßstab jeweils um einen konstanten Betrag ändert. Die Mustermatrix wurde groß genug gewählt um ausreichend Textur zu enthalten und klein genug um die Objektoberfläche hinreichend genau zu repräsentieren. Aus diesem Grund wurden zur Bildzuordnung zusätzlich vom Bildmaßstab abhängige, variable, unsymmetrische Matrizendimensionen verwendet. Wegen der senkrecht zur Wellenlaufrichtung gerichteten Aufnahmebasis liegt in den Bildern zum Teil eine in  $x$ - und  $y$ -Richtung unterschiedliche Textur vor, die hauptsächlich durch die linienhaften Wellenkämme gebildet wird. Zwischen den Wellenkämmen liegende Flächen weisen eine homogene Grauwertverteilung auf. Diese wirkt sich nachteilig auf die digitale Bildzuordnung aus. Fehlzunordnungen können nur schwer erkannt werden, da der Korrelationskoeffizient in Gebieten mit homogener Grauwertverteilung mehrere Maxima aufweisen kann.

### 2.3.2 Fernerkundungsverfahren

Die luftgestützte Bestimmung von Wasseroberflächen erfolgt in der Regel per Flugzeug oder von Satelliten aus. Ferner setzten SASAKI et al. (1976) Hubschrauber und Ballons als Sensorplattformen ein.

TAGUCHI & TSURU (1998) verwenden eine einzelne flugzeuggetragene Videokamera zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit eines Flusses. Die Geschwindigkeitsvektoren zwischen zwei Zeitpunkten werden mittels digitaler Bildzuordnung bestimmt. Zur Zuordnung werden natürliche Punkte, wie im Wasser treibende Materie und/oder Luftblasen verwendet. CRUSET (1953) sowie MARKS & RONNE (1955) setzen zwei Flugzeuge zur Aufnahme der Meeresoberfläche ein. In VOSS (1991) wird die stereophotogrammetrische Befliegung des Hamburger Hafens zur Untersuchung der durch Sturmfluten veränderten Wellensituation beschrieben. Zur Bildaufnahme wurden zwei Reihenmesskammern verwendet. Die im Elbeeinzugsbereich auftretenden Wellenformationen konnten bei einem Bildmaßstab zwischen 1 : 4 000 bis 1 : 8 000 mit einer Genauigkeit der Wellenhöhen und der Wasserspiegelneigungen von  $\pm 10$  cm manuell bestimmt werden. Das Ergebnis waren dreidimensionale Höhenlinienkarten der Wellengeometrie. YAMAZAKI et al. (1998) setzen das Verfahren zur Bestimmung von Flussoberflächen bei Hochwasser ein.

Im Gegensatz zu photographischen Systemen ist der Einsatz von Radarsensoren unabhängig von den naturgebundenen Strahlungsverhältnissen und unabhängig von der jeweiligen Wetterlage. Seen, Flüsse, Kanäle und Wasserflächen gehören zu den im Radarbild am besten und sichersten identifizierbaren Objekten. Die Analyse von Radarbildern der Meeresoberfläche erlaubt die Bestimmung von Wellendynamik und Strömungen sowie örtlich auftretenden Verwirbelungen und Glättungen. Aus den Bilddaten satellitengetragener Radarsensoren (*synthetic aperture radar*, SAR) können z.B. wichtige Eingangsparameter für die Modelle der Meere, vor allem im Küstenbereich abgeleitet oder Extremwellen des Seegangs gemessen werden (LEHNER et al. 2002).

Das radargestützte Seegangsmessverfahren WaMoS II (*Wave Monitoring System*) wird z.B. zur Messung von Wellenhöhen, -perioden und -richtungen eingesetzt. Es kann auf Ölplattformen, Schiffen und an der Küste installiert werden. Als Sensor dient ein nautisches Radar, welches standardmäßig zur Navigation verwendet wird (REICHERT et al. 1999). Durch eine Analyse dieses Signals kann großräumig auf die flächenhafte Verteilung von statistischen Seegangsparemtern geschlossen werden.

Die Weltraumplattform SEASAT wurde hauptsächlich als ozeanographischer Forschungssatellit konzipiert (KRAUS & SCHNEIDER 1988, SEEBER 1993). Ihr Aufgabengebiet war die Erfassung ozeanographischer Oberflächendaten. SEASAT trug fünf Sensoren, darunter ein synthetisches Apertur Radar und ein Altimeter. Mit einem Altimeter wird vom Satelliten aus mit Hilfe eines Radars der vertikale Abstand zur Erdoberfläche gemessen. Trotz einer kurzen Aktionszeit von

ca. drei Monaten wurden zahlreiche Untersuchungen über Oberflächentemperaturen, Eisdriften, Wellendynamik und -spektren sowie Interaktionen zwischen Wasser- und Landflächen durchgeführt.

Satellitenbasierte Systeme haben den Nachteil, dass jeder Orbit erst nach einer bestimmten Anzahl an Tagen auf der gleichen Spur und mit gleichem zeitlichen Ablauf wiederholt wird. Der Satellit erscheint also nur periodisch immer zur gleichen Zeit über einem bestimmten Ort der Erde. Zusätzlich liegen die Daten aufgrund der großen Aufnahmeentfernung in geringer Auflösung vor. Daher wird auf diese Verfahren nicht näher eingegangen. Weitere Informationen sind der Literatur zu entnehmen, z.B. ALBERTZ (2001).

### 2.3.3 Verfahren unter Laborbedingungen

Einen Überblick über verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Wasseroberflächen unter Laborbedingungen geben LUHMANN & TECKLENBURG (2000) und ELSHOFF et al. (2001). Einige der Methoden sind ausschließlich auf die Verwendung unter Laborbedingungen beschränkt, z.B. die optische Triangulation mit Hilfe einer Laserlichtschicht (MAAS et al. 2003, MULSOW et al. 2005) oder das Refraktionsverfahren *Colour Image Slope Gauge* (DIETER et al. 1997). Die Voraussetzungen an das Versuchsumfeld bei Labormessungen sind deutlich von dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungsgebiet zu unterscheiden. Die Dimensionen des Messbereichs, die optischen Umgebungsbedingungen, die räumliche Auflösung und die geforderten Genauigkeiten weichen stark voneinander ab. Aus diesem Grund wird auf die Ermittlung von Wasseroberflächen unter Laborbedingungen nicht näher eingegangen.

## 2.4 Bewertung

Die Stärken der Photogrammetrie kommen bei der Anwendung zur Bestimmung von Wasseroberflächen in besonderem Maße zum Tragen. Die Photogrammetrie ist das einzige Verfahren, das durch die flächenhafte Aufnahme eines Wellenfelds eine dreidimensionale und zeitlich dynamische Darstellung der Wasseroberfläche mit hoher Detailgenauigkeit ermöglicht. Einzelne Gebietsbereiche können auch nachträglich detaillierter analysiert werden. Dafür müssen die zu untersuchenden Positionen nicht, wie z.B. beim Einsatz von konventionellen Messverfahren, vorab genau festgelegt werden. Ferner ist das Verfahren nicht auf eine bestimmte Gebietsgröße beschränkt. Sowohl die mit einer Kamera aufzunehmende Gebietsgröße als auch die erreichbare Genauigkeit sind von den Kameraeigenschaften und der Aufnahmeconfiguration abhängig. Durch die Verwendung mehrerer Kameras kann die Gebietsgröße beliebig erweitert und die Genauigkeit gesteigert werden.

Voraussetzung für eine erfolgreiche photogrammetrische Wellenmessung sind erhöhte Aufnahmestandpunkte zwischen denen eine ausreichende Basislänge bezogen auf die maximale Aufnahmeentfernung vorhanden ist. Während der Datenerfassung sollten günstige Wetter- und Beleuchtungsverhältnisse vorherrschen, so dass z.B. keine Reflexionen an der Wasseroberfläche auftreten und ausreichend Textur auf der Oberfläche vorhanden ist.

Die Bestimmung von Oberflächenveränderungen ist nur durch die Aufnahme und Auswertung von Bildsequenzen möglich. Der von REDWEIK (1993) vorgestellte Algorithmus zur Ableitung von Seegangparametern ist z.B. auf die Bildzuordnung einzelner Stereobildpaare beschränkt. Ein zeitlicher Zusammenhang zwischen den ermittelten Wasseroberflächen wird nicht hergestellt. Auch die Verfolgung einzelner diskreter Punkte über die Zeit, wie z.B. von Bojen ist, zum einen durch die Interaktion der Bojen mit der Wasseroberfläche und zum anderen aufgrund der Forderung nach einer flächendeckenden Bestimmung, nicht umsetzbar.

Um den zu erwartenden großen Datenbeständen gerecht zu werden, muss eine automatisierte Auswertung der Daten gegeben sein. Hier finden die Verfahren der digitalen Bildzuordnung Anwendung.

Die beschriebenen Zuordnungsverfahren basieren auf geometrischen Beziehungen zwischen Bildern bzw. zwischen Bildern und Objekten. Zu den grauwertbasierten Zuordnungsverfahren gehören unter anderem der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient und der Kleinste-Quadrate-Ansatz. Die Kreuzkorrelation ist robust gegenüber Ausreißern und Kontraständerungen, jedoch ohne unmittelbare Genauigkeitsangabe. Das Verfahren der Kleinste-Quadrate-Zuordnung ermöglicht hingegen die statistische Angabe von Genauigkeiten in Form von Standardabweichungen für die zu

schätzenden Unbekannten. Es liegen somit interne Qualitätskriterien vor, die für statistische Ausreißertests, Ergebnisanalysen und zur Weiterverarbeitung genutzt werden können.

Die Bildzuordnung und die Oberflächenrekonstruktion können zu einem geschlossenen Auswerteprozess zusammengefasst werden. Das einfachste diesbezügliche Verfahren ist der Vertical Line Locus. Bei der Kleinste-Quadrate-Zuordnung können durch die Erweiterung des funktionalen Modells Zusatzinformationen oder Randbedingungen, z.B. in Form von geometrischen Bedingungen zwischen den Bildern oder am Objekt, berücksichtigt werden. In der Literatur kann ein Trend zur simultanen Verarbeitung von möglichst vielen Bildern beobachtet werden, siehe z.B. PAPANODITIS et al. (2000), POLLEFEYS et al. (2000). Die durch mehrere Bilder erzeugte Redundanz ermöglicht die Lösung von Problemen bei der Bildzuordnung, die andernfalls nicht eindeutig hätten bestimmt werden können oder zu einer falschen Oberflächenbeschreibung geführt hätten.

Die Anwendung des VLL ist im engeren Sinne auf den Luftbildfall beschränkt. Allerdings könnte durch eine Variation des Verfahrens dieses problemlos für die Bestimmung von Wasseroberflächen von erhöhten Standpunkten aus eingesetzt werden, die Orientierungsparameter als bekannt vorausgesetzt. In dieser Arbeit wird eine Variation des VLL zur Zuordnung einzelner diskreter Punkte genutzt. Die Oberflächenrekonstruktion muss durch eine flächenhafte Ausbreitung des Verfahrens erfolgen. Zur Auswertung der Wasseroberflächen in der Zeit muss die Objektoberfläche des vorherigen Zeitpunkts herangezogen werden, da eine Verfolgung einzelner diskreter Punkte auf der Wasseroberfläche nicht möglich ist.

Die Bildzuordnung mittels Kreuzkorrelation wird für die Anwendung des Verfahrens als ausreichend angenommen. Probleme bei der Bildzuordnung sind allerdings in den Bereichen texturarmer bzw. texturloser Oberflächen zu erwarten. Die Zuordnung homologer Punkte könnte z.B. durch die Musterprojektion oder das Aufbringen von Tracern erleichtert werden. Beide Verfahren sind jedoch zur Ermittlung von Wasseroberflächen nicht realisierbar. So erfordert die Musterprojektion eine diffus reflektierende Oberfläche. Die Markierung der Wasseroberfläche mit permanent im Wasser verbleibenden Schwebstoffen oder schwimmenden Materialien beeinflusst die Strömungsmechanik der Wasseroberfläche und ist daher für diese Anwendung nicht zulässig.

### 3 Entwickelte Methode

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur dreidimensionalen Bestimmung der sich bewegenden Wasseroberfläche unter Verwendung photogrammetrischer Stereobildsequenzen mit Hilfe der digitalen Bildzuordnung im Objektraum präsentiert. Zur Bestimmung homologer Punkte wird der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient in Kombination mit einer Variation des Vertical Line Locus und Verwendung einer Bildpyramide mit einer zusätzlichen Auflösungsstufe genutzt. Das Verfahren wurde in das bestehende Softwaresystem LISA implementiert (LINDER 2003, LINDER 2004).

#### 3.1 Strategie

Für das im Folgenden beschriebene Verfahren müssen neben den Bildsequenzen als zusätzliche Eingangsinformationen die innere und äußere Orientierung der Bilddaten als auch homologe Startpunkte zur Auswertung des ersten Stereomodells einer Sequenz vorliegen (SANTEL et al. 2002). Die Startpunkte können durch manuelle Messung oder durch eine vorab durchgeführte Merkmalszuordnung gewonnen werden und müssen als Bildkoordinaten vorliegen. Für den weiteren Ablauf des Verfahrens ist es ausreichend, wenn die Startpunkte näherungsweise bekannt sind. Sowohl die innere als auch die äußere Orientierung der Bilddaten wird für die Dauer der Aufnahme einer Bildsequenz als konstant angenommen. Das Konzept des Verfahrens ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

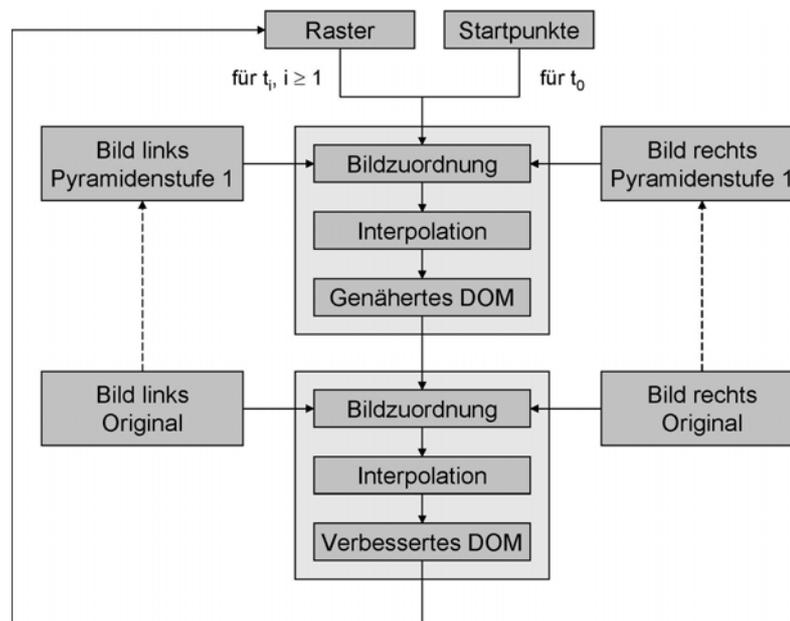


Abbildung 3-1: Konzept des Verfahrens zur Bestimmung von Wasseroberflächen

Aus den digitalen Bilddaten werden in einem Vorverarbeitungsschritt mit Hilfe eines einfachen Tiefpassfilters Bildpyramiden mit einer zusätzlichen reduzierten Auflösungsstufe generiert. Das Verfahren ist in zwei Prozeduren zur Auswertung eines Zeitpunkts einer Sequenz unterteilt. Die Berechnung der ersten Prozedur basiert auf der zusätzlichen Auflösungsstufe der Bildpyramiden, die zweite auf den Originalbilddaten. Das Ergebnis der ersten Prozedur ist ein genähertes digitales Oberflächenmodell (DOM). Dies wird als Eingangsdatensatz zur Erzeugung des verbesserten DOMs in der zweiten Prozedur genutzt.

Die Ermittlung der Form der Wasseroberfläche erfolgt für jede Prozedur in der Weise, dass im rechten und im linken Bild des Stereopaars ein homologer Punkt aufgesucht und der zugehörige Strahlengang zum Zeitpunkt der Aufnahme rekonstruiert wird. Zur Bestimmung der homologen Punkte wird der Kreuzkorrelationskoeffizient (siehe Kapitel 2.1.3) eingesetzt. Die Zuordnung wird mittels einer Kombination von punktwiser Zuordnung (siehe Kapitel 3.2) mit einer flächenhaften Ausbreitung (siehe Kapitel 3.3) durchgeführt. Der Suchbereich für die Bildzuordnung wird zusätzlich durch eine Variante des VLL (siehe Kapitel 3.2) eingeschränkt. Sämtliche Berechnungen werden dadurch in den

Objektraum verlagert, d.h. die Bildzuordnung, die Punktbestimmung und die Oberflächenrekonstruktion werden zu einem Auswerteprozess zusammengefasst. Die Ergebnisse liegen daher in einem gemeinsamen, globalen Koordinatensystem vor. Durch abschließende Interpolation zwischen den durch die zwei Prozeduren bestimmten Objektpunkten kann ein digitales Oberflächenmodell eines Zeitpunkts bestimmt werden.

Die Auswertung über die Zeit (siehe Kapitel 3.4) beruht auf der Annahme, dass sich die Höhe der Wasseroberfläche von einem zum nächsten Zeitpunkt nur gering innerhalb eines definierten Suchbereichs verändert. Somit wird aus dem Oberflächenmodell des Zeitpunkts  $t_0$  der zweiten Prozedur ein grobes Raster neuer Startpunkte abgeleitet. Diese werden in den Bildraum transformiert und als Startpunkte für den folgenden Zeitpunkt  $t_1$  der ersten Prozedur verwendet. Die Berechnung wird analog für die folgenden Zeitpunkte durchlaufen.

### 3.2 Punktweise Zuordnung

Neben den Bildsequenzen selbst sind die Parameter der inneren und der äußeren Orientierung sowie die homologen Startpunkte für das erste Stereomodell oder ein grobes Raster an Startpunkten aus dem Oberflächenmodell des vorangegangenen Zeitpunkts als Eingangsinformationen notwendig. Da die Startpunkte nur näherungsweise bekannt sein müssen, entsprechen in der Regel auch die Bildpunkte nur näherungsweise einem homologen Punktepaar. Die tatsächliche Lage der homologen Bildpunkte wird über die im Folgenden beschriebene punktweise Zuordnung ermittelt. Die Punkte, die als identische Punkte gefunden wurden, werden im Weiteren zur flächenhaften Berechnung (siehe Kapitel 3.3) der Wasseroberfläche genutzt.

Als geometrische Einschränkung für den Suchbereich wird eine Variante des VLL verwendet. Für einen gesuchten Objektpunkt  $P$  werden die Näherungskoodinaten und die Orientierungen der Bilder als Eingangsdaten benötigt. Der Objektpunkt  $P$  ist genähert gegeben durch den Startpunkt  $S$  (siehe Abbildung 3-2).

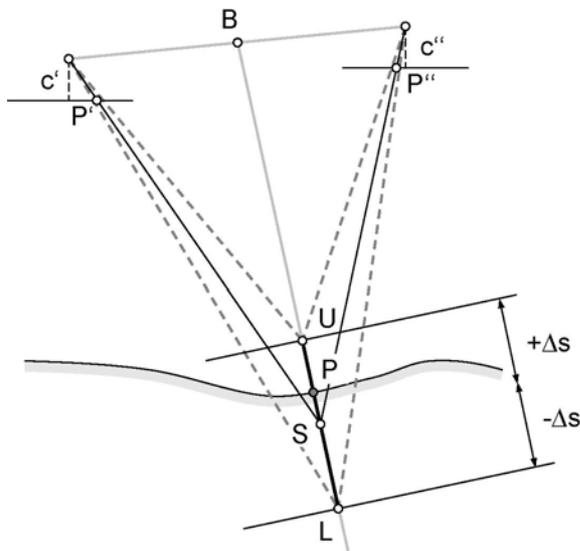


Abbildung 3-2: Korrelations-Verfahren zur Punktbestimmung

Zur Ermittlung des Objektpunkts  $P$  werden entlang einer Geraden mehrere Objektpunkte definiert. Die Gerade verläuft durch den Mittelpunkt  $B$  der Basis des Stereomodells sowie durch den Startpunkt  $S$ . Der maximale Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$  des Startpunkts  $S$  entlang der Geraden muss gegeben sein. Er wird definiert durch den Punkt  $U$  mit maximaler Höhe  $Z_{max}$  und den Punkt  $L$  mit minimaler Höhe  $Z_{min}$ . Innerhalb der maximal zulässigen Änderung  $\pm\Delta s$  entlang der Geraden wird der Startpunkt  $S$  sukzessive mit konstanter Schrittweite  $g$  verschoben.

Bei gegebener äußerer Orientierung werden unter Verwendung der Kollinearitätsgleichungen (3.1) alle Objektpunkte in den Bildraum transformiert und über eine Affintransformation (3.2) in das Pixelkoordinatensystem überführt.

$$\begin{aligned}
 x &= x_0' - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
 y &= y_0' - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

mit

- $x, y$  : Bildkoordinaten
- $c$  : Kammerkonstante
- $x_0', y_0'$  : Lage des Bildhauptpunkts
- $r_{ij}$  : Elemente der Rotationsmatrix
- $X, Y, Z$  : Objektkoordinaten
- $X_0, Y_0, Z_0$  : Koordinaten des Projektionszentrums

und

$$\begin{aligned}
 u &= a_0 + a_1x + a_2y \\
 v &= b_0 + b_1x + b_2y
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

mit

- $u, v$  : Pixelkoordinaten
- $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  : Parameter der Affintransformation

Durch die Pixelkoordinaten werden die Zentren der Korrelationsfenster festgelegt. Die zur Korrelation verwendeten Parameter, wie der Wert für den maximalen Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$ , der Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten  $\rho$  und die Fenstergröße sind zuvor anzugeben. Der Korrelationskoeffizient wird für jeden Objektpunkt berechnet.

Der Korrelationskoeffizient ist im Allgemeinen kleiner als 1, da die gemessenen Grauwertfunktionen mit zufälligen Fehlern behaftet sind und die geometrische Transformation zwischen den Bildern bezogen auf das Korrelationsfenster nur eine Näherung darstellt. Die resultierenden Verzerrungen werden mit Hilfe einer Projektivtransformation mathematisch modelliert. Die Form des Korrelationsfensters im linken Bild ist quadratisch. Zu jedem Eckpunkt dieses Fensters werden unter Annahme einer Ebene im Objektraum die zugehörigen vier Eckpunkte des entsprechenden Fensters im rechten Bild mittels Gleichung (3.1) bestimmt. Das Fenster im rechten Bild ist deshalb geometrisch verzerrt. Die Parameter der Projektivtransformation (3.3) werden über die vier identischen Eckpunkte der beiden Bildausschnitte berechnet. Die Bildkoordinaten der anderen Pixel im Korrelationsfenster des rechten Bilds werden über die Projektivtransformation ermittelt.

$$\begin{aligned}
 x_2 &= \frac{c_0 + c_1 x_1 + c_2 y_1}{1 + e_1 x_1 + e_2 y_1} \\
 y_2 &= \frac{d_0 + d_1 x_1 + d_2 y_1}{1 + e_1 x_1 + e_2 y_1}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

mit

- $x_1, y_1$  : Koordinaten einzelner Pixel im Korrelationsfenster des linken Bilds  
 $x_2, y_2$  : Koordinaten einzelner Pixel im Korrelationsfenster des rechten Bilds  
 $c_0, c_1, c_2, d_0, d_1, d_2, e_1, e_2$  : Parameter der Projektivtransformation

Die gesuchten XYZ-Koordinaten des Objektpunkts  $P$  werden durch den maximalen Korrelationskoeffizienten definiert. Um mögliche Fehlkorrelationen auszuschließen, wird ausgehend vom maximalen Korrelationskoeffizienten in einer Umgebung von  $\pm 5$  Schrittweiten  $g$ , entlang der Geraden durch den Mittelpunkt der Basis sowie durch den Startpunkt  $S$ , die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Korrelationskoeffizienten berechnet und mit einem Schwellwert verglichen. Ist die Differenz der Korrelationskoeffizienten kleiner als der vorgegebene Schwellwert wird der Objektpunkt verworfen. Eine Umgebung von  $\pm 5$  Schrittweiten  $g$  hat sich als ausreichend erwiesen um eine Aussage über die Eindeutigkeit des Korrelationskoeffizienten zu treffen.

Zur Ermittlung der Größe der Schrittweite  $g$  innerhalb von  $\pm \Delta s$  im Objektraum wird der Gebietsmittelpunkt  $G$  aus den Angaben der Größe des auszuwertenden DOMs bestimmt. Durch den Gebietsmittelpunkt  $G$  und durch den Mittelpunkt  $B$  der Basis wird eine Gerade definiert. Auf dieser Geraden wird ausgehend von  $G$  ein weiterer Objektpunkt bestimmt. Der Abstand zwischen diesen beiden Punkten ist die gesuchte Schrittweite  $g$ . Für den Gebietsmittelpunkt und den neu bestimmten Objektpunkt werden die Pixelkoordinaten  $u$  und  $v$  jeweils für das rechte und das linke Bild berechnet. Die Schrittweite  $g$  sollte möglichst klein gewählt werden, jedoch mit der Anforderung, dass die Differenz der Pixelkoordinaten der beiden Punkte in beiden Bildern mindestens einem Pixel entspricht.

### 3.3 Flächenhafte Ausbreitung

Bei der flächenhaften Ausbreitung wird mittels eines verfeinerten Region-Growing-Verfahrens und aus den Ergebnissen der punktweisen Zuordnung eine dreidimensionale Punktwolke generiert. Das Prinzip der Ausbreitung lässt sich in drei Abschnitte unterteilen (siehe Abbildung 3-3).

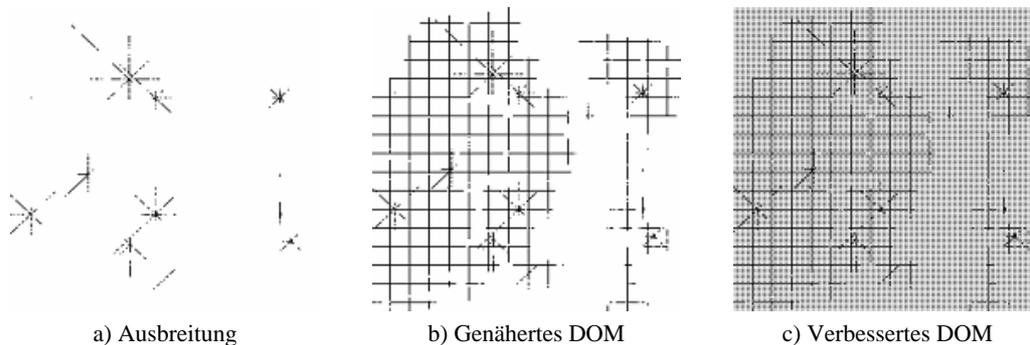


Abbildung 3-3: Prinzip der flächenhaften Ausbreitung (LINDER 2004)

Ausgehend von den durch die punktweise Zuordnung bestimmten Objektkoordinaten breitet sich der Algorithmus in die acht Hauptrichtungen im Objektraum mit einer vorgegebenen Gitterweite aus (siehe Abbildung 3-3a). Für einen neuen Punkt wird unter Verwendung der Höhe des benachbarten Punkts eine punktweise Zuordnung durchgeführt. Bei erfolgreicher Korrelation wird in die jeweilige Hauptrichtung mit der gegebenen Gitterweite bis zum Abbruch der Korrelation aufgrund des Unterschreitens des Schwellwerts für den Korrelationskoeffizienten bzw. des Überschreitens des maximalen Verschiebungsbereichs  $\pm \Delta s$  fortgefahren.

Im zweiten Teil der flächenhaften Ausbreitung wird ein digitales Oberflächenmodell in einem iterativen Prozess erzeugt. In diesem Prozess wird zunächst durch Interpolation ein DOM abgeleitet. Die interpolierten Objektpunkte werden im Anschluss durch eine erneute punktweise Zuordnung überprüft und gegebenenfalls verworfen (siehe Abbildung 3-3b).

Die Ausbreitung in die acht Hauptrichtungen erfolgt zunächst auf den reduzierten Auflösungsstufen der Bildpyramiden. Das Ergebnis der darauf folgenden iterativen flächenhaften Ausbreitung durch Interpolation und punktweise Zuordnung ist ein genähertes DOM. Die Ergebnisse des genäherten DOMs dienen im Weiteren als Näherungswerte für die erneute iterative flächenhafte Ausbreitung in den Originalbilddaten (siehe Abbildung 3-3c). Die Punkte des verbesserten DOMs, die nicht durch die flächenhafte Ausbreitung bestimmt wurden, können nachträglich interpoliert werden.

Zur Berechnung des genäherten und des verbesserten DOMs können jeweils separat die Steuerungsparameter für die Anzahl der Iterationen, für die Größe des Verschiebungsbereichs  $\pm\Delta s$  und für den Korrelationskoeffizienten  $\rho$  sowie für die Fenstergröße gewählt werden.

### 3.4 Bildsequenzauswertung

Die Grundidee der Sequenzauswertung ist, dass die Änderung der Höhe des DOMs in aufeinander folgenden Bildern einer Bildsequenz sehr gering ist. Ausgehend von den Startpunkten ist die Methode dann in der Lage, die benötigten Startpunkte der folgenden Stereobildpaare aus den vorhergehenden Zeitpunkten automatisch zu finden (SANTEL et al. 2003, SANTEL et al. 2004a). Im Folgenden wird die Auswertung der Bildsequenzen näher beschrieben.

Die Bildzuordnung wird für das erste Stereobildpaar zum Zeitpunkt  $t_0$  ausgeführt. Das Ergebnis ist eine große Anzahl neu bestimmter Objektpunkte, die als Startpunkte für den folgenden Zeitpunkt  $t_1$  verwendet werden (siehe Abbildung 3-4). Um den Aufwand für die Bildzuordnung zu verringern, wird ein grobes Raster neuer Startpunkte aus den Objektpunkten des Zeitpunkts  $t_0$  ausgewählt. Die Bildzuordnung des Stereobildpaars  $t_1$  wird durchgeführt und die Ergebnisse werden in gleicher Weise für das Stereobildpaar  $t_2$  genutzt. Analog wird für die folgenden Zeitpunkte verfahren. Das Ergebnis der photogrammetrischen Datenerfassung ist eine dynamische Beschreibung der Wasseroberfläche in der Form  $Z(X,Y,t)$ .

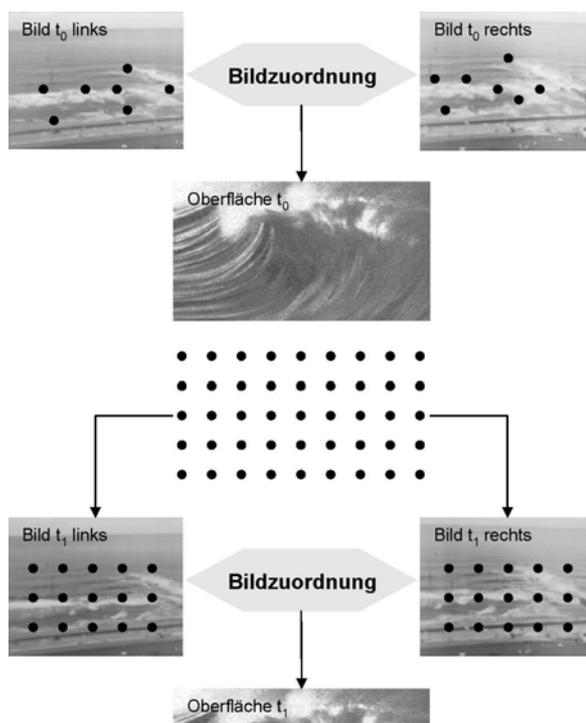


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Bestimmung von Wasseroberflächen aus Bildsequenzen

### 3.5 Frei wählbare Steuerungsparameter

Zur Ausführung des vorgestellten Verfahrens müssen frei wählbare Steuerungsparameter gesetzt werden. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Der Wert für den maximalen Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$  orientiert sich an der Form der zu bestimmenden Oberfläche und der Aufnahme-richtung. Je kleiner dieser Wert gewählt wird, desto geringer ist die zugelassene Änderung entlang der Geraden bei der punktweisen Zuordnung. Bei der Auswertung von Bildsequenzen ist der Wert für den maximalen Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$  zusätzlich von der Veränderung der Form der Oberfläche in der Zeit und der Aufnahme-frequenz abhängig (siehe Kapitel 5.1).

Der Schwellwert für den minimalen Korrelationskoeffizienten  $\rho$  liegt für eine gute Zuordnung zwischen 0.7 und 1. Je größer der Schwellwert gewählt wird, desto weniger homologe Punkte werden gefunden und desto sicherer ist der bestimmte Objektpunkt.

Durch die Vergrößerung des Korrelationsfensters kann die Genauigkeit der Bildzuordnung gesteigert werden, solange durch die Vergrößerung mehr Struktur bzw. Textur für die Bildzuordnung zur Verfügung steht. Einer beliebigen Steigerung der Genauigkeit sind aber wegen der geometrischen Anpassung der im Allgemeinen nicht ebenen Oberfläche Grenzen gesetzt. Des Weiteren sind die Güte der Näherungswerte für die Zuordnung und die gewählte Fenstergröße eng miteinander verknüpft (SCHENK & TOTH 1992), d.h. je besser die Näherungswerte sind, desto kleiner kann die Fenstergröße gewählt werden.

Die Anzahl Iterationen der flächenhaften Ausbreitung zur Ermittlung des genäherten und des verbesserten DOMs ist abhängig von der Genauigkeit der Startpunkte.

Die Größe der Gitterweite ergibt sich aus der Höhenvariation der Objektoberfläche und der geforderten Genauigkeit des zu berechnenden Oberflächenmodells.

Die Rasterweite zur Ableitung neuer Startpunkte ist ebenfalls abhängig von der Höhenvariation der Objektoberfläche.

## 4 Experimentelle Überprüfung

Nach der Beschreibung des Verfahrens in Kapitel 3 wird dieses in den Kapiteln 5 und 6 analysiert und bewertet. Die Datengrundlage bilden digitale Bildsequenzen der Brandungszone vor Norderney. In diesem Kapitel werden die Planungsgrundlagen zur Datenerfassung dargestellt. Es wird im Detail auf die Aufnahmekonfiguration und die theoretisch erreichbare Genauigkeit eingegangen sowie die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit abgeschätzt. Des Weiteren werden die verwendete Hardware und die durchgeführten Messkampagnen zur Verifizierung des Verfahrens vorgestellt.

### 4.1 Planungsgrundlagen

Die Bühnenfelder am Nord- und Weststrand der Insel Norderney stellen eine wesentliche Komponente des seeseitigen Insel-schutzes dar. Seit mehreren Jahrzehnten werden an den Strandabschnitten Naturmessungen durchgeführt, welche als Referenzdaten für die numerische Modellierung und die Bestimmung der Wasseroberfläche genutzt werden können. Voraussetzungen für ein photogrammetrisches Messsystem sind hohe, stabile, möglichst nah am Wasser liegende Aufnahme-standpunkte um Verdeckungen an der Rückseite der Wellen zu minimieren. Da das Stadtgebiet von Norderney bis unmittelbar an das Deckwerk des Nordstrands reicht, kommen mehrere Hochhäuser als photogrammetrische Aufnahme-standpunkte in Frage.

Daher wurde als Untersuchungsgebiet das Bühnenfeld D1/E1 am Nordstrand der Insel mit einer Größe von ca. 200 x 200 m<sup>2</sup> gewählt. Dieses Bühnenfeld wird von der Forschungsstelle Küste (FSK) des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) als Forschungsfeld genutzt und ist aus diesem Grund sehr gut mit konventionellen Messinstrumenten zur Bestimmung des Seegangs ausgestattet. Zusätzlich zu den vorhandenen neun Geschwindigkeits-Druck-Sonden und zwei Wellenmessdrähten wurden von der FSK drei Bojen am seeseitigen Rand des Modellgebiets installiert. Abbildung 4-1 zeigt die Verteilung der Instrumente zur Seegangsmessung für die Kampagne im Mai 2003. Die Bojen am äußeren Gebietsrand sind aufgrund ihrer Positionen nach „West“, „Mitte“ und „Ost“ benannt, die Bezeichnungen der Geschwindigkeits-Druck-Sonden wurden entsprechend gewählt.

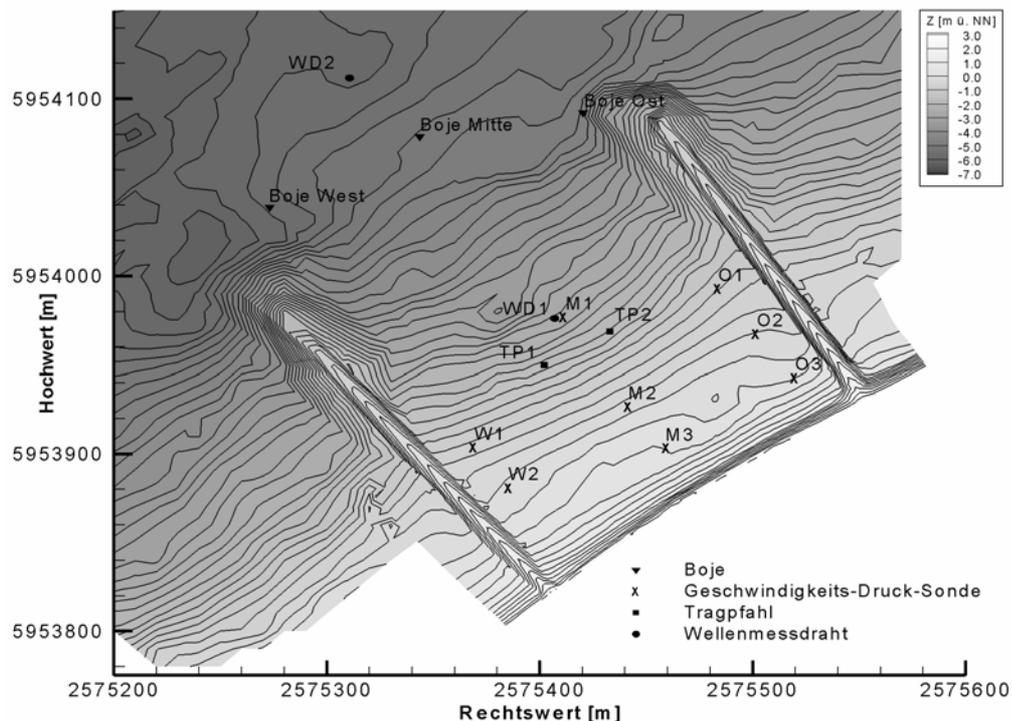


Abbildung 4-1: Topographie des Bühnenfelds D1/E1 mit Positionen der Instrumente zur Seegangsmessung, Messkampagne Mai 2003

#### 4.1.1 Aufnahmekonfiguration

Die photogrammetrischen Aufnahmen wurden von Dächern zweier Hochhäuser in unmittelbarer Nähe des Bühnfelds durchgeführt (weiße Punkte in Abbildung 4-2). Auf jedem Gebäude wurden zwei Kameras mit einer Aufnahmebasis von 18 m aufgestellt. Wegen der Höhe der Aufnahmestandpunkte von ca. 40 m und einem maximalen Aufnahmeabstand von 300 m am äußeren Rand des Untersuchungsgebiets wurden die Kameras um ungefähr 12,5 gon aus der Horizontalen geneigt. Aus der gewählten Kamerakonfiguration ergeben sich zwei überlappende Stereomodelle (siehe Abbildung 4-3). Die Angaben zur Bildmaßstabszahl  $m_b$  in Abbildung 4-3 beziehen sich auf eine Kammerkonstante von 12,5 mm. Ein Oberflächenmodell des gesamten Gebiets wird durch die Kombination der beiden Modelle erzeugt.



Abbildung 4-2: Untersuchungsgebiet  
(© NLWKN Betriebsstelle Norden-Norderney)

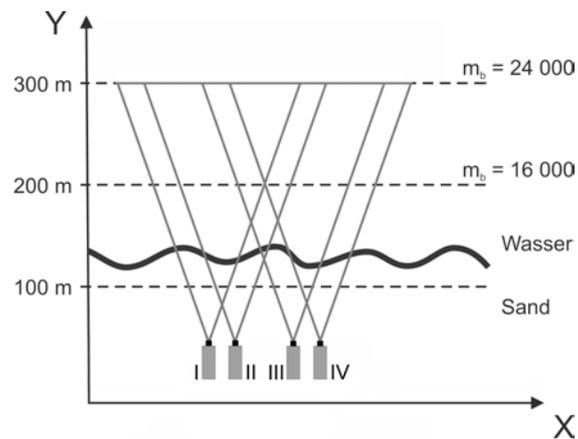


Abbildung 4-3: Schematische Aufnahmekonfiguration  
im Grundriss

Für den Vergleich mit den Seegangsmessungen der konventionellen Messinstrumente müssen die photogrammetrischen Messungen in einem übergeordneten Koordinatensystem vorliegen. Dieser Bezug wird über die Passpunkte hergestellt, über die die äußere Orientierung der Bilder bestimmt wird. Zu diesem Zweck wurden von der FSK die Tragpfähle TP1 und TP2 im Untersuchungsgebiet eingebracht (siehe Abbildung 4-1). Am Pfahl TP1 wurde zusätzlich ein Pegel zur Aufzeichnung des Tidewasserstands installiert. Die Koordinaten der Tragpfähle sowie weiterer Passpunkte, wie z.B. von Mauerecken, Laternenpfählen oder Zieltafeln wurden tachymetrisch von der Betriebsstelle Norden-Norderney des NLWKN in Lage und Höhe mit einer Standardabweichung von jeweils 1,0 cm bestimmt.

#### 4.1.2 Genauigkeitsabschätzung

Die erreichbare Objektpunktgenauigkeit wird sowohl durch die geometrische Messanordnung, wie die Objektgröße, die Anzahl und Konfiguration der Kamerastandpunkte, die Aufnahmerichtung und den Öffnungswinkel jeder Kamera, als auch durch die Messgenauigkeit der homologen Bildkoordinaten beeinflusst. Durch die Anwendung der Fehlertheorie des Normalfalls kann die erreichbare Genauigkeit der gewählten Aufnahmekonfiguration für je ein Stereomodell in einem lokal gewählten Koordinatensystem, in dem  $Y$  die Aufnahmerichtung darstellt, nach Formel (4.1) abgeschätzt werden. Fehlereinflüsse aus der inneren und der äußeren Orientierung werden für diese grobe Genauigkeitsabschätzung vernachlässigt.

$$s_x = s_z = m_b \cdot \sigma_0$$

$$s_y = \frac{y}{b} \cdot m_b \cdot \sigma_0$$
(4.1)

mit

- $s_x$  : Standardabweichung in X
- $s_y$  : Standardabweichung in Y
- $s_z$  : Standardabweichung in Z
- $\sigma_0$  : Messgenauigkeit im Bild
- $m_b$  : Bildmaßstabszahl
- $y$  : Aufnahmeentfernung
- $b$  : Aufnahmebasis

Die Breite des auswertbaren Stereobereichs  $w$  eines Modells parallel zur Aufnahmebasis lässt sich wie folgt berechnen:

$$w = (s' \cdot m_b) - b$$
(4.2)

mit

- $s'$  : Bildgröße

Zur Datenerfassung werden handelsübliche Videokameras ausgewählt, die eine Bildgröße von 1296 Pixel x 1031 Pixel und eine Pixelgröße von  $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}^2$  aufweisen. Bei der gegebenen Bildgröße und der zugrunde liegenden Aufnahmeconfiguration wird beim Einsatz einer Kammerkonstanten von 12.5 mm die aufzunehmende Gebietsgröße von  $200 \times 200 \text{ m}^2$  flächenhaft erfasst. Neben der großflächigen Erfassung des Untersuchungsgebiets wird für weitere detaillierte Analysen von Ausschnitten des Untersuchungsgebiets eine zusätzliche Genauigkeitsabschätzung mit einer Kammerkonstanten von 50 mm durchgeführt. Tabelle 4-1 enthält die Eingangsparameter und die daraus ermittelten Standardabweichungen eines Objektpunkts für eine Aufnahmeentfernung  $y$  von 200 m in der Mitte des Untersuchungsgebiets und von 300 m am äußeren Gebietsrand jeweils für eine Kammerkonstante  $c$  von 12.5 mm bzw. 50 mm.

Kammerkonstante $c$	12.5 mm	12.5 mm	50 mm	50 mm
Bildgröße $s'$	8.6 mm	8.6 mm	8.6 mm	8.6 mm
Pixelgröße $pix$	0.0067 mm	0.0067 mm	0.0067 mm	0.0067 mm
Aufnahmeentfernung $y$	200 m	300 m	200 m	300 m
Aufnahmebasis $b$	18 m	18 m	18 m	18 m
Messgenauigkeit $\sigma_0$	1 Pixel	1 Pixel	1 Pixel	1 Pixel
Bildmaßstabszahl $m_b$	16 000	24 000	4 000	6 000
Basis-Abstand-Verhältnis $b/y$	0.09	0.06	0.09	0.06
Standardabweichung in X, Z: $s_x, s_z$	10.7 cm	16.1 cm	2.7 cm	4.0 cm
Standardabweichung in Y: $s_y$	119.1 cm	268.0 cm	29.8 cm	67.0 cm
Pixelgröße im Objekt $pix$	10.7 cm	16.1 cm	2.7 cm	4.0 cm
Breite des Stereobereichs $w$	119.6 m	188.4 m	16.4 m	33.6 m

Tabelle 4-1: Genauigkeitsabschätzung

Die Genauigkeiten in Aufnahmerichtung und quer dazu unterscheiden sich wegen des geringen Basis-Abstand-Verhältnisses deutlich. Mit einer Kammerkonstanten von 12.5 mm ist im mittleren Gebietsbereich eine Genauigkeit in der Lage X bzw. der Höhe Z von 10.7 cm und in der Tiefe Y von 119.1 cm zu erreichen. Die Breite des auswertbaren Stereobereichs eines Modells parallel zur Basis beträgt bei der Aufnahmeentfernung von 200 m aufgrund des

Öffnungswinkels der Objektivse 119.6 m. Durch die Kombination von zwei Stereomodellen lässt sich das gesamte Untersuchungsgebiet abdecken.

Bei der Verwendung einer Kammerkonstanten von 50 mm beträgt die erreichbare Genauigkeit im mittleren Gebietsbereich in der Lage  $X$  bzw. der Höhe  $Z$  2.7 cm und in der Tiefe  $Y$  29.8 cm. Allerdings reduziert sich der auswertbare Stereobereich eines Modells bei der Aufnahmeentfernung von 200 m auf 16.4 m. Daher kann bei der Verwendung von vier Kameras mit 50 mm Objektivse nicht das gesamte Untersuchungsgebiet aufgenommen werden.

Zur Erfassung des Bühnensfelds werden daher vier Kameras mit einer Kammerkonstanten von 12.5 mm eingesetzt. Die Wahl der 12.5 mm Objektivse zu Gunsten der Gebietsausdehnung hat eine geringere Objektpunktgenauigkeit als beim Einsatz der 50 mm Objektivse zur Folge. Die Genauigkeiten sind etwa um den Faktor vier schlechter. Jedoch wird bei der Wahl der 12.5 mm Objektivse die Forderung nach einer Genauigkeit in der Höhe im Bereich weniger Dezimeter eingehalten.

#### 4.1.3 Abschätzung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit

Sowohl bei der Abschätzung des Einflusses von Asynchronitäten des Messsystems auf die Objektpunktgenauigkeit (siehe Kapitel 4.2) als auch bei der Festlegung geeigneter Steuerungsparameter für das beschriebene Verfahren (siehe Kapitel 5.1) wird die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit berücksichtigt. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf ihre Berechnung eingegangen.

Eine Welle kann als ein periodisch wiederkehrender Vorgang aufgefasst werden, der durch die Wellenhöhe  $H$  und die Wellenlänge  $L$  oder die Wellenperiode  $T$  beschrieben werden kann (siehe Abbildung 4-4).

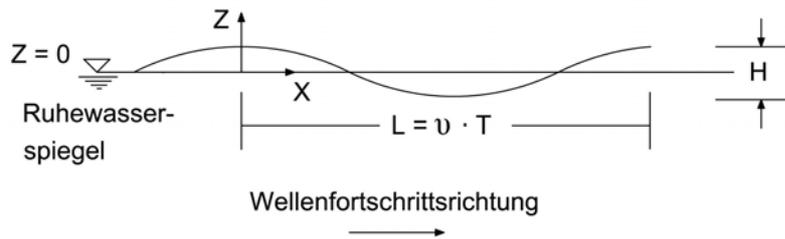


Abbildung 4-4: Definition einer Welle (EAU 1985, verändert)

Mit Hilfe von Wellentheorien ist eine mathematische Beschreibung des Wellengangs möglich (WAGNER 1990). Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $v$  wird definiert durch:

$$v = \frac{L}{T} \quad (4.3)$$

mit

$v$  : Wellenfortschrittsgeschwindigkeit [m/s]

$L$  : Wellenlänge [m]

$T$  : Wellenperiode [s]

Bei einer mittleren Wellenperiode von 8.6 s und einer Wellenlänge von 29.5 m in der Mitte des Untersuchungsgebiets wird mit Gleichung (4.3) eine durchschnittliche Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $v$  von 3.4 m/s berechnet.

## 4.2 Verwendete Hardware

Zur photogrammetrischen Datenerfassung werden vier digitale schwarz-weiß Videokameras Ikegami SKC-131-12E mit einem  $\frac{2}{3}$  inch interline progressive scan CCD und 12.5 mm Cosmimar Objektiven eingesetzt (siehe Abbildung 4-5). Bei progressive scan Kameras wird das Sensorbild im Vollbildverfahren ausgelesen, d.h. das gesamte Bild wird zu ein und demselben Zeitpunkt belichtet.



Abbildung 4-5: Kamera Ikegami SKC-131-12E

Der CCD-Sensor hat eine Größe von 1296 Pixel x 1031 Pixel mit einer geometrischen Auflösung von  $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}^2$  pro Pixel. Da die Kameras keinen internen Speicher besitzen sondern die Bilder direkt an einen Rechner übertragen werden, ist die Aufnahmedauer nur durch die Speicherkapazität des Rechners begrenzt. Aufgrund der Speicherkapazität der hier eingesetzten Rechner kann bei einer Bildfrequenz von 8 Hz eine Sequenz von bis zu 30 min aufgenommen werden. Eine Bildsequenz besteht aus einer Folge einzeln abgespeicherter Grauwertbilder. Jedes dieser Bilder benötigt 1.3 MB Speicherplatz. Bei einer Sequenz von 10 min mit einer Aufnahmefrequenz von 8 Hz entspricht dies 4 800 Bildern bzw. 6.2 GB.

Die Kameras wurden sowohl vor als auch nach der jeweiligen Messkampagne kalibriert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen eine stabile innere Orientierung.

Die Datenerfassung muss aufgrund der anschließenden Stereoauswertung an allen vier Kameras zeitgleich erfolgen, um die negativen Auswirkungen von Asynchronitäten zwischen den Kameras auf die Objektpunktbestimmung zu vermeiden. Da die Kamerastandpunkte nicht mit Kabeln verbunden werden konnten, erfolgte die Synchronisation der Kameras über Funk. Das externe kontinuierliche Synchronisations-Trigger-Signal wurde alle 125 ms zu den Kameras übertragen (siehe Abbildung 4-6). Durch das gesendete bzw. empfangene Signal wird synchron an allen vier Kameras die Aufnahme eines Bilds ausgelöst und anschließend das Bild im Rechner gespeichert.

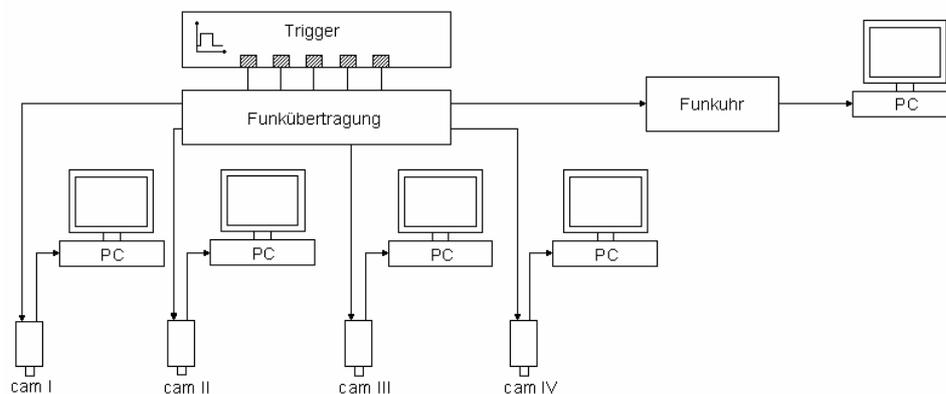


Abbildung 4-6: Hardwarekonfiguration

Die Synchronität der Bilderfassung der Kameras sowie die Auswirkungen auf die Objektpunktgenauigkeiten wurden im Labor untersucht (KÖNNECKE 2002). Bei diesen Untersuchungen ergab sich eine maximale Asynchronität zwischen den Kameras von ca. 0.05 ms. In Kombination mit der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit von 3.4 m/s und der gewählten Aufnahmeconfiguration ergibt sich daraus eine systematische Verschiebung von ca. 0.1 mm quer und maximal 2.1 mm in Aufnahme-richtung. Diese kann aufgrund der Genauigkeitsabschätzungen für die Aufnahmeconfiguration (siehe Tabelle 4-1) vernachlässigt werden.

Um bei der anschließenden Auswertung die Ergebnisse der photogrammetrischen Messungen und der Seegangsmessungen miteinander vergleichen zu können, wurde der exakte Zeitpunkt des Synchronisations-Trigger-Signals über eine Funkuhr ermittelt und registriert.

### 4.3 Durchgeführte Messkampagnen

Zur Datenerfassung wurden zwei Messkampagnen vom 19.-25. August 2002 und vom 10.-16. Mai 2003 auf Norderney durchgeführt. Die Brandungszone wurde mit einer Frequenz von 8 Hz über eine Dauer von maximal 20 min in einem Abstand von ca. einer Stunde photogrammetrisch aufgenommen.

Zeitgleich zu den Messkampagnen wurden umfangreiche Baumaßnahmen am Deckwerk durchgeführt. Aus diesem Grund standen nicht immer alle Instrumente zur Seegangsmessung zur Verfügung. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die vorhandenen und mit konventionellen Methoden aufgezeichneten Messdaten. Die verwendeten Abkürzungen für die Messinstrumente sind entsprechend Kapitel 4.1 gewählt. Die Wellenmessdrähte werden mit WD bezeichnet und die Geschwindigkeits-Druck-Sonden mit W für „West“, M für „Mitte“ und O für „Ost“ sowie entsprechender Nummerierung.

Messkampagne	WD1	WD2	Boje West	Boje Mitte	Boje Ost	W1	W2	M1	M2	M3	O1	O2	O3	Pegel
August 2002	x	x	x	x	x	-	x	x	-	x	x	x	-	-
Mai 2003	x	x	x	x	x	-	-	x	-	x	-	-	-	x

Tabelle 4-2: Durchgeführte Seegangsmessungen während der Messkampagnen (x stand zur Verfügung, - war nicht verfügbar)

## 5 Auswertung

Während der Messkampagnen wurden Bildsequenzen zu unterschiedlichen Wasserständen aufgenommen. Für die vorliegende Arbeit wurde exemplarisch der Datensatz vom 15.05.2003 um 10:03:46 Uhr MEZ mit einer Länge von ca. 16 min ausgewählt. Abbildung 5-1 zeigt ein Stereobildpaar aus dieser Sequenz. Da zum Zeitpunkt der Aufnahme der Bildsequenz Tidehochwasser war, ist eine ausgeprägte Struktur auf der Wasseroberfläche vorhanden und die maximale Ausdehnung der Wasseroberfläche innerhalb des Untersuchungsgebiets erreicht bzw. der Abstand der Grenzlinie Wasser – Strand zu den Aufnahmestandpunkten minimal.

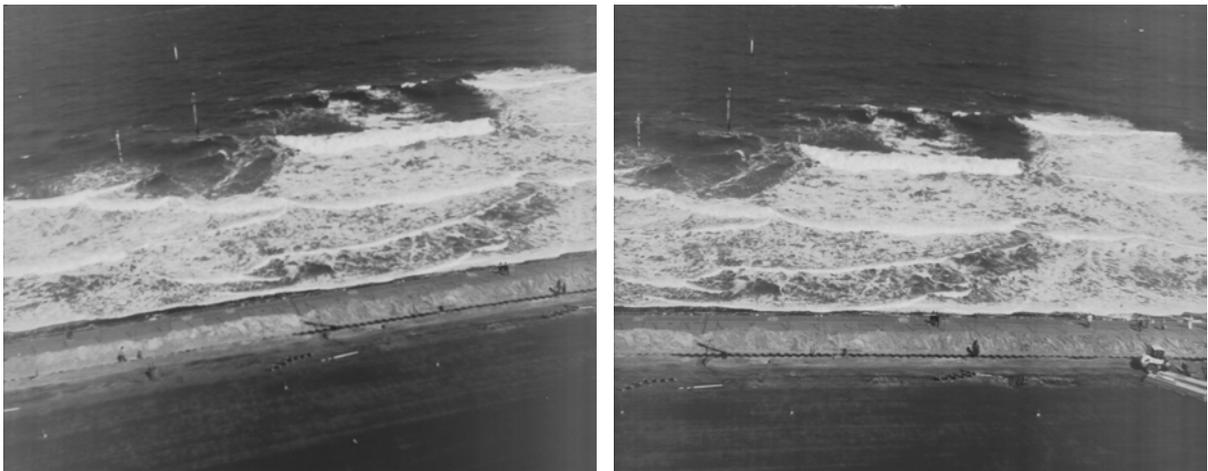


Abbildung 5-1: Stereobildpaar cam III und cam IV vom 15.05.2003, 10:03:46 Uhr MEZ

Bei Tideniedrigwasser fällt ein Teil des Untersuchungsgebiets trocken und die Größe der auszuwertenden Wasseroberfläche sowie die Genauigkeit der Bestimmung wird geringer. Des Weiteren gehen die Höhe und die Anzahl der brechenden Wellen zurück. Dies hat eine geringere Ausprägung der Struktur der Wasseroberfläche zur Folge, d.h. bei der Auswertung treten Schwierigkeiten in den texturarmen Regionen auf. Abbildung 5-2 zeigt ein Stereobildpaar vom 15.05.2003 um 13:00:35 Uhr MEZ, ca. 3 Stunden nach Tidehochwasser.

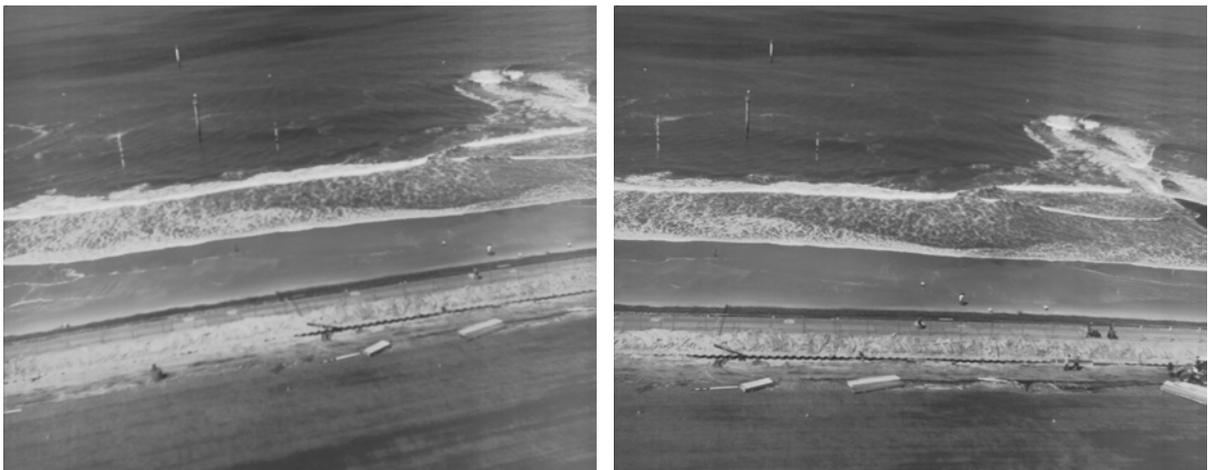


Abbildung 5-2: Stereobildpaar cam III und cam IV vom 15.05.2003, 13:00:35 Uhr MEZ

Die äußeren Orientierungen der Bilder wurden mittels Passpunkten durch räumliche Rückwärtsschnitte bestimmt. Bei einer angenommenen Bildmessgenauigkeit der Passpunkte von 0,5 Pixel ergeben sich aus der Aufnahmekonfiguration und der Passpunktverteilung theoretische Standardabweichungen von ca. 4 cm für die Lage und ca. 0,015 gon für die Drehwinkel der Projektionszentren. Die Standardabweichung der Drehwinkel lässt sich für eine Aufnahmeentfernung von 200 m in eine Standardabweichung in der Lage von 4,7 cm umrechnen. Im Hinblick auf die geforderten Objekt-

punktgenauigkeiten im Bereich weniger Dezimeter kann die Bestimmung der äußeren Orientierung somit als ausreichend genau angenommen werden. Die zeitliche Stabilität der äußeren Orientierung wurde visuell überprüft. Dafür wurden die Positionen einzelner Passpunkte im Bild über die Zeit betrachtet. Bei der Überprüfung traten keine signifikanten Variationen in den Bildkoordinaten auf. Für die weitere Auswertung kann somit eine konstante äußere Orientierung angenommen werden.

In den folgenden Kapiteln werden die zur Auswertung verwendeten Steuerungsparameter aufgeführt und die Ergebnisse einer Bildsequenzauswertung vorgestellt. Zur Bewertung der automatisch bestimmten Modelle der Wasseroberfläche in Kapitel 6.2.1 werden zusätzlich durchgeführte manuelle Messungen als Referenz herangezogen. Die Erstellung dieser Referenzmodelle wird beschrieben und eine Genauigkeitsabschätzung durchgeführt.

## 5.1 Verwendete Steuerungsparameter

Die Werte der Steuerungsparameter der automatischen Bildzuordnung werden aufgrund theoretischer Überlegungen, der Größe der auszuwertenden Oberfläche sowie Erfahrungswerten gewählt. Tabelle 5-1 zeigt die zur Bildsequenzauswertung ausgewählten Steuerungsparameter. Die Gitterweite der flächenhaften Ausbreitung wurde mit 0.25 m festgelegt. Dadurch wird die Wasseroberfläche ausreichend genau beschrieben und die Anforderung an die photogrammetrischen Messungen zur Validierung des entsprechenden numerischen Modells wird erfüllt (siehe Kapitel 1.1). Zur Bildsequenzauswertung wird für die Ermittlung der Startpunkte des folgenden Zeitpunkts eine Rasterweite von 1.5 m gewählt. Damit liegt eine genügend große Anzahl an Startpunkten für die Bildzuordnung des jeweils folgenden Zeitpunkts vor. Zur Verbesserung des genäherten DOMs wurden für die weitere Auswertung die Steuerungsparameter entsprechend angepasst (siehe Tabelle 5-1).

Parameter	Genähertes DOM	Verbessertes DOM
Verschiebungsbereich $\pm\Delta s$	0.25 m	0.15 m
Korrelationskoeffizient $\rho$	0.8	0.9
Fenstergröße	13 Pixel	7 Pixel
Anzahl Iterationen	3	5

Tabelle 5-1: Steuerungsparameter zur Bildsequenzauswertung

Die Größe des Verschiebungsbereichs  $\pm\Delta s$  ist abhängig von der Aufnahmefrequenz, der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und der Form der Wasseroberfläche. Durch Verwendung der harmonischen Schwingungsgleichung (allgemeine Sinusfunktion) kann die Veränderung der Form der Wasseroberfläche für einen Zeitschritt  $\Delta t$  abgeschätzt werden. Die Sinusfunktion einer Schwingung bzw. einer idealisierten Welle zum Zeitpunkt  $t_i$  ist gegeben durch:

$$z_{t_i} = \frac{H}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot x_{t_i}\right) \quad (5.1)$$

Unter Berücksichtigung des zeitlichen Abstands zweier Bilder  $\Delta t$  und der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $v$  ergibt sich als Gleichung für den darauf folgenden Zeitpunkt  $t_{i+1}$ :

$$z_{t_{i+1}} = \frac{H}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot (x_{t_i} - v \cdot \Delta t)\right) \quad (5.2)$$

Die Sinusfunktion  $z_{t_{i+1}}$  ist um  $-v \cdot \Delta t$  in Richtung der  $x$ -Achse gegenüber  $z_{t_i}$  verschoben. Durch die Aufnahmefrequenz der Kameras von 8 Hz (siehe Kapitel 4.2) ist der zeitliche Abstand  $\Delta t$  zweier Bilder mit 0.125 s gegeben.

Bei einer Aufnahmeentfernung  $y$  von 200 m für die Mitte des Untersuchungsgebiets und einer Aufnahmhöhe  $h$  von ca. 40 m kann die Aufnahmerichtung als eine um 12.5 gon aus der Horizontalen geneigte Gerade angenommen werden (siehe Abbildung 5-3). Durch die Bestimmung der Schnittpunkte  $T_i$  und  $T_{i+1}$  der Schwingungsgleichungen zu den

Zeitpunkten  $t_i$  und  $t_{i+1}$  mit der Geraden sowie die anschließende Ermittlung der Strecke zwischen den Schnittpunkten  $T_i$  und  $T_{i+1}$ , kann der Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$  abgeschätzt werden. Der maximale Wert für  $\pm\Delta s$  wird in den Wendepunkten der Sinusfunktion  $z_{t_i}$ , d.h. in den Schnittpunkten von  $z_{t_i}$  mit der  $x$ -Achse erreicht. Für die praktische Abschätzung wird der für den Betrachter sichtbare Wendepunkt, also der dem Betrachter zugewandte Punkt auf der Wellenvorderseite genutzt. Der Bereich um den zweiten Wendepunkt auf der Wellenrückseite kann aufgrund von Verdeckungen nicht gemessen werden und wird somit nicht für die Abschätzung von  $\pm\Delta s$  herangezogen.

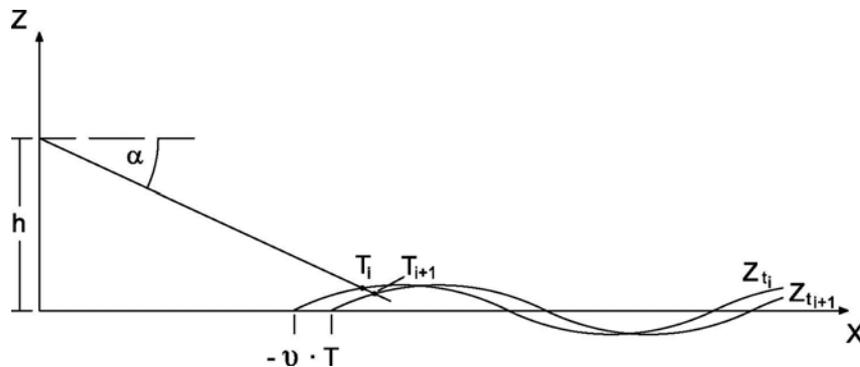


Abbildung 5-3: Abhängigkeit des Verschiebungsbereichs von der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit

Der Wellenmessdraht WD1 ist ungefähr in der Mitte des Untersuchungsgebiets installiert (siehe Abbildung 4-1). Die Messungen vom 15.05.2005 liefern für den Wellenmessdraht eine signifikante Wellenhöhe  $H$  von 1.7 m und eine Wellenlänge  $L$  von 29.5 m. Für den dem Betrachter zugewandten Wendepunkt der Funktion  $z_{t_i}$  liegt die Abschätzung für den Verschiebungsbereich  $\pm\Delta s$  bei 0.21 m. Aus dieser Abschätzung und durch anschließende empirische Tests hat sich zur Berechnung des genäherten DOMs 0.25 m und des verbesserten DOMs 0.15 m als optimaler Wert für  $\pm\Delta s$  herausgestellt.

Eine Fenstergröße von 13 Pixel entspricht bei einer Aufnahmeentfernung von 200 m einer Größe im Objekt von 1.39 m. Aufgrund der Größe des Fensters können in den texturschwachen Gebieten der Wasseroberfläche im Bereich der nicht brechenden Welle Mehrdeutigkeiten vermieden werden. Zur Bestimmung eines genäherten DOMs ist diese Fenstergröße ausreichend. Für die Ermittlung des verbesserten DOMs wird die Fenstergröße zur besseren Anpassung an die Form der Wasseroberfläche auf 7 Pixel reduziert. Dies entspricht einer Größe von 75.0 cm im Objektraum bei einer Aufnahmeentfernung von 200 m.

Der Korrelationskoeffizient und die Anzahl der Iterationen wurden gemäß den Überlegungen in Kapitel 3.5 festgelegt.

## 5.2 Oberflächenberechnung

Zur dreidimensionalen Objektbestimmung mittels des entwickelten Verfahrens (siehe Kapitel 3) wurden pro Stereobildpaar ca. 120 gut verteilte Startpunkte manuell gemessen. Unter Verwendung dieser Startpunkte wurden im Durchschnitt für jeden Zeitpunkt ca. 92 300 homologe Punkte automatisch bestimmt. Dies entspricht ca. 28 % der möglichen Zuordnungen. Die Berechnung einer Sequenz von 7 000 Bildern mit einer Frequenz von 8 Hz wurde durchgeführt. Eine Sequenz von 7 000 Bildern entspricht ca. 14½ min.

Abbildung 5-4 zeigt in der linken Hälfte drei generierte Wasseroberflächen der ausgewerteten Bildsequenz mit einem zeitlichen Abstand  $\Delta t$  von jeweils 2 s. Die Oberflächenmodelle sind dreifach überhöht dargestellt und zeigen jeweils eine Gebietsfläche von ca. 110 x 190 m<sup>2</sup>. Die Gitterweite beträgt 0.25 m.

Zusätzlich erzeugte Orthophotos wurden den ermittelten Oberflächen überlagert (rechte Hälfte der Abbildung 5-4). Die Positionen der Wellenfronten können sowohl in den Oberflächenmodellen als auch in den überlagerten Darstellungen gut erkannt und verfolgt werden.

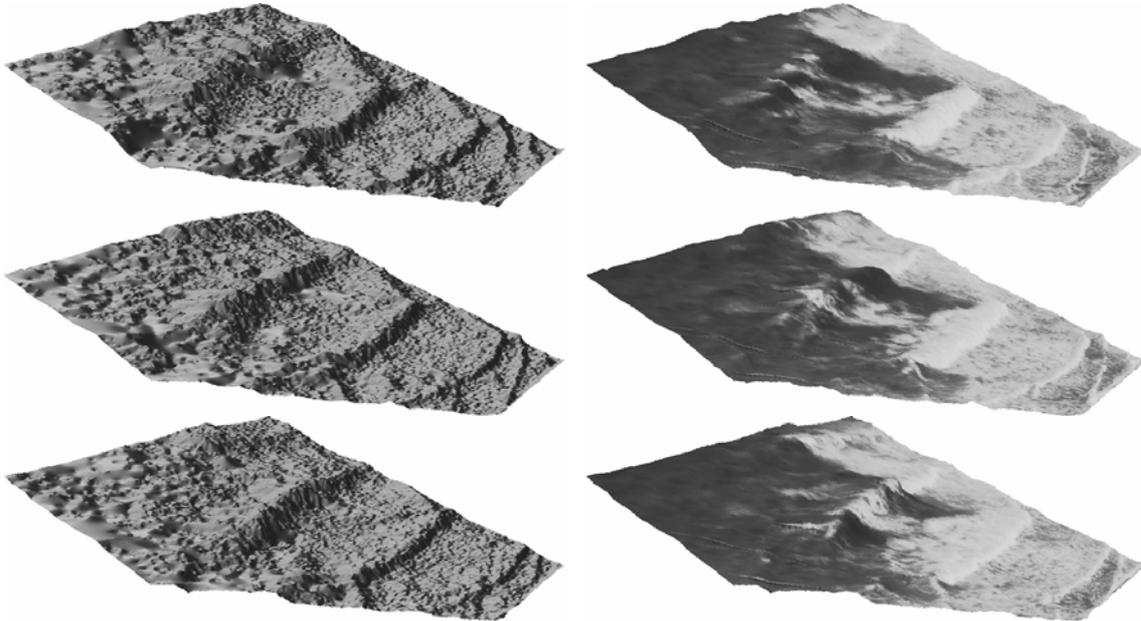


Abbildung 5-4: Sequenz von Wasseroberflächen mit  $\Delta t = 2$  s, links: Oberflächenmodelle, rechts: mit überlagerten Orthophotos

In Teilbereichen, wie z.B. bei den sich im Bühnenfeld befindenden Messpfählen treten Probleme durch Verdeckungen und Schattenbildung auf. Diese konnten durch die Definition von Aussparungsflächen behoben werden.

Die Auswertung des gesamten Bühnenfelds geschieht durch die Kombination der zwei sich überlappenden Stereomodelle zu einem Gesamtmodell. Im Überlappungsbereich werden sowohl die Höhen des Oberflächenmodells als auch die Grauwerte der Orthophotos gemittelt.

Abbildung 5-5 zeigt das Oberflächenmodell des gesamten Bühnenfelds vom 15.05.2003 um 10:03:46 Uhr MEZ. Das Oberflächenmodell hat eine Größe von ca. 180 x 190 m<sup>2</sup>.

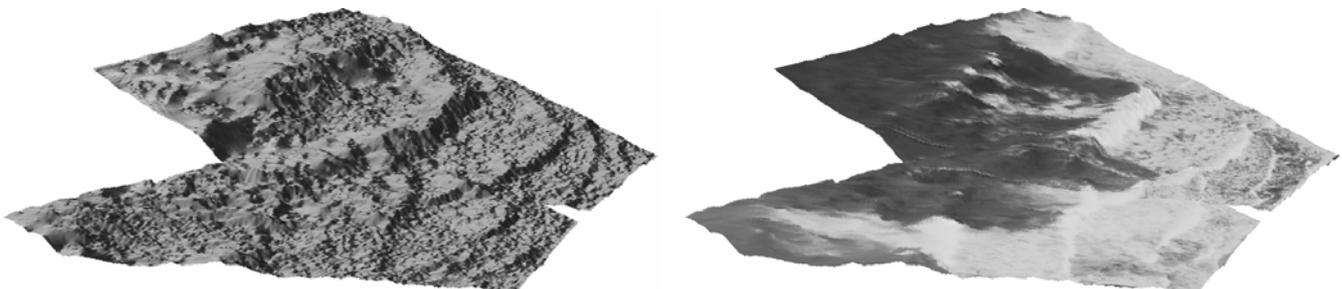


Abbildung 5-5: Gesamtes Bühnenfeld, links: Oberflächenmodell, rechts: mit überlagerten Orthophotos

### 5.3 Erstellung eines Referenzmodells

Zur Bewertung der automatisch abgeleiteten Oberflächenmodelle wurden für mehrere stichprobenartig gewählte Zeitpunkte unabhängige manuelle Kontrollmessungen in Stereo durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten an der Image-Station Z4 von Z/I Imaging. Die äußeren und inneren Orientierungen der Kameras wurden zum besseren Vergleich aus der automatischen Auswertung unverändert übernommen. Die manuelle Messung der Oberfläche wurde in einem regelmäßigen Raster durchgeführt.

Die digitale photogrammetrische Arbeitsstation ist für die Auswertung von Luft- und Satellitenbildern, wie z.B. zur automatischen Oberflächenableitung, der Generierung von Orthophotos oder der Orientierung von Bildverbänden, konzipiert. Aus diesem Grund mussten die äußeren Orientierungen für die manuelle Auswertung an der ImageStation Z4 durch Drehung und Translation in den genäherten Luftbildfall transformiert werden, so dass die optischen Achsen der Kameras etwa parallel zur Z-Achse des Zielkoordinatensystems verlaufen. Dadurch liegt die Wasseroberfläche nicht mehr parallel zur XY-Ebene des Zielkoordinatensystems sondern schräg im Raum. Zum anschließenden Vergleich mit der automatischen Messung wurden die manuell gemessenen Punkte, die in der XY-Ebene des Zielkoordinatensystems regelmäßig angeordnet waren, in das Ausgangskordinatensystem zurück transformiert. Aufgrund der Rücktransformation liegen die gemessenen Objektkoordinaten in einem ungleichförmigen Raster vor.

### 5.3.1 Transformationsbeziehungen

Eine räumliche Ähnlichkeitstransformation dient der formtreuen Transformation eines dreidimensionalen kartesischen XYZ-Koordinatensystems in ein entsprechendes Zielkoordinatensystem  $X'Y'Z'$ . Bei der Transformation der manuell gemessenen Objektkoordinaten wurden wie bei der Transformation der äußeren Orientierungen nur die Translations- und Rotationsparameter angewendet. Ein im XYZ-Koordinatensystem gegebener Punkt lässt sich nach Gleichung (5.3) mit der Rotationsmatrix  $R$  und unter Berücksichtigung der Translationsparameter  $X_0, Y_0, Z_0$  in das  $X'Y'Z'$ -Koordinatensystem transformieren.

$$(X', Y', Z') = (X_0, Y_0, Z_0) + R \cdot (X, Y, Z) \quad (5.3)$$

mit

- $X, Y, Z$  : Objektkoordinaten
- $X', Y', Z'$  : transformierte Objektkoordinaten
- $X_0, Y_0, Z_0$  : Translationsparameter
- $R$  : Rotationsmatrix

### 5.3.2 Beschreibung der Referenzmessung und Genauigkeitsabschätzung

Die Referenzmodelle wurden jeweils doppelt mit einer Gitterweite von 2.5 m gemessen. Nach der Transformation in das Ausgangskordinatensystem entspricht dies einer Gitterweite von ca. 2.5 m in X-Richtung und ca. 12.8 m in Y-Richtung. Dies hat zur Folge, dass bei einer angenommenen Wellenlänge von 29.5 m die Form einer einzelnen Welle nicht erfasst werden kann. Auf die weitere Analyse der Ergebnisse hat dies jedoch keinen Einfluss, da nur ein punktwiser Vergleich durchgeführt wird. Pro Referenzmodell wurden ca. 690 Punkte manuell bestimmt. Die Anzahl der gemessenen Punkte wird für die weiteren Analysen als ausreichend angesehen.

Die Beleuchtungsverhältnisse variierten während der Datenerfassung der Bildsequenz beträchtlich. Es war stark bewölkt mit einzelnen sonnigen Abschnitten. Da die Parameter von Blende und Belichtungszeit für den Zeitraum der Bildaufnahme konstant gewählt wurden, sind die Stereomodelle der Bildsequenz teilweise sehr dunkel bzw. sehr hell. Einzelne Objektpunkte konnten wegen gerichteter Reflexionen auf der Wasseroberfläche gar nicht gemessen werden. Im hinteren Wellenbereich am äußeren Gebietsrand war aufgrund fehlender Grauwertstrukturen eine Punktzuordnung häufig problematisch und im Bereich von Verdeckungen gar nicht möglich.

Zur Beurteilung der Genauigkeit werden die Doppelmessungen herangezogen. Es wird angenommen, dass die Messreihen mit der gleichen Genauigkeit bestimmt werden konnten. Der Erwartungswert der Differenz der Messreihen ist daher Null. Die Standardabweichung der Differenz  $s_{\text{Differenz}}$  ergibt sich zu:

$$s_{\text{Differenz}} = \sqrt{\frac{\sum (x_{1_i} - x_{2_i})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (5.4)$$

mit

- $x_{1_i}$  : Messwerte der ersten Messreihe
- $x_{2_i}$  : Messwerte der zweiten Messreihe
- $d_i$  : Differenzen der Messreihen
- $n$  : Anzahl der Messwerte

Die Standardabweichung des Einzelwerts berechnet sich entsprechend zu:

$$s_{\text{Einzel}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}} \quad (5.5)$$

Die Differenz zwischen den durchgeführten manuellen Doppelmessungen beträgt im Durchschnitt 7.2 cm mit einer Standardabweichung der Differenz von 22.5 cm bzw. des Einzelwerts von 15.9 cm. Dies entspricht bei einer Aufnahmeentfernung von 200 m einer Messgenauigkeit  $\sigma_0$  von 2.1 Pixel bzw. 1.5 Pixel. Die Genauigkeit der manuellen Messung liegt geringfügig über den abgeschätzten Genauigkeiten (siehe Tabelle 4-1). Jedoch ist die Genauigkeit der manuellen Messung ausreichend um diese im Weiteren als Referenzmessung zur Beurteilung der automatischen Bildzuordnung zu nutzen.

## 6 Analyse der Ergebnisse

Im Folgenden wird die erreichte innere Genauigkeit des Verfahrens durch den Vergleich der Ergebnisse von drei automatischen Auswertungen einer Bildsequenz unter Verwendung gleicher Steuerungsparameter, aber mit unterschiedlichen Startpunkten bestimmt. Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit und Zuverlässigkeit der ermittelten Wasseroberflächen werden unabhängige Vergleichsmessungen herangezogen.

### 6.1 Innere Genauigkeit

Zur Beurteilung der inneren Genauigkeit der Bildsequenzbewertung wurden Wiederholungsmessungen mit drei unterschiedlichen Datensätzen manuell gemessener Startpunkte durchgeführt. Die Startpunkte sind flächenhaft über das auszuwertende Gebiet verteilt. Im Durchschnitt enthält jeder dieser Datensätze ca. 120 Startpunkte. Die Bildzuordnung erfolgte für jeden Datensatz mit den in Kapitel 5.1 angegebenen Steuerungsparametern für 300 Bilder einer Sequenz mit gleicher innerer und äußerer Orientierung. Das Ergebnis sind drei separat erzeugte Oberflächenmodelle für jeden Zeitpunkt der ausgewerteten Sequenz.

#### 6.1.1 Bewertung der Differenzmodelle

Für sieben stichprobenartig gewählte Zeitpunkte wurden Differenzmodelle aus den automatisch bestimmten Oberflächenmodellen gebildet. Abbildung 6-1 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Differenzmodelle der Oberflächenmodelle 1/2 und 1/3 vom 15.05.2003 um 10:04:05 Uhr MEZ sowie das zugehörige Orthophoto.

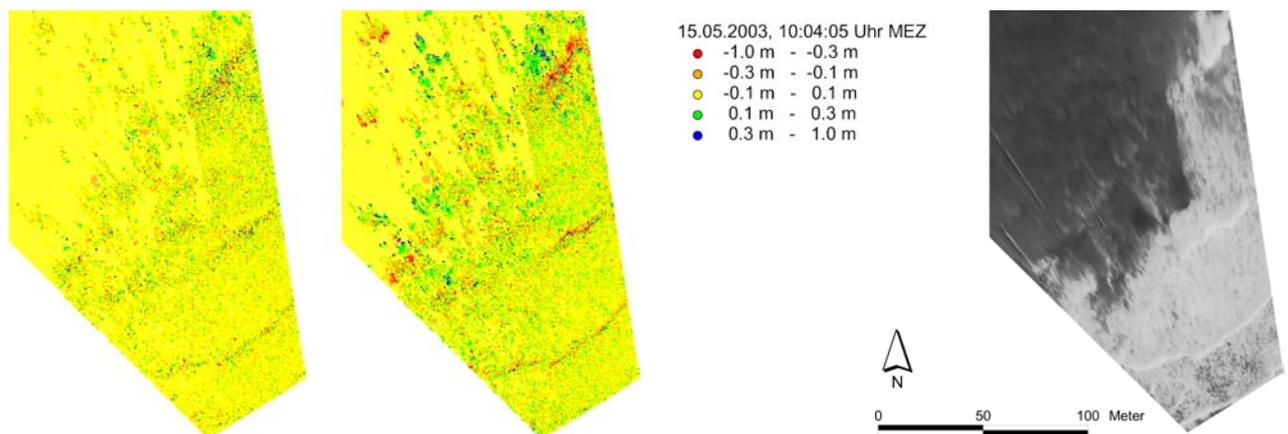


Abbildung 6-1: Differenzmodelle 1/2 und 1/3 vom 15.05.2003, 10:04:05 Uhr MEZ mit zugehörigem Orthophoto

In den Differenzmodellen sind erwartungsgemäß in den Bereichen der brechenden Wellen lineare Strukturen zu erkennen. Diese lokalen Abweichungen entstehen zum einen aufgrund der teilweise nicht eindeutigen Zuordnung innerhalb der Gicht. Zum anderen kann in diesen Bereichen durch die flächenhafte Ausbreitung des Algorithmus eine unterschiedliche Annäherung an die Wasseroberfläche erfolgen.

In Tabelle 6-1 sind die Mittelwerte der Differenzmodelle 1/2 und 1/3 vom 15.05.2003 um 10:04:05 Uhr MEZ sowie die Standardabweichungen der Differenz und des Einzelwerts, berechnet nach Formel (5.4) und (5.5), aufgeführt.

	Differenzmodell 1/2	Differenzmodell 1/3
Anzahl Beobachtungen $n$	93198	113794
Mittelwert $\bar{d}$	0.1 cm	0.3 cm
Stdabw. der Differenz $s_{Differenz}$	9.9 cm	12.1 cm
Stdabw. des Einzelwerts $s_{Einzel}$	7.0 cm	8.6 cm

Tabelle 6-1: Beschreibende Statistik für die Differenzmodelle 1/2 und 1/3 vom 15.05.2003, 10:04:05 Uhr MEZ

Für die Differenzmodelle der sieben ausgewählten Zeitpunkte liegt die Höhendifferenz im Mittel bei 0.3 cm, die Standardabweichung der Differenz bei 11.4 cm und die des Einzelwerts bei 8.1 cm. Im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Differenzmodellen festgestellt werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich unterschiedliche Startpunkte nicht negativ auf das Ergebnis auswirken.

### 6.1.2 Problembereiche

Schwierigkeiten treten bei Verdeckungen, in texturarmen Regionen und bei gerichteten Reflexionen an der Wasseroberfläche auf. Abbildung 6-2 zeigt ein Beispiel für die Grenzen des Verfahrens. In der rechten Hälfte der Abbildung 6-2 sind die automatisch bestimmten Objektpunkte für den 15.05.2003 um 13:00:35 Uhr MEZ dargestellt, links ist das entsprechende Orthophoto zu sehen. Die zugehörigen Bilder der Sequenz sind Abbildung 5-2 zu entnehmen.

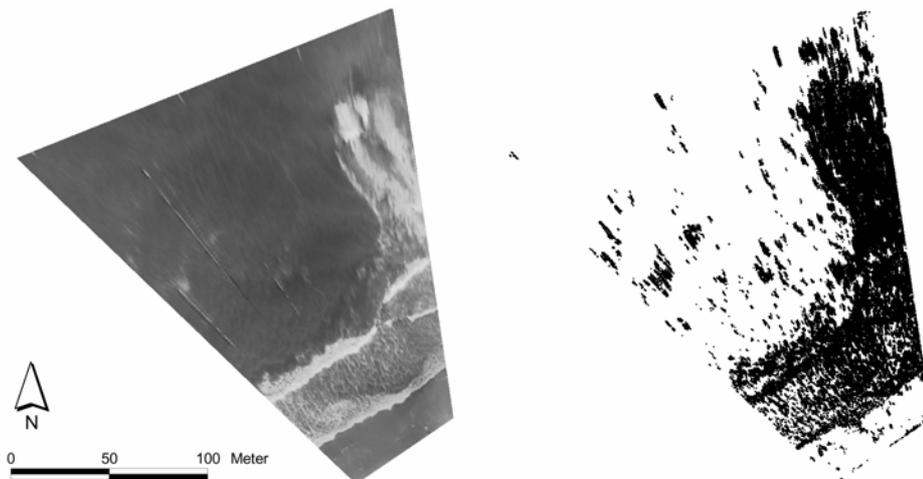


Abbildung 6-2: Grenzen des Verfahrens, links: zugehöriges Orthophoto, rechts: automatisch bestimmte Objektpunkte (schwarz: Zuordnung erfolgreich, weiß: Zuordnung nicht erfolgreich)

Anhand der Verteilung der automatisch bestimmten Objektpunkte im rechten Teil der Abbildung 6-2 lässt sich deutlich erkennen, dass im linken oberen Bereich des Modells nur sehr wenige Punkte automatisch bestimmt werden konnten. Der entsprechende Bereich im Orthophoto weist eine sehr kontrastschwache Textur auf. In diesem Bereich kann das Verfahren keine korrespondierenden Punkte für eine automatische Oberflächenbestimmung ermitteln.

## 6.2 Äußere Genauigkeit

Zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit werden die durchgeführten Seegangsmessungen, die in Kapitel 5.3 beschriebenen manuellen Messungen sowie die automatischen Messungen miteinander verglichen. Dazu werden alle Messungen in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert. Aufgrund der Registrierung der exakten Zeitpunkte der Bilderfassungen und der Seegangsmessungen kann ein Zeitbezug zwischen den verschiedenen Messsystemen hergestellt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der automatischen Bildzuordnung sowohl mit den manuellen

Messungen als auch mit den Seegangsmessungen überprüft. Zuerst erfolgt der flächenhafte statische Vergleich zu diskreten Zeitpunkten mit den manuellen Messungen und anschließend der dynamische Vergleich für einzelne Punkte über einen längeren Zeitraum mit den Seegangsmessungen.

### 6.2.1 Flächenhafte statische Verifizierung

Zur flächenhaften statischen Verifizierung der digitalen Bildzuordnung werden die automatisch abgeleiteten Oberflächenmodelle stichprobenartig den manuellen Kontrollmessungen gegenüber gestellt. Bei den manuellen Messungen wurde jeweils der Mittelwert der Doppelmessungen verwendet. Das Ergebnis sind die Höhendifferenzen aus manueller und automatischer Messung. Zur statistischen Bewertung der Höhendifferenzen wird davon ausgegangen, dass keine systematischen Fehler vorliegen. Unter dieser Annahme sind die Höhendifferenzen nur noch mit zufälligen Fehlern behaftet und somit normalverteilt.

Abbildung 6-3 zeigt Orthophotos des halben Bühnfelds zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit überlagerten Höhendifferenzen aus manueller und automatischer Messung sowie die entsprechenden Histogramme mit den relativen Häufigkeiten der Höhendifferenzen. Zur Bewertung der Genauigkeit der automatischen Messung werden im Folgenden die Höhendifferenzen nur an den Stellen bestimmt, an denen sowohl Objektpunkte der manuellen als auch der automatischen Messung vorliegen.

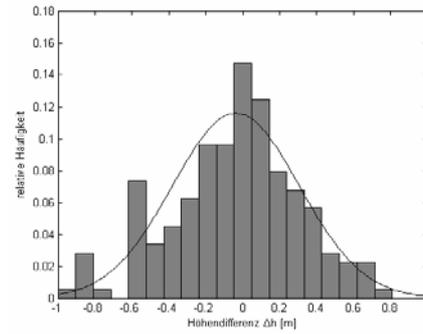
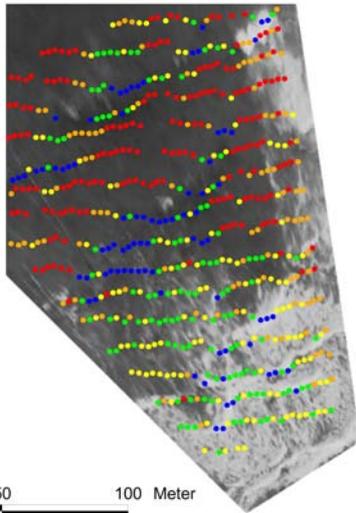
In Abbildung 6-3 sind des Weiteren zu jeder Häufigkeitsverteilung die Anzahl der Beobachtungen  $n$ , die Werte  $g_1$  und  $g_2$  für Schiefe und Exzess, die mittlere Differenz  $\bar{d}$ , die Standardabweichung der Differenz  $s_{Differenz}$  sowie die Standardabweichung unter Berücksichtigung des Mittelwerts  $s_{Mittel}$  aufgeführt. Die Standardabweichung der Differenz unter Berücksichtigung des Mittelwerts wird nach Formel (6.1) berechnet.

$$s_{Mittel} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

Zum visuellen Vergleich sind in den Histogrammen der Abbildung 6-3 zusätzlich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Normalverteilung als durchgezogene Linien dargestellt.

15.05.2003, 10:05:51 Uhr MEZ

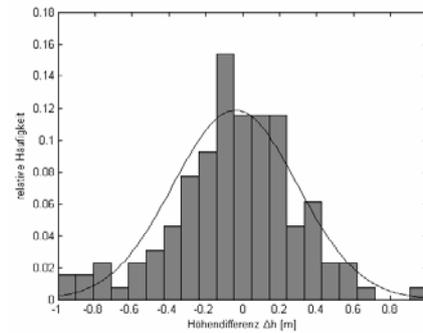
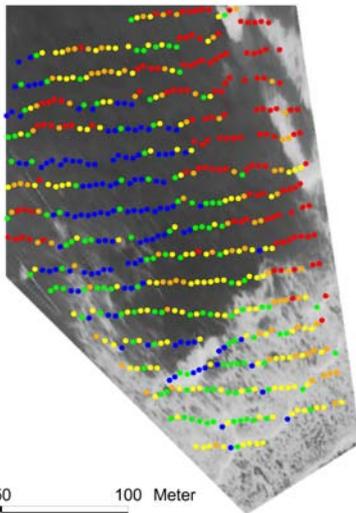
- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:05:51 \text{ Uhr}} = 177$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:05:51 \text{ Uhr}} = -3.7 \text{ cm}$   
 Stdbw. der Differenz:  $s_{\text{Differenz}_{10:05:51 \text{ Uhr}}} = 34.6 \text{ cm}$   
 Stdbw. mit Mittelwert:  $s_{\text{Mittel}_{10:05:51 \text{ Uhr}}} = 34.5 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{10:05:51 \text{ Uhr}} = -0.28$   
 Exzess:  $g_{2_{10:05:51 \text{ Uhr}}} = -0.06$

15.05.2003, 10:07:57 Uhr MEZ

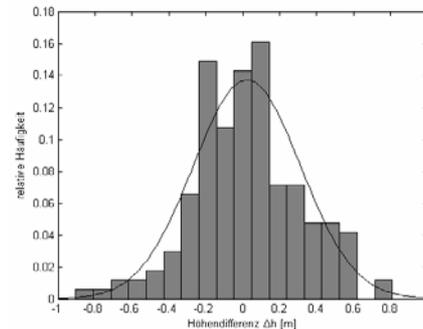
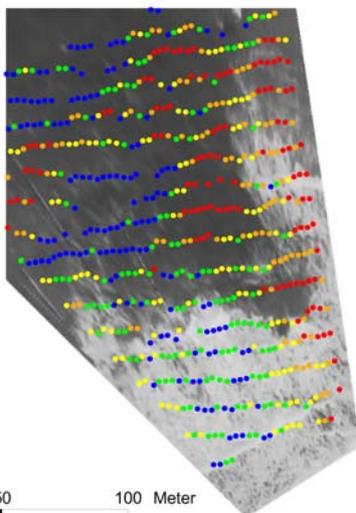
- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:07:57 \text{ Uhr}} = 130$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:07:57 \text{ Uhr}} = -4.0 \text{ cm}$   
 Stdbw. der Differenz:  $s_{\text{Differenz}_{10:07:57 \text{ Uhr}}} = 33.7 \text{ cm}$   
 Stdbw. mit Mittelwert:  $s_{\text{Mittel}_{10:07:57 \text{ Uhr}}} = 33.6 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{10:07:57 \text{ Uhr}} = -0.30$   
 Exzess:  $g_{2_{10:07:57 \text{ Uhr}}} = 0.64$

15.05.2003, 10:10:02 Uhr MEZ

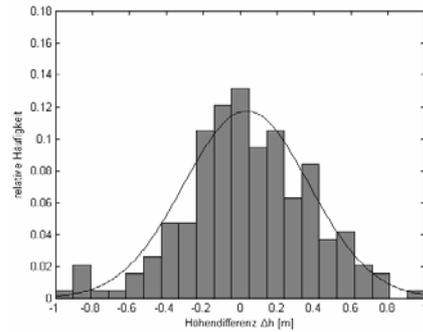
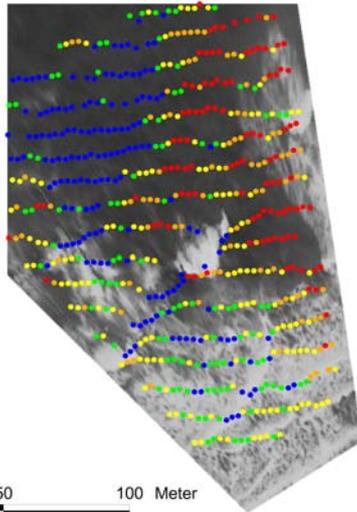
- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:10:02 \text{ Uhr}} = 168$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:10:02 \text{ Uhr}} = 2.3 \text{ cm}$   
 Stdbw. der Differenz:  $s_{\text{Differenz}_{10:10:02 \text{ Uhr}}} = 29.1 \text{ cm}$   
 Stdbw. mit Mittelwert:  $s_{\text{Mittel}_{10:10:02 \text{ Uhr}}} = 29.1 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{10:10:02 \text{ Uhr}} = -0.02$   
 Exzess:  $g_{2_{10:10:02 \text{ Uhr}}} = 0.10$

15.05.2003, 10:12:08 Uhr MEZ

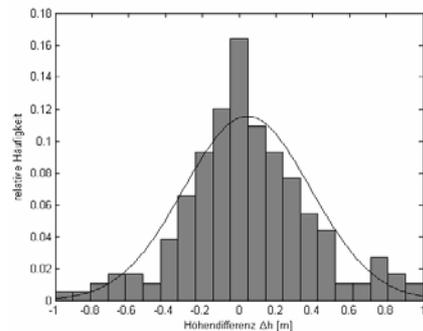
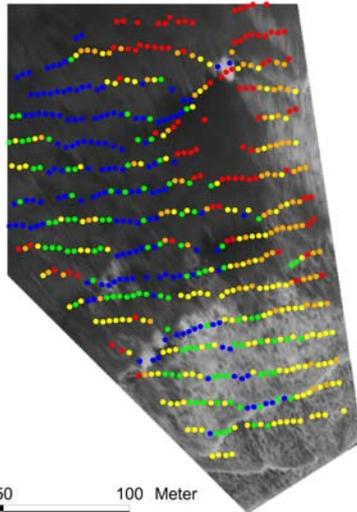
- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:12:08 \text{ Uhr}} = 190$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:12:08 \text{ Uhr}} = 3.5 \text{ cm}$   
 Stdabw. der Differenz:  $s_{Differenz_{10:12:08 \text{ Uhr}}} = 34.1 \text{ cm}$   
 Stdabw. mit Mittelwert:  $s_{Mittel_{10:12:08 \text{ Uhr}}} = 34.0 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{1_{10:12:08 \text{ Uhr}}} = -0.22$   
 Exzess:  $g_{2_{10:12:08 \text{ Uhr}}} = 0.29$

15.05.2003, 10:14:13 Uhr MEZ

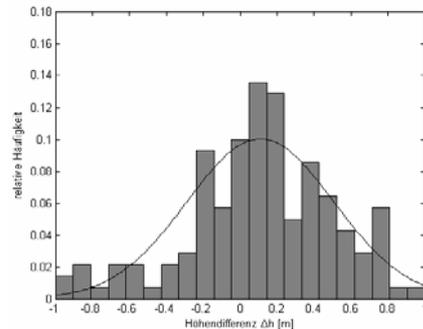
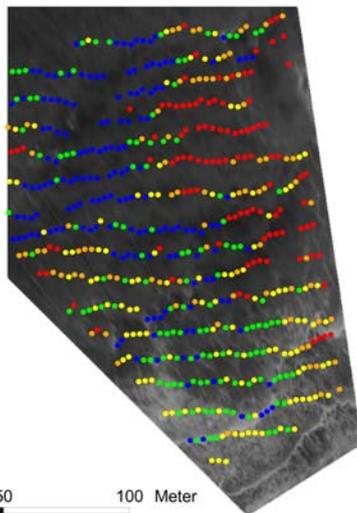
- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:14:13 \text{ Uhr}} = 153$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:14:13 \text{ Uhr}} = 4.5 \text{ cm}$   
 Stdabw. der Differenz:  $s_{Differenz_{10:14:13 \text{ Uhr}}} = 34.8 \text{ cm}$   
 Stdabw. mit Mittelwert:  $s_{Mittel_{10:14:13 \text{ Uhr}}} = 34.6 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{1_{10:14:13 \text{ Uhr}}} = 0.15$   
 Exzess:  $g_{2_{10:14:13 \text{ Uhr}}} = 0.69$

15.05.2003, 10:16:19 Uhr MEZ

- -1.0 m - -0.3 m
- -0.3 m - -0.1 m
- -0.1 m - 0.1 m
- 0.1 m - 0.3 m
- 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:16:19 \text{ Uhr}} = 140$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:16:19 \text{ Uhr}} = 10.9 \text{ cm}$   
 Stdabw. der Differenz:  $s_{Differenz_{10:16:19 \text{ Uhr}}} = 41.2 \text{ cm}$   
 Stdabw. mit Mittelwert:  $s_{Mittel_{10:16:19 \text{ Uhr}}} = 39.8 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{1_{10:16:19 \text{ Uhr}}} = -0.46$   
 Exzess:  $g_{2_{10:16:19 \text{ Uhr}}} = 0.19$

Abbildung 6-3: Orthophotos mit überlagerten Höhendifferenzen und relative Häufigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Die mittlere Höhendifferenz der DOMs liegt bei 2.3 cm, die Standardabweichung der Differenz der Höhenwerte ergibt sich im Mittel zu 34.6 cm bzw. unter Berücksichtigung des Mittelwerts zu 34.3 cm. Diese Werte können über die Zeit als konstant betrachtet werden. Die zusätzliche Berücksichtigung des Mittelwerts bei der Berechnung der Standardabweichung ergibt keinen signifikanten Unterschied.

Für die Kenngrößen  $g_1$  und  $g_2$  der Höhendifferenzen (siehe Kapitel 2.2.1) werden Signifikanztests mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0.05$  und einem Quantil von 1.96 durchgeführt. In fast allen Fällen wird die Testregel nicht erfüllt, d.h. die Höhendifferenzen sind nicht signifikant von Null verschieden (siehe Tabelle 6-2). Für den Zeitpunkt 15.05.2003 um 10:16:19 Uhr MEZ liegt die Testgröße für  $g_1$  mit 2.21 knapp über dem Quantil. Für diesen Zeitpunkt liegt eine signifikante Schiefe vor, die jedoch auf Ausreißer zurückzuführen ist.

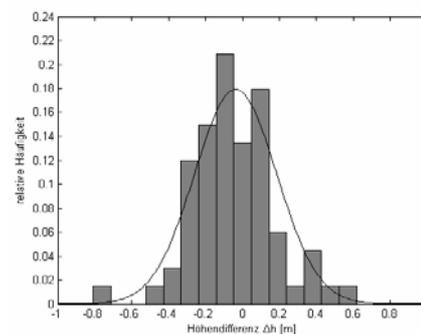
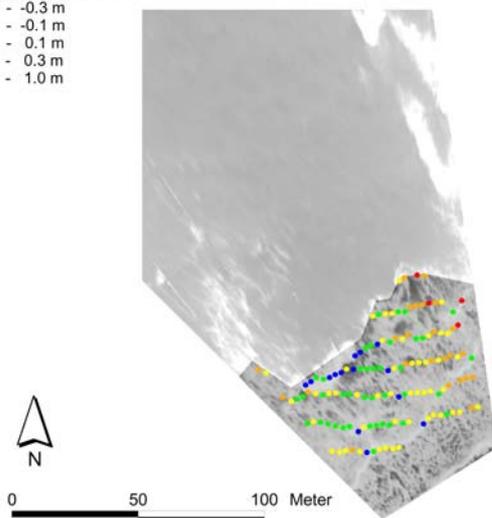
Messung	Testgröße für Schiefe	Testgröße für Exzess
15.05.2003, 10:05:51 Uhr MEZ	1.52	0.17
15.05.2003, 10:07:57 Uhr MEZ	1.40	1.49
15.05.2003, 10:10:02 Uhr MEZ	0.09	0.26
15.05.2003, 10:12:08 Uhr MEZ	1.22	0.80
15.05.2003, 10:14:13 Uhr MEZ	0.81	1.90
15.05.2003, 10:16:19 Uhr MEZ	2.21	0.45

Tabelle 6-2: Testgrößen für Schiefe und Exzess, statische Verifizierung

Die Größe der Differenzen zwischen manueller und automatischer Auswertung ist von der vorhandenen Textur der Oberfläche abhängig. Bei Oberflächen mit kontrastreichen Kleinformen, wie z.B. im Bereich der Brandungszone wurden gute Ergebnisse erzielt. Probleme treten bei Verdeckungen und im äußeren seewärtigen Bereich auf, da die Oberfläche in diesem Bereich nur einen geringen Grauwertkontrast aufweist.

Für die Sequenz vom 15.05.2003 zum Zeitpunkt 10:07:57 Uhr MEZ wurde exemplarisch in einer zusätzlichen Auswertung die Genauigkeitsabschätzung auf Bereiche mit visuell guter Textur beschränkt. In Abbildung 6-4 ist das Orthophoto mit den Höhendifferenzen und die zugehörigen relativen Häufigkeiten, die Anzahl der Beobachtungen, der Mittelwert, die Standardabweichung der Differenz, die Standardabweichung unter Berücksichtigung des Mittelwerts, die Schiefe und der Exzess dargestellt. Dieser Zeitpunkt ist identisch zu der zweiten Graphik in Abbildung 6-3.

15.05.2003, 10:07:57 Uhr MEZ  
 ● -1.0 m - -0.3 m  
 ● -0.3 m - -0.1 m  
 ● -0.1 m - 0.1 m  
 ● 0.1 m - 0.3 m  
 ● 0.3 m - 1.0 m



Anzahl Beobachtungen:  $n_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}} = 67$   
 Mittelwert:  $\bar{d}_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}} = -3.7 \text{ cm}$   
 Stdabw. der Differenz:  $S_{\text{Differenz}_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}}} = 22.4 \text{ cm}$   
 Stdabw. mit Mittelwert:  $S_{\text{Mittel}_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}}} = 22.3 \text{ cm}$   
 Schiefe:  $g_{1_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}}} = 0.16$   
 Exzess:  $g_{2_{10:07:57 \text{ Uhr, Ausschnitt}}} = 1.06$

Abbildung 6-4: Orthophoto mit überlagerten Höhendifferenzen und relative Häufigkeiten für gewählten Ausschnitt

Die mittlere Höhendifferenz des Ausschnitts des Oberflächenmodells liegt bei -3.7 cm, die Standardabweichung der Höhendifferenz bei 22.4 cm bzw. unter Berücksichtigung des Mittelwerts bei 22.3 cm. Dies entspricht bei einer Aufnahmeentfernung von 200 m einer Messgenauigkeit  $\sigma_0$  von 2.1 Pixel. Die Berücksichtigung des Mittelwerts zeigt keine signifikante Verbesserung. Das Ergebnis des Signifikanztests der Höhendifferenzen ergibt eine Testgröße für die Schiefe von 0.52 und für den Exzess von 1.77. Somit liegt bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0.05$  und einem Quantil von 1.96 weder ein signifikanter Exzess noch eine signifikante Schiefe vor, d.h. die Werte können weiterhin als normalverteilt angenommen werden.

Durch die Beschränkung der Auswertung auf Bereiche mit visuell guter Textur, verbessern sich beim Vergleich des manuell und des automatisch bestimmten Oberflächenmodells die Standardabweichung der Differenz und die Standardabweichung der Differenz unter Berücksichtigung des Mittelwerts deutlich um mehr als 10 cm bzw. ca. 35 %. Der Mittelwert verbessert sich um 0.3 cm. Demnach treten große Höhendifferenzen fast ausschließlich in Bereichen mit schlechter Textur auf. Auf die mittlere Abweichung zwischen manueller und automatischer Auswertung wirkt sich die Reduzierung des ausgewerteten Bereichs kaum aus. In den texturschwachen Bereichen liegen somit keine systematischen Verfälschungen vor.

Die Genauigkeit der Ergebnisse der Höhendifferenzen bei reduzierter Gebietsgröße ist nahezu identisch mit der Genauigkeit der manuellen Referenzmessung. Für weitergehende Analysen müsste demnach ein Referenzmodell mit höherer Genauigkeit herangezogen werden, welches jedoch nicht vorliegt. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass für den Vergleich die manuellen Messungen als fehlerfrei angenommen wurden.

### 6.2.2 Punktförmige dynamische Verifizierung

Die meisten Verfahren zur Messung des Seegangs liefern die Wellenhöhe und Wellenperiode. Durch die kontinuierliche punktuelle Messung der Änderungen des Wasserspiegels kann die Darstellung der Welle als Funktion der Zeit erfolgen. Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 zeigen den Vergleich von automatischer Messung mit den registrierten Messwerten des Wellenmessdrahts WD1 und den Messwerten der Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 über die Zeit. Der Wellenmessdraht WD1 befindet sich in der Mitte des Bühnenfelds und die Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 im Strandbereich (siehe Abbildung 4-1). In Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 sind unterschiedliche Ausschnitte von jeweils 640 Bildern der ausgewerteten Sequenz von 7 000 Bildern dargestellt. 640 Bilder entsprechen bei einer Frequenz von 8 Hz einer Aufnahmezeit von 80 s. Die Abtastung der Höhenwerte erfolgte am Wellenmessdraht und der Geschwindigkeits-Druck-Sonde mit einer Frequenz von 5 Hz. Die Wasserspiegelauslenkungen sind jeweils auf die entsprechende mittlere Wellenhöhe und die Aufnahmefrequenz des Wellenmessdrahts bzw. der Geschwindigkeits-Druck-Sonde bezogen. Die automatischen Messungen wurden entsprechend interpoliert.

Trotz intensiver Recherche bei verschiedenen Institutionen konnten keine gesicherten Genauigkeitsangaben für den Wellenmessdraht und die Geschwindigkeits-Druck-Sonde in Erfahrung gebracht werden. Die Standardabweichungen des Wellenmessdrahts und der Geschwindigkeits-Druck-Sonde werden daher als im Dezimeterbereich liegend angenommen.

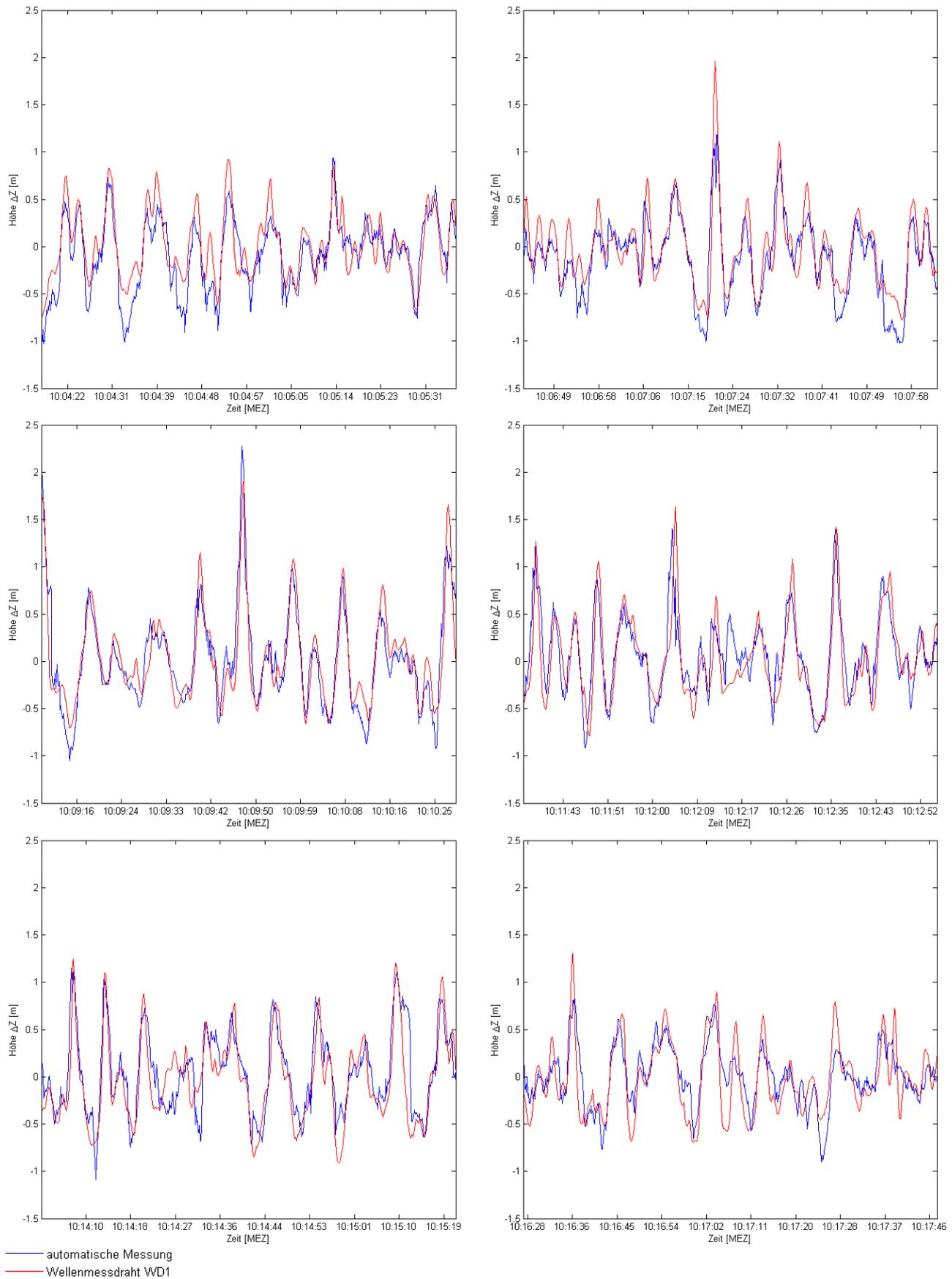


Abbildung 6-5: Vergleich Wellenmessdraht WD1 und automatische Messung

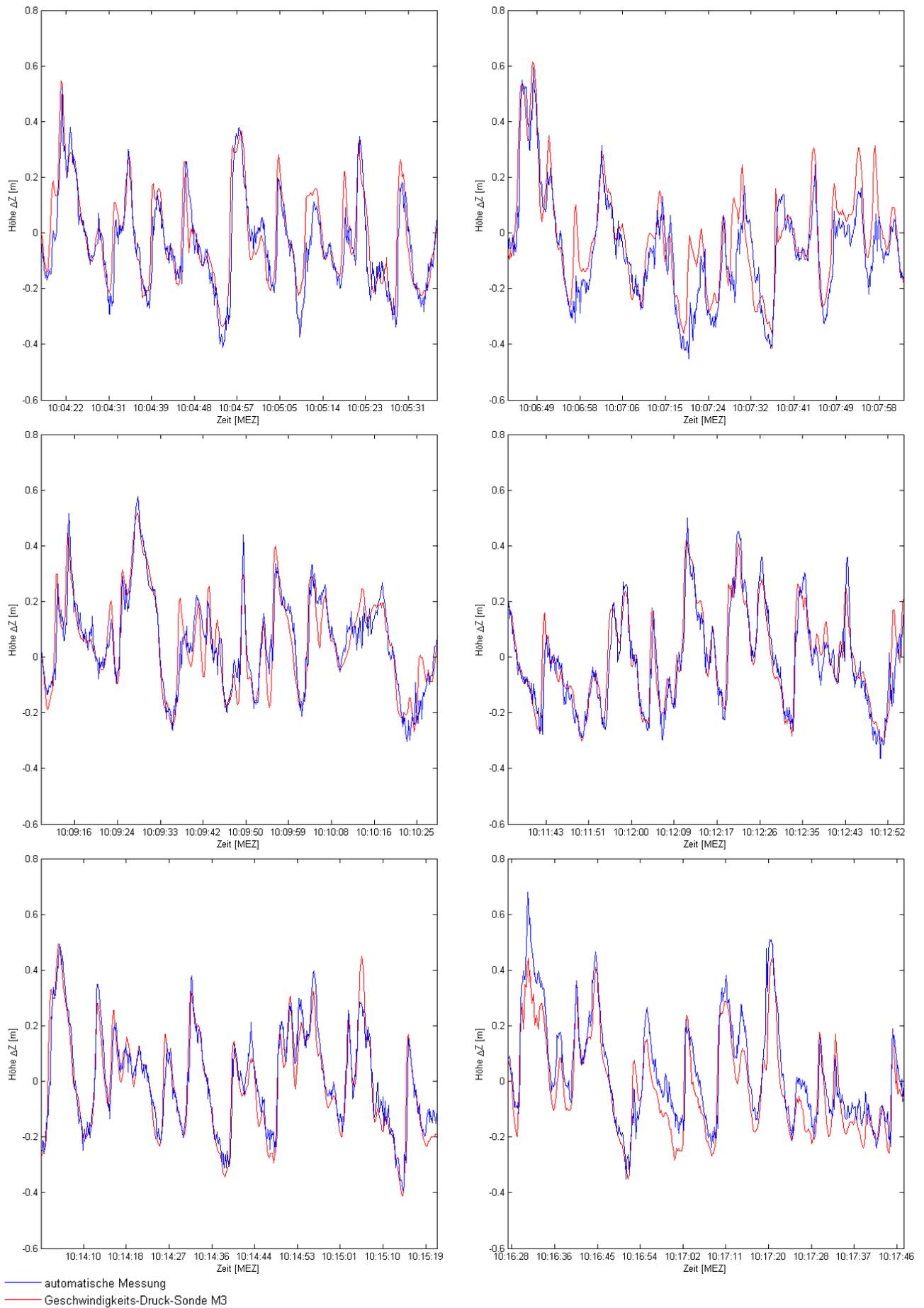
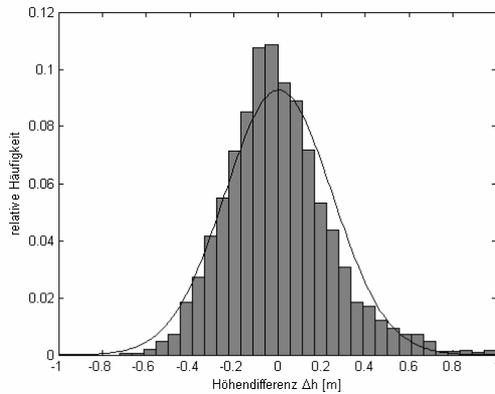


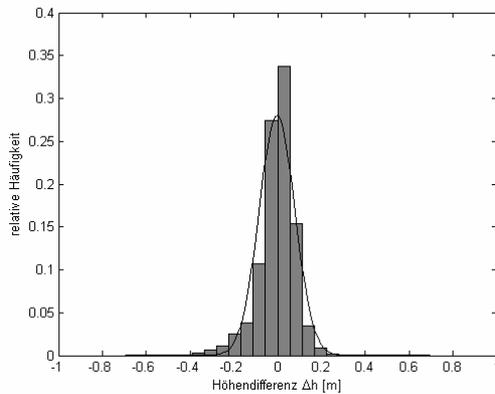
Abbildung 6-6: Vergleich Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 und automatische Messung

Die relativen Häufigkeiten der Höhendifferenzen der gesamten Sequenz, die Anzahl der Beobachtungen, die Standardabweichung der Differenz sowie die Schiefe und der Exzess sind für den Wellenmessdraht Abbildung 6-7 bzw. für die Geschwindigkeits-Druck-Sonde Abbildung 6-8 zu entnehmen.



Anzahl Beobachtungen:	$n_{\text{WD1}} = 4375$
Stdabw. der Differenz:	$s_{\text{Differenz}_{\text{WD1}}} = 24.6 \text{ cm}$
Schiefe:	$g_{1_{\text{WD1}}} = 0.64$
Exzess:	$g_{2_{\text{WD1}}} = 1.74$

Abbildung 6-7: Relative Häufigkeiten der Höhendifferenzen zwischen Wellenmessdraht WD1 und automatischer Messung



Anzahl Beobachtungen:	$n_{\text{M3}} = 4375$
Stdabw. der Differenz:	$s_{\text{Differenz}_{\text{M3}}} = 8.1 \text{ cm}$
Schiefe:	$g_{1_{\text{M3}}} = -0.80$
Exzess:	$g_{2_{\text{M3}}} = 3.53$

Abbildung 6-8: Relative Häufigkeiten der Höhendifferenzen zwischen Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 und automatischer Messung

Die Höhendaten aus den Seegangsmessungen stimmen im Allgemeinen mit den Ergebnissen der automatischen Messung überein. Die Geschwindigkeits-Druck-Sonde hat eine geringere Wasserspiegelauslenkung als der Wellenmessdraht. Aus dem Vergleich mit dem Wellenmessdraht ergibt sich für die Höhendifferenz eine Standardabweichung von 24.6 cm. Für den Vergleich mit der Geschwindigkeits-Druck-Sonde liegt die Standardabweichung der Höhendifferenz bei 8.1 cm. Bei der Überprüfung der Höhendifferenzen auf Normalverteilung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0.05$  bei einem Quantil von 1.96 ergibt sich in beiden Fällen eine signifikante Schiefe und ein signifikanter Exzess (siehe Tabelle 6-3). Der Exzess ist in beiden Fällen positiv, die Schiefe bei der Geschwindigkeits-Druck-Sonde negativ und beim Wellenmessdraht positiv.

Messung	Testgröße für Schiefe	Testgröße für Exzess
WD1	17.28	23.54
M3	21.66	47.65

Tabelle 6-3: Testgrößen für Schiefe und Exzess, dynamische Verifizierung

Ein positiver Exzess entsteht, wenn z.B. die Verteilung einer Stichprobe eine Mischung von normalverteilten Grundgesamtheiten mit gleichem Mittelwert aber ungleichen Standardabweichungen darstellt. Dies kann darauf zurückgeführt

werden, dass teilweise automatisch bestimmte und teilweise aus der automatischen Messung interpolierte Werte für die Berechnung der Höhendifferenzen genutzt wurden.

Bei Vorliegen einer negativen Schiefe sind in der Regel die lokalen Minima als spitze Peaks ausgeprägt, während die lokalen Maxima meist mehrere Werte umfassen. Dieses Phänomen ist bei den Höhendifferenzen zwischen Geschwindigkeits-Druck-Sonde und automatischer Messung, bei denen eine negative Schiefe vorliegt, zu beobachten (siehe Abbildung 6-9). Ein entsprechend umgekehrtes Phänomen ist bei den Differenzen zwischen Wellenmessdraht und automatischer Messung, die eine positive Schiefe aufweisen, nicht zu erkennen (siehe Abbildung 6-10).

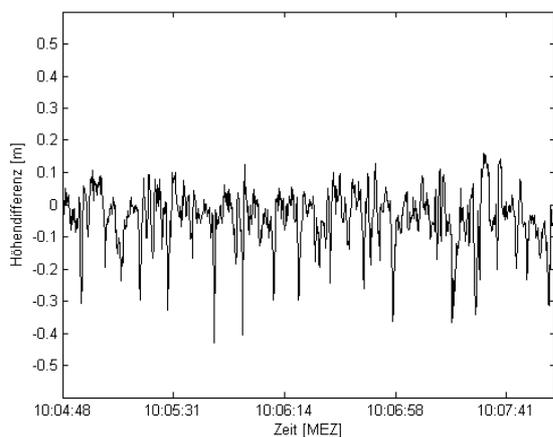


Abbildung 6-9: Höhendifferenzen zwischen Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 und automatischer Messung

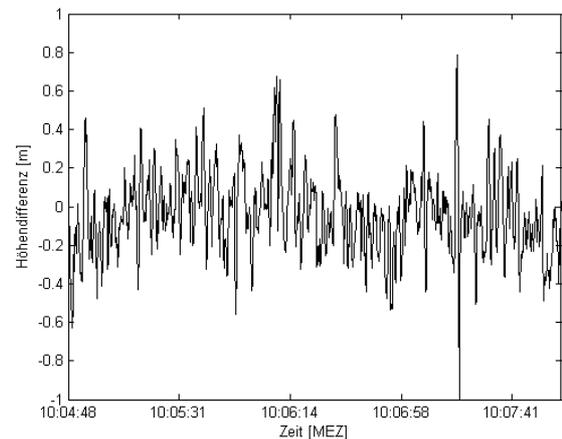


Abbildung 6-10: Höhendifferenzen zwischen Wellenmessdraht WD1 und automatischer Messung

Beim Vergleich der automatischen Messung und den registrierten Daten des Wellenmessdrahts treten im Bereich von Wellentälern und von einzelnen brechenden Wellen Abweichungen von mehreren Dezimetern auf (siehe Abbildung 6-5). Zur genaueren Analyse der Differenzen zwischen den Messungen des Wellenmessdrahts und der automatischen Messung wurden mehrere Zeitpunkte untersucht. Exemplarisch sind in Abbildung 6-11 neben den Höhenwerten des Wellenmessdrahts und der automatischen Messung die Bildinformationen zu den Zeitpunkten  $T_1$  um 10:04:09 Uhr MEZ und  $T_2$  um 10:04:24 Uhr MEZ dargestellt. Die Höhendifferenz beträgt 31 cm zum Zeitpunkt  $T_1$  bzw. 9 cm zum Zeitpunkt  $T_2$ . Zum Zeitpunkt  $T_1$  befand sich der an einem Pfahl montierte Wellenmessdraht WD1 in einem Wellental. Aufgrund der schlechten Textur ergibt sich bei der automatischen Messung mittels digitaler Bildzuordnung eine Fehlkorrelation. Die Grenzen des Verfahrens sind hier erreicht. Zum Zeitpunkt  $T_2$  findet eine erfolgreiche Bildzuordnung aufgrund der guten Textur der Gischt der brechenden Welle statt.

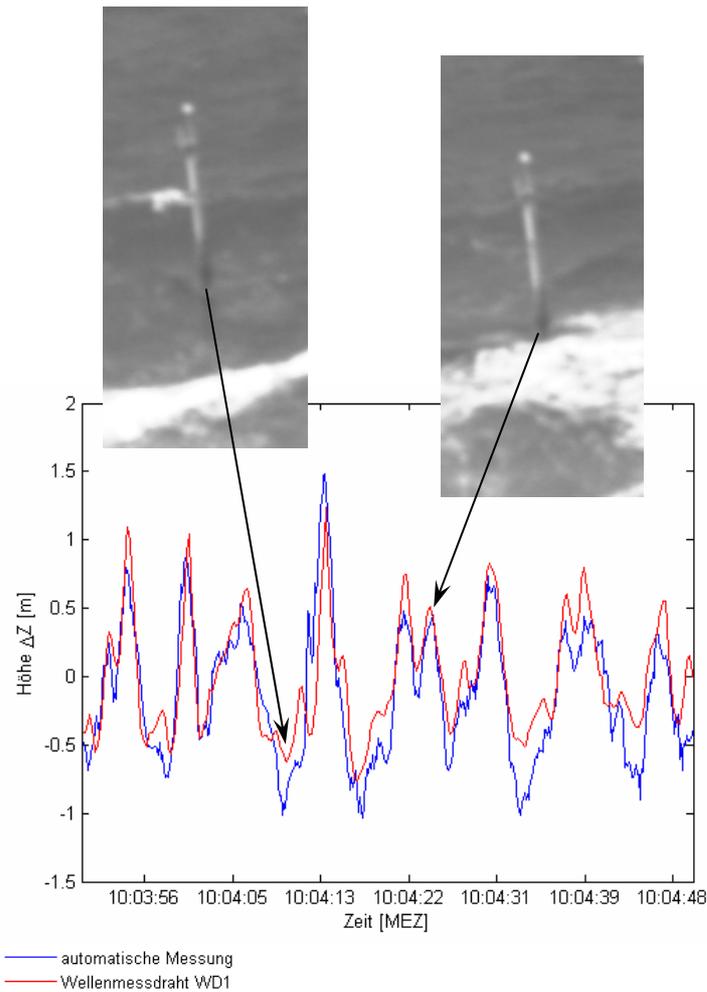


Abbildung 6-11: Vergleich Wellenmessdraht WD1 und automatische Messung mit Bildausschnitten des Wellenmessdrahts vom 15.05.2003 zu den Zeitpunkten  $T_1$  um 10:04:09 Uhr MEZ und  $T_2$  um 10:04:24 Uhr MEZ

Zur weiteren punktförmigen dynamischen Verifizierung wird im Folgenden die Methode der Zeitreihenanalyse eingesetzt (siehe Kapitel 2.2.2). Die Ergebnisse der Untersuchungen im Frequenzbereich geben Aufschlüsse über das stochastische Verhalten der Zeitreihe. Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 zeigen die Amplitudenspektren des Wellenmessdrahts WD1 und der Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 sowie der jeweiligen automatischen Messung.

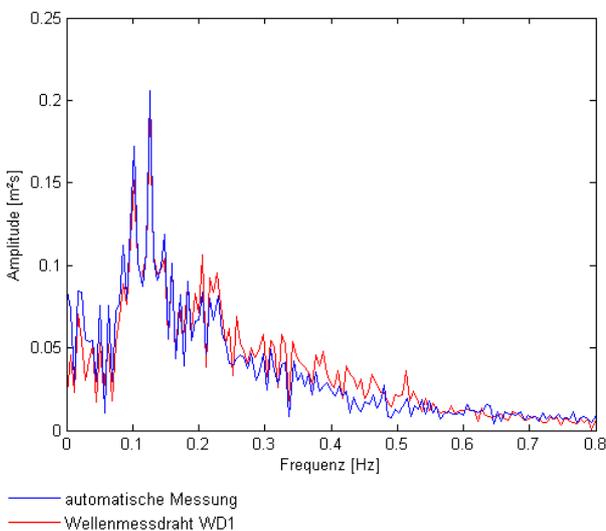


Abbildung 6-12: Amplitudenspektren Wellenmessdraht WD1 und automatische Messung

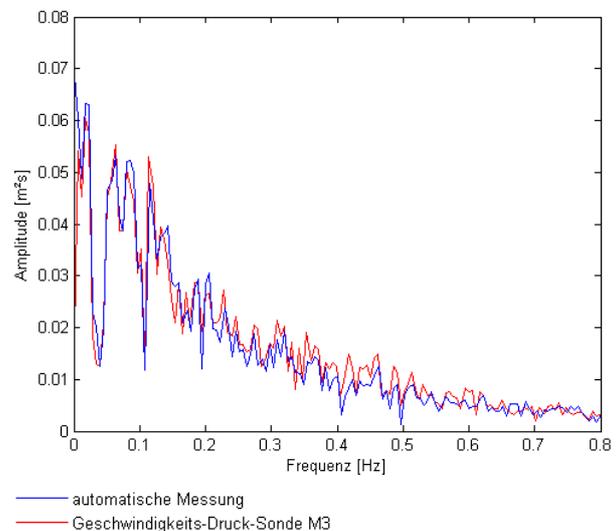


Abbildung 6-13: Amplitudenspektren Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 und automatische Messung

Die Amplituden der Messungen des Wellenmessdrahts WD1 und der Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3 stimmen im Wesentlichen mit den Amplituden der automatischen Messung überein. Im betrachteten Zeitraum ist ein sehr energiereicher niederfrequenter Anteil vorhanden. Dieser ist in den Ergebnissen der automatischen Messung tendenziell größer als in den Seegangsdaten. Beim Wellenmessdraht ist für höhere Frequenzen die Energie der automatischen Messung geringer als die der Seegangsmessung. Dieser Unterschied entsteht möglicherweise durch die Interpolation bei Datenlücken in der automatischen Messung aufgrund von Verdeckungen an der Rückseite von Wellen und schlechter Textur der Wasseroberfläche. An der Geschwindigkeits-Druck-Sonde M3, die sich im Strandbereich befindet, sind die Verdeckungen im Vergleich zur Position des Wellenmessdrahts gering und die Textur ausgeprägter. Daher sind bei der Geschwindigkeits-Druck-Sonde geringere Unterschiede zur automatischen Messung zu erkennen.

### 6.3 Bewertung

In diesem Kapitel wurde das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur automatischen Bestimmung von Wasseroberflächen aus Bildsequenzen unter den Aspekten der inneren und der äußeren Genauigkeit diskutiert.

Zur Überprüfung der inneren Genauigkeit wurden Differenzmodelle aus den Ergebnissen automatischer Messungen unter Verwendung gleicher Steuerungsparameter, aber unterschiedlicher Startpunkte abgeleitet. In lokal begrenzten Bereichen wie z.B. der brechenden Welle kam es vereinzelt zu größeren Abweichungen, die als Ausreißer zu bewerten sind. Die erzielten Standardabweichungen liegen im Bereich eines Dezimeters. Der Mittelwert der Höhendifferenzen ist deutlich unter einem Zentimeter. Die Differenzmodelle zeigen im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit keine signifikanten Abweichungen. Die unterschiedlichen Startpunkte wirken sich demnach nicht negativ auf das Ergebnis aus.

Die Überprüfung der äußeren Genauigkeit erfolgte zum einen über einen flächenhaften statischen Vergleich zu diskreten Zeitpunkten mit manuellen Messungen und zum anderen über einen dynamischen Vergleich für einzelne Punkte über einen längeren Zeitraum mit Seegangsmessungen. Der flächenhafte statische Vergleich zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den manuellen und den automatischen Messungen. Die berechnete Standardabweichung der Höhendifferenz hat eine Größe von wenigen Dezimetern. Der Mittelwert der Höhendifferenzen liegt im Bereich weniger Zentimeter. Der dynamische punktuelle Vergleich mit Seegangsmessungen lieferte ebenfalls keine signifikanten Abweichungen zur automatischen Messung. Die berechnete Standardabweichung der Höhendifferenz ergibt für den Wellenmessdraht einen Wert im Bereich weniger Dezimeter und für die Geschwindigkeits-Druck-Sonde einen Wert unter einem Dezimeter.

Sowohl bei der Überprüfung der inneren als auch der äußeren Genauigkeit traten bis auf wenige Ausnahmen keine signifikanten Abweichungen im Hinblick auf die geforderten Genauigkeiten an das Oberflächenmodell auf. Das vorgestellte Verfahren kann somit als geeignet für die automatische Ableitung von Wasseroberflächen aus Bildsequenzen mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Dezimeter bewertet werden.

## 7 Bewertung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Verfahren zur automatischen Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen mittels digitaler Bildzuordnung vorgestellt. Nach einer kurzen Beschreibung des Verfahrens wird auf die Auswertung der durchgeführten experimentellen Versuche und die erzielte Genauigkeit eingegangen. Im Anschluss daran werden mögliche Optimierungen des Verfahrens sowie eine Übertragung auf andere Anwendungen beschrieben.

Zur Bestimmung der Wasseroberfläche wird ein automatisiertes zeit- und ortsdiskretes Verfahren auf der Grundlage von Bildsequenzen eingesetzt. Die photogrammetrische Bestimmung der Wasseroberfläche durch hierarchische, digitale Bildzuordnung erfolgt im Objektraum. Ein zur Bildsequenzauswertung entwickeltes Verfahren wurde in das bestehende Softwaresystem LISA implementiert. Während des Ablaufs des Verfahrens wird keine Interaktion des Anwenders benötigt. Die Initialisierung des Verfahrens erfolgt auf der Basis einer gut verteilten Menge an Objektpunkten, die als Startpunkte genutzt werden sowie einer geringen Anzahl zu setzender Steuerungsparameter. Nach der Initialisierung durchläuft das Verfahren automatisch die Bildsequenzen. Dabei werden die Ergebnisse eines Zeitpunkts als Startpunkte für den darauf folgenden verwendet. Das Ergebnis der Auswertung der Bildsequenzen sind flächenhafte, dreidimensionale Oberflächenmodelle zu jedem Zeitpunkt der Sequenz.

Die Verifizierung des entwickelten Verfahrens erfolgte auf der Datengrundlage, die im Rahmen zweier Messkampagnen auf Norderney geschaffen wurde. Dabei wurde ein Bühnenfeld mit einer Größe von 200 x 200 m<sup>2</sup>, in dem alle strömungsmechanisch wesentlichen Prozesse der Brandungszone zu beobachten sind, mit vier digitalen, synchronisierten Videokameras erfasst. Zusätzlich wurden punktuelle Seegangsmessungen in diesem Bühnenfeld durchgeführt. Die Videokameras waren auf zwei strandnah gelegenen Hochhäusern installiert, so dass die Voraussetzungen an das System (hohe, stabile Aufnahmestandpunkte, möglichst nah am Wasser liegend) erfüllt waren.

Aufgrund der Aufnahmekonfiguration wurden zwei sich überlappende Stereomodelle getrennt voneinander ausgewertet und anschließend zu einem Gesamtmodell kombiniert. Flächenhafte, dynamische, digitale Oberflächenmodelle des Untersuchungsgebiets konnten erfolgreich für eine Sequenz von 7 000 Bildern mit einem zeitlichen Abstand von 0.125 s abgeleitet werden. Die Verifizierung der automatisch ermittelten Oberflächenmodelle erfolgte stichprobenartig zu bestimmten Zeitpunkten durch den Vergleich mit manuell generierten Oberflächenmodellen. Ferner wurde an ausgewählten Punkten ein Vergleich in der Zeit durchgeführt. Dazu wurden punktuelle Seegangsmessungen von einem Wellenmessdraht und einer Geschwindigkeits-Druck-Sonde herangezogen. Sowohl aus den statischen flächenhaften als auch aus den dynamischen punktweisen Vergleichen lässt sich für das entwickelte Verfahren eine Genauigkeit im Bereich von 25 bis 35 cm ableiten. Eine Genauigkeitssteigerung kann durch den Einsatz von Kameras mit größeren Kammerkonstanten erreicht werden. Jedoch müsste dann die Anzahl der Kameras erhöht werden um die gleiche Größe des Untersuchungsgebiets auswerten zu können.

Die flächendeckend vorliegende Information der photogrammetrischen Messungen über einen bestimmten Zeitraum stellt einen großen Vorteil gegenüber punktuellen Messungen dar. Sie bietet wesentliche Informationen zur Weiterentwicklung der numerischen Modellverfahren. Des Weiteren kann ein Vergleich der Ergebnisse der numerischen Modellierung auch an beliebigen Stellen des Gebiets unabhängig von der Position der Geräte zur Seegangsmessung durchgeführt werden (STRYBNY 2004). Untersuchungen in SANTEL et al. (2004b) zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der numerischen Simulation der Wasseroberfläche in der Brandungszone und der automatischen Bildzuordnung. Unterschiede entstehen zum einen durch die nicht exakte Nachbildung der Wasseroberfläche mit dem numerischen Modell beim Wellenbrechen. Zum anderen ist die photogrammetrische Auswertung in Bereichen mit geringer Textur und bei der vorliegenden Aufnahmekonfiguration an der Rückseite der Wellen aufgrund von Verdeckungen nicht möglich, so dass die Höhen in diesen Bereichen interpoliert werden müssen. Dies kann zu einer schlechten Genauigkeit führen.

Gemäß den Überlegungen zum Kleinste-Quadrate-Ansatz in Kapitel 2.1.4.1 ist es vorteilhaft für die automatische Oberflächenableitung mehr als zwei Bilder simultan zu verwenden. Des Weiteren werden durch die simultane Verwendung

---

von mehr als zwei Bildern zur automatischen Oberflächenableitung die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse gesteigert.

Der präsentierte Ansatz kann des Weiteren durch die Verwendung einer adaptiven Fenstergröße (siehe Kapitel 2.1.2) optimiert sowie durch eine vorangestellte Merkmalszuordnung (siehe Kapitel 2.1.5) statt der manuellen Messung von Startpunkten weiter automatisiert werden. Je nach Beschaffenheit des zugrunde liegenden Bildmaterials können im Bedarfsfall zur Steigerung der Stabilität des Auswerteprozesses weitere Auflösungsstufen der Bildpyramiden berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.1.2). Fehlzunordnungen können durch die Ausnutzung der geometrischen Beziehungen zwischen den Orthophotos und dem zu erstellenden DOM (siehe Kapitel 2.1.2) detektiert werden. Ferner können verfügbare zusätzliche geometrische Informationen über die Oberfläche und das Verhalten der Oberfläche in der Zeit durch die Einführung von Bewegungsmodellen berücksichtigt werden. Diese können z.B. auf das abgeleitete Raster angewendet werden, so dass für den folgenden Zeitpunkt z.B. mittels eines Kalman-Filters prädizierte Startwerte vorliegen, durch die der Suchbereich der Bildzuordnung weiter reduziert werden kann.

Als Alternative zu den örtlich festen Standpunkten kann z.B. eine auf einem Transporter montierte ausfahrbare Plattform eingesetzt werden (SYSWE 2005). Durch die Konstruktion der Plattform kann die Stabilität der äußeren Orientierung über die Zeit jedoch im Allgemeinen nicht mehr als konstant vorausgesetzt werden. In diesem Fall muss das vorhandene Referenzpunktfeld im Objektraum zur Kameraorientierung für jeden Zeitpunkt genutzt werden.

Das vorgestellte Verfahren hat durch experimentelle Versuche die Eignung für die automatische Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Dezimeter belegt. Sowohl im aktuellen Entwicklungsstand als auch durch die Integration der aufgeführten Erweiterungen kann das Verfahren auf andere Anwendungsgebiete, wie z.B. die Überprüfung von flächenhaften dynamischen Deformationen ohne vorherige Punktsignalisierung oder die Auswertung von menschlichen Bewegungsvorgängen, übertragen werden.

## 8 Literatur

- ACKERMANN, F., HAHN, M., 1991. Image pyramids for digital photogrammetry. *Digital Photogrammetric Systems*, Ebner, H., Fritsch, D., Heipke, C. (Hrsg.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 43-58.
- ALBERTZ, J., 2001. *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2. Auflage.
- AVMK, AUSSCHUSS FÜR VERFAHREN UND MESSTECHNIK IM KÜSTENINGENIEURWESEN, 1984. Meßgeräte und Meßverfahren im Küsteningenieurwesen. *Die Küste*, Heft 41.
- BETHEL, J., 1986. The DSR11 image correlator. *American Congress on Surveying and Mapping, Annual Convention, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, Vol. 4, S. 44-49.
- BLOCK, A., 1936. Die Photogrammetrie im Dienste des Wasserbaus, des Schiffbaus und der Meereskunde. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)*, Heft 2, S. 62-75.
- BOBICK, A. F., INTILLE, S. S., 1999. Large occlusion stereo. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 33, No. 3, S. 181-200.
- BROWN, M. Z., BURSCHKA, D., HAGER, G. D., 2003. Advances in computational stereo. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 25, No. 8, S. 993-1008.
- BÖHM, J., 1965. Statistische Prüfung von Meßergebnissen auf Normalverteilung. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, Heft 3, S. 83-90.
- CHANG, C., CHATTERJEE, S., KUBE, P. R., 1991. On an analysis of static occlusion in stereo vision. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 722-723.
- CRUSET, J., 1953. Photogrammetric measurement of the sea swell. *Photogrammetria*, Vol. 9, S. 122-125.
- DIETER, J., LAUER, H., JÄHNE, B., 1997. Measurements of slope statistics on a wind driven water surface. *Optical 3-D Measurement Techniques IV*, Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 107-114.
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W., SIEDLER, G., 1975. *Allgemeine Meereskunde - Eine Einführung in die Ozeanographie*. 3. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- DRESCHLER, L., 1981. Ermittlung markanter Punkte auf den Bildern bewegter Objekte und Berechnung einer 3D-Beschreibung auf dieser Grundlage. *Fachbereich Informatik, Universität Hamburg*, Dissertation.
- EAU, 1985. *Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"*. 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W., HEIPKE, C., 1987. Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)*, Band 55, Heft 5, S. 194-203.
- ELSHOFF, I., JANSSEN, T., DONGEREN VAN, A., 2001. Video observation of laboratory waves. *Proceedings of the 4th International Symposium Waves 2001, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, San Francisco, California, Vol 1, S. 13-22.
- FOOTE, M., HORN, D., 1999. Video measurement of swash zone hydrodynamics. *Geomorphology*, Vol. 29, S. 59-76.
- FUA, P., 1993. A parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features. *Machine Vision and Applications*, Vol. 6, No. 1, S. 35-49.
- FÖRSTNER, W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 24, Part 3, S. 176-189.
- FÖRSTNER, W., 1984. Quality assessment of object location and point transfer using digital image correlation techniques. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 25, Part A3a, S. 197-219.
- FÖRSTNER, W., 1985. Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder. *Vorträge der 40. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart*, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Band 11, S. 69-90.
- FÖRSTNER, W., 1986. A feature based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 26, Part 3/3, S. 150-166.
- FÖRSTNER, W., 1991. Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK)*, Reihe C, Habilitation, Nr. 370, München.
- FRÖHLE, P., 2000. Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus. *Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen*, Dissertation, Heft 2, Universität Rostock.

- GROBMANN, W., 1969. *Grundzüge der Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate nebst Anwendungen in der Geodäsie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 3. Auflage.
- GRÜN, A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14, No. 3, S. 175-187.
- GRÜN, A., BALTSAVIAS, E., 1986. High precision image matching for digital terrain model generation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 26, Part 3/2, S. 284-296.
- GÜLCH, E., 1994. Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK)*, Reihe C, Dissertation, Nr. 418, München.
- HANNAH, M. J., 1989. A system for digital stereo matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, Vol. 55, No. 12, S. 1765-1770.
- HARTUNG, J., EPELT, B., KLÖSENER, K., 2002. *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 13. Auflage.
- HEIPKE, C., 1995. Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK)*, Reihe C, Habilitation, Nr. 450, München.
- HELAVA, U. V., 1988. Object-space least-squares correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, Vol. 54, No. 6, S. 711-714.
- HOLLAND, K. T., HOLMAN, R. A., 1997. Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo. *Journal of Coastal Research*, Vol. 13, No. 1, S. 81-87.
- HORIKAWA, K., 1988. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. University of Tokyo Press.
- HORN, B. K. P., 1986. *Robot Vision*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- HORN, B. K. P., SCHUNCK, B. G., 1981. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, Vol. 17, S. 185-204.
- KANADE, T., OKUTOMI, M., 1994. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 9, S. 920-932.
- KFKI, 2001. Forschungskonzept für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen 2001. *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)*.
- KLETTE, R., SCHLÜNS, K., KOSCHAN, A., 1998. *Computer Vision - Three-Dimensional Data from Images*. Springer-Verlag, Singapore.
- KOHLSCHÜTTER, E., 1906. Die Forschungsreise S. M. S. "Planet". *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, Heft 5, S. 220-227.
- KÖNNECKE, S., 2002. Analyse von Bildsequenzen zur Bestimmung von Wasseroberflächen. *Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI)*, Universität Hannover, Diplomarbeit (unveröffentlicht).
- KRAUS, K., 1996. *Photogrammetrie - Verfeinerte Methoden und Anwendungen, Band 2*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 3. Auflage.
- KRAUS, K., SCHNEIDER, W., 1988. *Fernerkundung - Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken, Band 1*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- LAAS, W., 1906. Messung der Meereswellen und ihre Bedeutung für den Schiffbau. *Jahrbuch der Schiffsbau-technischen Gesellschaft*, Deutsche Verlagswerke Strauß, Vetter & Co., Berlin, Band 7, S. 391-407.
- LACMANN, O., 1950. *Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nichttopographischen Gebieten*. S. Hirzel Verlag, Leipzig.
- LEHNER, S., SCHULZ-STELLENFLETH, J., NIEDERMEIER, A., HORSTMANN, J., ROSENTHAL, W., 2002. Extreme waves observed by synthetic aperture radar. *Proceedings of the 4th International Symposium Waves 2001, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, San Francisco, California, Vol 1, S. 125-134.
- LINDER, W., 2003. *Digital Photogrammetry - Theory and Application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- LINDER, W., 2004. Digitale Photogrammetrie am PC - Aktuelle Entwicklungen und Anwendungen in den Geowissenschaften. *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf*, Habilitation.
- LIPPMANN, T. C., HOLMAN, R. A., 1992. Wave group modulations in cross-shore breaking patterns. *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 1, S. 918-931.
- LITTLE, J. J., GILLET, W. E., 1990. Direct evidence for occlusion in stereo and motion. *Image and Vision Computing*, Vol. 8, No. 4, S. 328-340.

- LUCAS, B. D., KANADE, T., 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Vancouver, British Columbia, S. 674-679.
- LUHMANN, T., 2000. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg.
- LUHMANN, T., TECKLENBURG, W., 2000. Optische Messung der Wellentopographie. *Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)*, Kennzeichen 424-4018-18S0142, Abschlussbericht, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven.
- MAAS, H.-G., 1992. Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich*, Dissertation, Nr. 50.
- MAAS, H.-G., SCHREIBER, F., HENTSCHEL, B., 2003. An optical triangulation method for height measurements on water surfaces. *Videometrics VIII (Electronic Imaging 2003)*, *SPIE Proceedings Series*, El Hakim, S. (Hrsg.), Vol. 5013, S. 103-109.
- MARESCA, J. W., SEIBEL, E., 1976. Terrestrial photogrammetric measurements of breaking waves and longshore currents in the nearshore zone. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Vol. 1, S. 681-700.
- MARKS, W., RONNE, F. C., 1955. Aerial stereo-photography and ocean waves. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 21, No. 1, S. 107-110.
- MARR, D., POGGIO, T., 1979. A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London*, Series B 204, S. 301-328.
- MITCHELL, H. L., 1983. Wave heights in the surf zone. *Photogrammetric Record*, Vol. 11(62), S. 183-193.
- MOERS, W., 1999. *Die 13 1/2 Leben des Käpt'n Blaubär*. Eichborn Verlag, Frankfurt.
- MORAVEC, H. P., 1977. Towards automatic visual obstacle avoidance. *Proceedings of the 5th Joint Conference on Artificial Intelligence*, Cambridge, England, S. 584.
- MÖSSO, C., SIERRA, J. P., DIEZ, M., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., RODRIGUEZ, A., SANTÁS, J., C., RUIZ, V., 1998. Experimental study of wave deformation in the near-shore zone. Delta '96 Case. *Littoral '98, Proceedings of the 4th International Conference of the European Coastal Association for Science and Technology (EUROCOAST)*, S. 323-331.
- MULSOW, C., PUTZE, T., MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B., 2005. Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen. *Photogrammetrie - Laserscanning - 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Luhmann, T. (Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 30-37.
- NIEMEIER, W., 1980. Zur Auswertung geodätischer Messreihen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, Band 87, S. 41-59.
- NIEMEYER, H. D., KAISER, R., 1997. Variationen im lokalen Seegangsklima infolge morphologischer Änderungen im Riffbogen. *Berichte der Forschungsstelle Küste*, Norderney, Band 41, S. 107-117.
- NORVELLE, F. R., 1992. Stereo correlation: Window shaping and DEM corrections. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, Vol. 58, No. 1, S. 111-115.
- PAPARODITIS, N., THOM, C., JIBRINI, H., 2000. Surface reconstruction in urban areas from multiple views of aerial digital frame cameras. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Amsterdam, Niederlande, Vol. 33, Part B3, S. 43-50.
- PELZER, H., 1980. Besonderheiten der Auswertung kontinuierlicher Messungen und Probleme ihrer Interpretation. *Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodäsie*, Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 28, S. 151-170.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., VERGAUWEN, M., GOOL VAN, L., 2000. Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 4, S. 251-267.
- PULFRICH, C., 1908. Über Stand-Phototheodolite und deren Gebrauch an Bord eines Schiffes. *Mitteilung aus der optischen Werkstätte von Carl Zeiss in Jena, Sonderabdruck aus der Zeitschrift für Instrumentenkunde*, Verlag von Julius Springer, Berlin, Heft 3.
- REDONDO, J. M., RODRIGUEZ, A., BAHIA, E., FALQUÉS, A., GRACIA, V., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., STIVE, M. J. F., 1994. Image analysis of surf zone hydrodynamics. *Coastal Dynamics '94, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Barcelona, Spanien, S. 350-365.

- REDWEIK, G., 1993. Untersuchungen zur Eignung der digitalen Bildzuordnung für die Ableitung von Seegangparametern. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Dissertation, Nr. 194.
- REICHERT, K., HESSNER, K., NIETO BORGE, J. C., DITTMER, J., 1999. WaMoS II: Radar based wave and current monitoring system. *Proceedings of ISOPE '99*, Vol. 3, S. 139-143.
- ROSENHOLM, D., 1986. Accuracy improvement of digital image matching for evaluation of digital terrain models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 26, Part 3/2, S. 573-587.
- SANTEL, F., HEIPKE, C., KÖNNECKE, S., WEGMANN, H., 2002. Image sequence matching for the determination of three-dimensional wave surfaces. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Corfu, Griechenland, Vol. 34, Part 5, S. 596-600.
- SANTEL, F., LINDER, W., HEIPKE, C., 2003. Image sequence analysis of surf zones: Methodology and first results. *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), Repro Zentrum ETH Zürich, Vol. II, S. 184-190.
- SANTEL, F., LINDER, W., HEIPKE, C., 2004a. Stereoscopic 3D-image sequence analysis of sea surfaces. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Istanbul, Türkei, Vol. 35, Part 5, S. 708-712.
- SANTEL, F., SCHIMMELS, S., HEIPKE, C., ZIELKE, W., 2004b. WaveScan - Automatisierte Erfassung und Modellierung von Brandungszonen auf Basis digitaler Bildsequenzen. *Forschungsprojekt der Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)*, Abschlussbericht, Förderkennzeichen 03KIS026.
- SASAKI, T., HORIKAWA, K., HOTTA, S., 1976. Nearshore current on a gently sloping beach. *Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference*, Hawaii, S. 626-644.
- SCHARSTEIN, D., SZELISKI, R., 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 47, No. 1/2/3, S. 7-42.
- SCHENK, T., 1999. *Digital Photogrammetry, Vol 1*. TerraScience, Laurelville.
- SCHENK, T., LI, J., TOTH, C. K., 1990. Hierarchical approach to reconstruct surfaces by using iteratively rectified imagery. *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, SPIE*, Vol. 1395, S. 464-470.
- SCHENK, T., TOTH, C. K., 1992. Conceptual issues of softcopy photogrammetric workstations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, Vol. 58, No. 1, S. 101-110.
- SCHEWE, H., 1988. Automatische photogrammetrische Karosserie-Vermessung. *Bildmessung und Luftwesen (BuL)*, Band 56, Heft 1, S. 16-24.
- SCHREER, O., 2005. *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- SCHUHMACHER, A., 1926. Die Deutsche Atlantische Expedition auf dem Vermessungs- und Forschungsschiff "Meteor". *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, Heft 11, S. 393-399.
- SCHUHMACHER, A., 1950. Stereophotogrammetrische Wellenaufnahmen mit schneller Bildfolge. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Band 3, Heft 1/2, S. 78-82.
- SEEBER, G., 1993. *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Berlin New York.
- SHARP, J. V., CHRISTENSEN, R. L., GILMAN, W. L., SCHULMAN, F. D., 1965. Automatic map compilation using digital techniques. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 31, No. 3, S. 223-239.
- SHIRAI, Y., 1987. *Three-Dimensional Computer Vision*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- SILVA, C., SANTOS-VICTOR, J., 2000. Intrinsic images for dense stereo matching with occlusions. *Proceedings European Conference on Computer Vision*, Dublin, Irland, S. 100-114.
- SONKA, M., HLAVAC, V., BOYLE, R., 1993. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Chapman & Hall Computing.
- STRAUB, B.-M., WIGGENHAGEN, M., 2004. Multiskalenansatz zur automatischen Ablesung von Wellenhöhen in Videobildern. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)*, Seyfert, E. (Hrsg.), Band 13, S. 121-128.
- STRYBNY, J., WEGMANN, H., 2001. Konzept und Ansätze für das WaveScan-Verfahren. *Tagungsband des 3. FZK-Kolloquiums*, Forschungszentrum Küste (Hrsg.), Hannover, S. 31-38.
- STRYBNY, J., 2004. Ein phasenauflösendes Seegangmodell zur Ermittlung von Bemessungsparametern für Küstenstrukturen. *Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen (ISEB)*, Universität Hannover, Dissertation, Nr. 69.
- SYSWE, SYSTEMTECHNIK WESER-EMS, 2005. [www.syswe.de](http://www.syswe.de), Zugriff: 05.11.2005.

- SZELISKI, R., ZABIH, R., 1999. An experimental comparison of stereo algorithms. *Vision Algorithms: Theory and Practice*, Triggers, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (Hrsg.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1-19.
- TAGUCHI, T., TSURU, K., 1998. Analysis of flood flow by stereomatching method. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Hakodate, Japan, Vol. 32, Part 5, S. 810-813.
- TAUBENHEIM, J., 1969. *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig.
- TREFIL, J., 2002. *Physik im Strandkorb. Von Wasser, Wind und Wellen*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2. Auflage.
- VOSS, F., 1991. Stereophotogrammetrische Befliegung von Wellen. *Zeiss-Information*, Oberkochen, Band 31, Heft 102, S. 14-18.
- WAGNER, P., 1990. *Meerestechnik - Eine Einführung für Bauingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- WANG, Y., 1994. Strukturzuordnung zur automatischen Oberflächenrekonstruktion. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Dissertation, Nr. 207.
- WEINBLUM, G., BLOCK, W., 1936. Stereophotogrammetrische Wellenmessungen bei der Hochsee-Meßfahrt 1934 des Motorschiffes "San Francisco" 1934. *Sonderdruck aus dem Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Deutsche Verlagswerke Strauß, Vetter & Co., Berlin, Band 37.
- WELSCH, W., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., 2000. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. *Handbuch Ingenieurgeodäsie*, Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H., Werner, H. (Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WROBEL, B., 1987. Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)*, Band 55, Heft 3, S. 93-101.
- YAMAZAKI, F., HATAMOTO, M., KONDO, M., 1998. Utilization of synchronous shutter apparatus in photographic measurement method of flood flow surfaces. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Hakodate, Japan, Vol. 32, Part 5, S. 848-855.
- ZABIH, R., WOODFILL, J., 1994. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. *Proceedings 3rd European Conference Computer Vision*, Stockholm, Schweden, S. 150-158.

## Danke ...

- ... Christian für die Unterstützung während meiner Arbeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Diskussionen, die mir wichtige Denkanstöße gegeben haben und so wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben sowie die Übernahme des Referats.
- ... Prof. Kutterer und Prof. Reulke für die Übernahme der Referate.
- ... dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das das dieser Arbeit zugrunde liegende Vorhaben *WaveScan* mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 03KIS026 finanziell gefördert hat.
- ... Jann, Stefan und Prof. Zielke für die gute und lehrreiche Zusammenarbeit im Projekt *WaveScan*.
- ... der Forschungsstelle Küste (FSK) und der Betriebsstelle Norden-Norderney des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) für ihre tatkräftige Unterstützung, besonders Herrn Niemeyer, Holger Karow und Holger Dirks.
- ... der ÖbVI Ernst F. Simon Stiftung für das Doktorandenstipendium.
- ... Ulla, Adele, Dietmar, Wilfried, Karsten, Volker, Jon, Stefan Könnecke und Holger Eckartz für die Unterstützung während der Messkampagnen auf Norderney.
- ... den Hausmeistern Herrn Seeger und Herrn Pauls für ihre Hilfsbereitschaft und die vielen Stunden, die wir während der Messkampagnen auf „ihren“ Hochhäusern verbringen durften.
- ... Dietmar für die Synchronisation der Kameras.
- ... Adele für die manuellen Auswertungen an der Z4.
- ... Wilfried für LISA und die vielen nicht selbstverständlichen Programmänderungen.
- ... allen IPIanern für die stets angenehme Atmosphäre am Institut und die gute Zusammenarbeit, besonders Manfred.
- ... Markus, Karsten, Volker, Hans, Jann, Manfred und Wilfried fürs Lesen, Korrigieren und Verbessern dieser Arbeit.
- ... meinen Eltern, die mich immer mit aller Kraft unterstützt haben.
- ... Gerko für das Mut machen aus der Schweiz: „Durchhalten!“.
- ... Karsten für Alles.
- ... Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

## Lebenslauf

Seit Mai 2005	Assistentin des Vorstands bei der Etalon AG, Braunschweig
November 2003	Promotionsstipendium der ÖbVI Ernst F. Simon Stiftung
März 2001 - April 2005	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover
April 2000 - Juli 2000	Voruntersuchungen zur Diplomarbeit an der Purdue University, West Lafayette, USA
September 1998 - Januar 1999	Auslandssemester an der University of Newcastle upon Tyne, England
Oktober 1994 - Januar 2001	Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover (Abschluss Diplom-Ingenieur)
1981 - 1994	Schulbesuch, Abitur am Gymnasium St. Michael, Paderborn
14. Januar 1975	Geboren in Paderborn Eltern: Gregor G. Santel und Ursula Santel, geb. Steffens

# Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover

*(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)*

- Nr. 230 SANTITAMNONT, P.: Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping (Diss. 1998)
- Nr. 231 SCHWIEGER, V.: Ein Elementarfehlermodell für GPS-Überwachungsmessungen - Konstruktion und Bedeutung interepochaler Korrelationen (Diss. 1998)
- Nr. 232 POLLAK, B.: Ein rechnergestütztes Planungssystem für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie (Diss. 1999)
- Nr. 233 GBEL, F. E.: Nutzung von Satellitendaten für Landesvermessungszwecke in Entwicklungsländern am Beispiel der Elfenbeinküste (Diss. 1999)
- Nr. 234 LABBABIDI, A. R.: Beitrag zur Eisenbahntrassierung mit nicht linear gekrümmten Bögen (Diss. 1999)
- Nr. 235 GOFFINET, P.: Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren (Diss. 1999)
- Nr. 236 ZHANG, S.: Interpolation of Geoidal/Quasigeoidal Surfaces for Height Determination with GPS (Diss. 1999)
- Nr. 237 VÖLKSEN, C.: Die Nutzung von GPS für die Deformationsanalyse in regionalen Netzen am Beispiel Islands (Diss. 2000)
- Nr. 238 ZAHRAN, K.: Accuracy Assessment of Ocean Tide Loading Computations for Precise Geodetic Observations (Diss. 2000)
- Nr. 239 Festschrift: Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber zum 60. Geburtstag
- Nr. 240 QU, W.: Zur Anwendung der Fuzzy-Clusteranalyse in der Grundstückswertermittlung (Diss. 2000)
- Nr. 241 Festschrift: em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge zum 70. Geburtstag
- Nr. 242 FOPPE, K.: Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken (Diss. 2001)
- Nr. 243 PAKZAD, K.: Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten (Diss. 2001)
- Nr. 244 LENK, U.: 2.5D-GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Stationsmodellen (Diss. 2002)
- Nr. 245 BÖDER, V.: Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen (Diss. 2002)
- Nr. 246 KARANJA, F. N.: Use of Knowledge Based Systems for the Detection and Monitoring of Unplanned Developments (Diss. 2002)
- Nr. 247 MENGE, F.: Zur Kalibrierung und zum Einfluss der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen auf die hochpräzise Positionsbestimmung (Diss. 2003)
- Nr. 248 FEI, L.: A Method of Automated Cartographic Displacement – On the Relationship between Streets and Buildings (Diss. 2002)
- Nr. 249 STRAUB, B.-M.: Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten (Diss. 2003)
- Nr. 250 Festschrift: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c.mult. Hans Pelzer zur Emeritierung anlässlich seines 68. Geburtstages (2004)
- Nr. 251 MANN, W.: Integratives Auswertemodell zur Beschreibung des Immobilienmarktes (2004)
- Nr. 252 GEOFORUM 2004: Geoinformationssysteme: Grundlagen – Nutzungen – Entwicklungen. Beiträge des Geoforum 2004, Hannover, Leibnizhaus, 8. Juni 2004
- Nr. 253 HIRT, C.: Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkameranagements für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung (Diss. 2004)
- Nr. 254 ROLAND, M.: Untersuchungen zur Kombination terrestrischer Schweredaten und aktueller globaler Schweredaten (Diss. 2005)
- Nr. 255 WILLGALIS, S.: Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen. (Diss. 2005)
- Nr. 256 ABU EL REISH, M.: Ingenieurgeodätische Deformationsanalyse am Beispiel der Absenkstrecke des Elbtunnels in Hamburg (Diss. 2005)
- Nr. 257 Festschrift: Gedenkkolloquium zum 100. Todestag des Generalleutnants Dr. h.c. Oscar Schreiber (2005)
- Nr. 258 Festschrift: Univ. Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Günter Seeber zur Emeritierung anlässlich seines 65. Geburtstages (2006)
- Nr. 259 SANTEL, F.: Automatische Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen mittels digitaler Bildzuordnung (Diss. 2006)

*Die Arbeiten werden im Rahmen des wissenschaftlichen Schriftenaustausches verteilt und sind nicht im Buchhandel erhältlich. Der Erwerb ist zu einem Stückpreis von € 25,- bei den herausgebenden Instituten möglich.*