

# **Digitale Bildzuordnung zur Bestimmung von bewegten Wasseroberflächen**

Folke SANTEL, Wilfried LINDER

## **Zusammenfassung**

Für die Aufgaben im Küstenschutz werden numerische Modelle zur Beschreibung des Seegangs benötigt. Diese basieren unter anderem auf der dreidimensionalen Beschreibung der Wasseroberfläche. Eine Methode zur Oberflächenbestimmung mittels digitaler Bildzuordnung wird vorgestellt. Die Bildzuordnung ist im Objektraum unter Berücksichtigung der Epipolargeometrie realisiert. Ein Algorithmus zur Auswertung von Bildsequenzen wird beschrieben und erste erfolgversprechende Ergebnisse werden gezeigt. Zur Datenerfassung wurden vier synchronisierte digitale Videokameras eingesetzt.

## **1 Einleitung**

Im Küstenschutz weicht der Neubau von Systemen aus Deckwerken und Buhnen zunehmend einer Kombination aus Strandaufspülungen und ingenieurbiologischen Maßnahmen wie z.B. dem Dünenbau. Aus diesem Grund rückt verstärkt die Optimierung der Auffüllungen in den Mittelpunkt des Interesses. Durch gezieltes Einbringen möglichst kleiner Massen an speziell ausgewählten Positionen soll die Standzeit der Aufspülungen erhöht und damit die Zahl notwendiger und sehr kostenintensiver Wiederholungen reduziert werden.

Durch die numerische Modellierung der Prozesse in der Brandungszone wie Wellenbrechen, Wellenauflauf und Wellenüberlauf können langfristig Gebiete des Massenauf- und -abtrags bestimmt sowie die Bauweise von Deckwerken und Buhnen optimiert werden. Bisher eingesetzte Pegel- und Bojenmessungen zur Steuerung solcher Modelle sind zurzeit nur als Punktdaten verfügbar. Die Wasseroberfläche ist ein wichtiger Input für die Steuerung des numerischen Modells.

Ziel ist daher die flächendeckende, dreidimensionale und zeitlich kontinuierliche Bestimmung der Wasseroberfläche in der Brandungszone mit einer Genauigkeit in der Höhe innerhalb des Zentimeterbereichs. Um die Kinematik der Wasseroberfläche ausreichend beschreiben zu können, muss eine zeitliche Auflösung von ca. 10 Hz erreicht werden. Das Aufnahmesystem muss weiterhin in der Lage sein, Daten einer Zeitdauer von bis zu 20 min aufzuzeichnen.

Durch den Einsatz der Photogrammetrie kann die erforderliche hohe zeitliche und räumliche Auflösung, die notwendig ist um das numerische Modell zu verifizieren und zu kalibrieren, erreicht werden (STRYBNY ET AL. 2001). Zur Bestimmung von

Seegangparametern aus einzelnen Stereobildpaaren konnte die digitale Bildzuordnung bereits in der Vergangenheit erfolgreich eingesetzt werden (REDWEIK 1993).

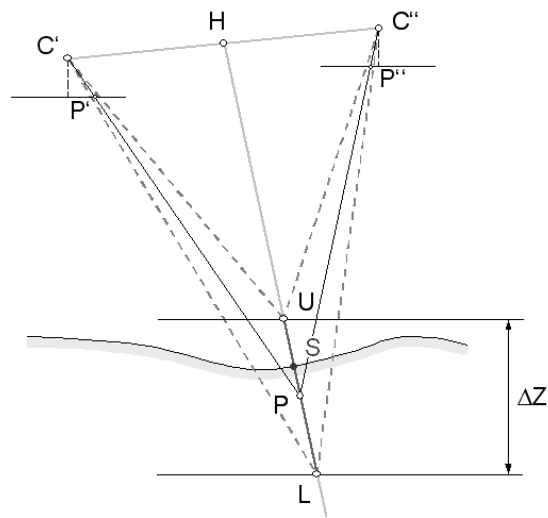
Die Verwendung digitaler Aufnahmesysteme ermöglicht die kontinuierliche Aufnahme des Seegangs über ausreichend lange Zeitintervalle. Ferner ist die automatisierte zeit- und ortsdiskrete Bestimmung der Wasseroberfläche durch den Einsatz der digitalen Photogrammetrie realisierbar. Die korrelierten Bilder einer Bildsequenz können miteinander verknüpft werden. Das Ergebnis eines Aufnahmezeitpunkts [i] kann als Eingangswert für die Berechnung des Zeitschritts [i+1] verwendet werden.

## 2 Digitale Bildzuordnung

Die dreidimensionale Bestimmung der sich bewegenden Wasseroberfläche wird unter Verwendung photogrammetrischer Stereobilddaten mit Hilfe der digitalen Bildzuordnung durchgeführt. Die Ermittlung der Form der Wasseroberfläche erfolgt in der Weise, dass im rechten und linken Bild des Stereopaars ein homologer Punkt aufgesucht und der zugehörige Strahlengang zum Zeitpunkt der Aufnahme rekonstruiert wird. Durch sukzessives Fortschreiten dieses Prozesses über die gesamte Fläche des Modellbereichs entsteht ein digitales Geländemodell (DGM). Die Besonderheit des nachstehend beschriebenen Ansatzes liegt darin, dass die Steuerung der Bildbewegung nicht im Bildraum sondern im Objektraum stattfindet (LINDER 2003).

### 2.1 Punktweise Zuordnung

Als geometrische Einschränkung für den Suchbereich wird die Epipolargeometrie verwendet. Näherungskordinaten für den Startpunkt S und die Orientierungen der Bilder werden als Eingangsdaten benötigt. Entlang einer Geraden werden mehrere Objektkordinaten, die in Geradenrichtung variieren, definiert. Die Gerade verläuft durch den Mittelpunkt H der Basis des Stereomodells sowie durch den Startwert S für den Objektpunkt P (siehe Abb. 1). Der maximale Verschiebungsbereich  $\Delta Z$  in Z-Richtung muss angegeben werden. Die Größe der Schrittweite der Verschiebung innerhalb von  $\Delta Z$  im Objektraum wird in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Höhenänderung im DGM unter Berücksichtigung der Veränderung der Bildkoordinaten von mindestens 1 Pixel bei Verschiebung des Startpunkts entlang der Geraden bestimmt. Dieses Prinzip der punktwisen Zuordnung kann als eine Abart des Vertical Line Locus (VLL) bezeichnet werden (BETHEL 1986).

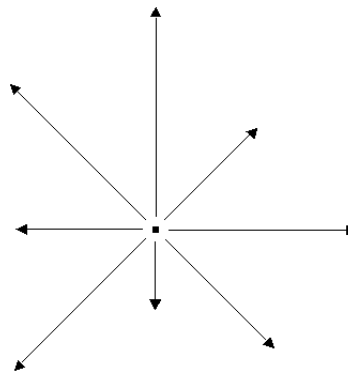


**Abb. 1:** Korrelations-Algorithmus zur Punktbestimmung

Unter Verwendung der Kollinearitätsgleichungen bei gegebener äußerer Orientierung werden die möglichen Objektpunkte in den Bildraum transformiert. Durch die Bildkoordinaten wird das Zentrum der Korrelationsfenster festgelegt. Die zur Korrelation verwendete Fenstergröße sowie ein Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten sind zuvor anzugeben. Der Korrelationskoeffizient wird für jeden möglichen Objektpunkt berechnet. Der gesuchte Objektpunkt  $S$  und die zugehörigen XYZ-Koordinaten werden durch den maximalen Korrelationskoeffizienten definiert. Um mögliche Fehlkorrelationen aufgrund zu geringen Kontrasts auszuschließen, wird ausgehend vom maximalen Korrelationskoeffizienten in einer gewissen Umgebung die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Korrelationskoeffizienten innerhalb dieses Bereichs berechnet. Bei einem Wert kleiner als ein vorgegebener Schwellwert wird der Objektpunkt verworfen.

## 2.2 Flächenhafte Ausbreitung

Durch Fortsetzen des Prozesses über den gesamten Modellbereich mittels eines verfeinerten Region-Growing-Verfahrens wird eine 3D-Punktwolke generiert. Ausgehend von bekannten Startpunkten werden Spuren in die acht Hauptrichtungen im Objektraum gelaufen (siehe Abb. 2) und unter Verwendung der Höhe des vorherigen Punkts eine Zuordnung versucht. Bei erfolgreicher Korrelation wird in Spurenrichtung mit gegebener Rasterweite bis zum Abbruch der Korrelation aufgrund des Unterschreitens des Schwellwerts für den Korrelationskoeffizienten bzw. des Überschreitens der maximalen Verschiebung in  $Z$  fortgefahren. Die Rasterweite entspricht der gewählten Auflösung des DGM.



**Abb. 2:** Prinzip des Spurenlaufens

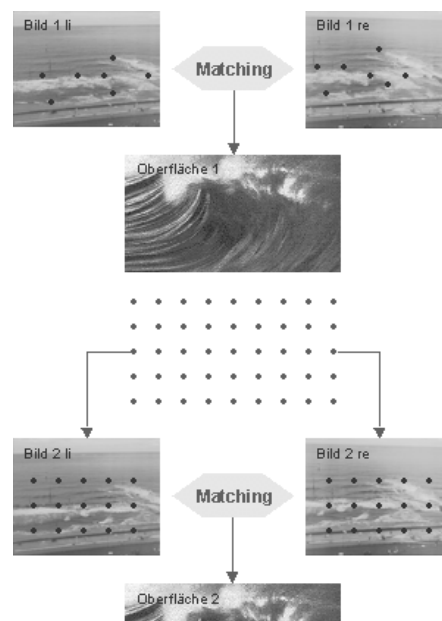
Im Anschluss wird im zweiten Teil des Spurenlaufens ein so genanntes Näherungs-DGM aus den bereits korrelierten Punkten durch Interpolation abgeleitet. In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Abschnitten des Spurenlaufens wird mit einem entsprechenden Vielfachen der Schrittweite zur Objektpunktverschiebung gearbeitet.

Anschließend wird aus dem bestehenden Näherungs-DGM ein verbessertes DGM durch weitere Iterationen und unter Verwendung eines kleineren Korrelationsfensters sowie eines verringerten Schwellwerts für den Korrelationskoeffizienten abgeleitet.

### 3 Bildsequenzauswertung

Die Grundidee der Sequenzauswertung ist, dass die Änderung der Höhe des DGM in aufeinander folgenden Bildern einer Bildsequenz im Bereich der nicht brechenden Welle sehr gering ist. Im ersten Stereobildpaar der Bildsequenz müssen die Startpunkte manuell gemessen werden. Es ist möglich, nur unter Hinzunahme dieser Startpunkte den Prozess der Bildzuordnung zu starten (SANTEL ET AL. 2002). Die Methode ist in der Lage, die benötigten Startpunkte der folgenden Stereobildpaare eigenständig zu finden.

Im Folgenden wird die Auswertung der Bildsequenzen näher beschrieben. Die Bildzuordnung wird für das erste Stereobildpaar (Zeitschritt [i]) ausgeführt. Das Ergebnis ist eine große Anzahl neu bestimmter Objektpunkte. Aufgrund der geringen Wellenbewegung können die Objektpunkte des Zeitschritts [i] als Startpunkte für den folgenden Zeitschritt [i+1] verwendet werden (siehe Abb. 3). Um den Aufwand für die Bildzuordnung zu verringern, wird nur eine bestimmte, gut verteilte Menge an Objektpunkten als neue Startpunkte genutzt. Ein grobes Raster neuer Startpunkte wird aus den Objektpunkten des vorangegangenen Zeitschritts ausgewählt. Die Bildzuordnung des Stereobildpaars [i+1] wird durchgeführt und die Ergebnisse können in gleicher Weise für das Stereobildpaar [i+2] genutzt werden und so weiter.



**Abb. 3:** Algorithmus zur Bestimmung der Wasseroberflächen von Bildsequenzen

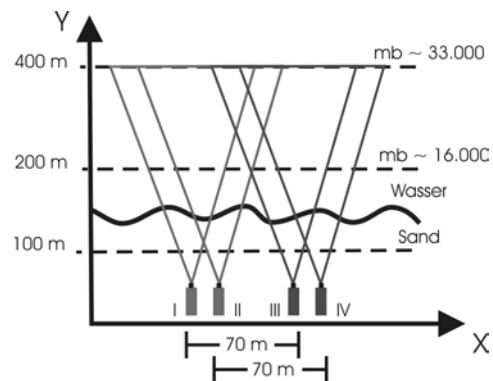
#### 4 Aufnahmesystem, Testgebiet und Datenerfassung

Zur photogrammetrischen Datenerfassung wurden vier digitale Videokameras Ikegami SKC-131 mit einem 2/3 inch interline progressive scan CCD eingesetzt. Der CCD-Sensor hat eine geometrische Auflösung von  $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}^2$  pro Pixel. Die Sensorgröße beträgt  $1296 \times 1031$  Pixel und die maximale Bildfrequenz 12 Hz. Die synchrone Auslösung der Kameras erfolgt über einen externen Trigger.

Untersuchungsgebiet ist ein Bühnenfeld vor Norderney mit einer Größe von ca.  $200 \times 200 \text{ m}^2$ . Die photogrammetrischen Aufnahmen wurden von Dächern zweier Hochhäuser in unmittelbarer Nähe des Bühnenfelds durchgeführt (weiße Kreise in Abb. 4). Auf jedem Gebäude wurden zwei Kameras aufgestellt. Wegen der Höhe der Aufnahmestandpunkte von ca. 40 m und einem maximalen Aufnahmeabstand von 400 m am äußeren Rand des Untersuchungsgebiets wurden die Kameras um ungefähr  $10^\circ$  aus der Horizontalen geneigt. Aus der gewählten Kamerakonfiguration ergeben sich zwei überlappende Stereomodelle (siehe Abb. 5). Die äußeren Orientierungen der Bilder wurden nach der Datenaufnahme mittels Passpunkten durch räumlichen Rückwärtsschnitts bestimmt.



**Abb. 4:** Untersuchungsgebiet  
(Quelle: NLWK – Norden)

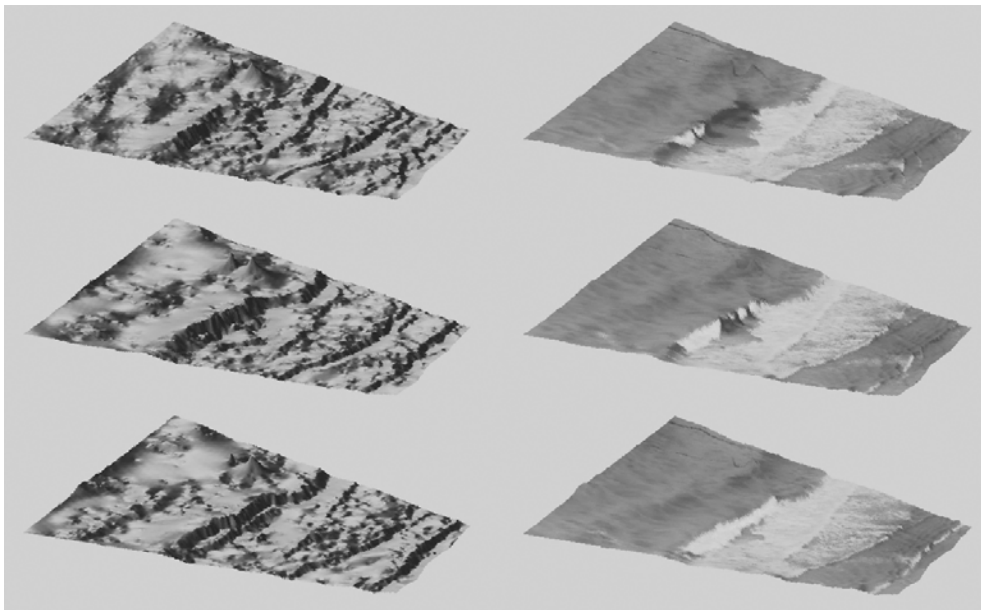


**Abb. 5:** Aufnahmekonfiguration

Eine erste Messkampagne fand im August 2002 auf Norderney statt. Die Brandungszone wurde mit einer Frequenz von 8 Hz über eine Dauer von maximal 10 Minuten in einem Abstand von ca. 1 bis 1½ Stunden aufgenommen. Insgesamt wurden 13 Sequenzen erfasst.

## 5 Ergebnisse

Zur dreidimensionalen Objektbestimmung wurden im ersten Stereobildpaar einer Bildsequenz 100 gut verteilte Startpunkte manuell gemessen. Mit diesen Startpunkten wurden ungefähr 20 000 homologe Objektpunkte automatisch gefunden. Die Bildzuordnung einer Sequenz von 30 s, aufgenommen mit einer Frequenz von 8 Hz, konnte bereits erfolgreich durchgeführt werden. Abb. 6 zeigt im linken Teil Ausschnitte aus drei generierten Wasseroberflächen der Bildsequenz mit einem zeitlichen Abstand von 1.0 s von Epoche zu Epoche. Die Position der Wellenfronten kann in den Oberflächenmodellen gut erkannt und verfolgt werden. Die zusätzlich erzeugten Orthophotos wurden den ermittelten Oberflächen überlagert (rechte Hälfte der Abb. 6). In beiden Darstellungen stimmen die Wellenpositionen überein. Durch die Überlagerung der Orthophotos können die Ergebnisse der Bildzuordnung visuell überprüft werden.



**Abb. 6:** Sequenz von Wasseroberflächen mit  $\Delta t = 1.0$  s  
(links: Oberflächenmodelle, rechts: mit überlagerten Orthophotos)

In Teilbereichen, wie z.B. bei den sich im Bühnenfeld befindenden Messpfählen treten Probleme auf. Der Pfahl wird z.B. als Spitze im DGM dargestellt. Dies konnte nur durch die Definition einer Aussparungsfläche behoben werden. Weitere Anpassungen des Bildzuordnungs-Algorithmus an die spezifischen Probleme bei der Modellierung von Wasseroberflächen sowie die Optimierung der Parameterwahl werden erfolgen. Die Auswertung des gesamten Bühnenfelds geschieht durch die Kombination der zwei überlappenden Stereomodelle zu einem Gesamtmodell.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur numerischen Modellierung der Prozesse in der Brandungszone wurde ein Bühnenfeld vor Norderney mit vier digitalen synchronisierten Videokameras erfasst. Die Bestimmung der Wasseroberfläche erfolgte mittels digitaler Bildzuordnung im Objektraum. Ein Algorithmus zur Bildsequenzauswertung wurde vorgestellt. Die Vorzüge des entwickelten Verfahrens zeigten sich in den ersten abgeleiteten Oberflächenmodellen.

Im Weiteren sollen längere Bildsequenzen bis zu einer Dauer von 10 min ausgewertet werden. Die Stabilität der Bildsequenzauswertung in der Zeit muss überprüft werden. Aus diesem Grund sollen die Ergebnisse durch manuelle Stereoauswertungen stichprobenweise kontrolliert werden. So können Aussagen über die Genauigkeit der generierten Objektoberfläche zu bestimmten Zeitpunkten getroffen werden. Bei höheren Wellen kann möglicherweise durch die Nutzung der Bewegung der Wasseroberfläche als zusätzliche

Information bzw. unter Berücksichtigung der zeitlichen Zusammenhänge eine höhere Zuverlässigkeit erreicht werden.

## 7 Dank

Dank gilt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben WaveScan mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 03KIS026 finanziell fördert.

## 8 Literatur

- Bethel J. (1986): *The DSR11 Image Correlator*. American Congress on Surveying and Mapping, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Annual Convention, Vol. IV, S. 44-49.
- Linder W. (2003): *Digital Photogrammetry – Theory and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Redweik G. (1993): *Untersuchung zur Eignung der digitalen Bildzuordnung für die Ableitung von Seegangparametern*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 194, Hannover.
- Santel F., Heipke C., Könnecke S. & Wegmann H. (2002): *Image Sequence Matching for the Determination of three-dimensional Wave Surfaces*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5, S. 596-600.
- Strybny J., Wegmann H. & Santel F. (2001): *Combining Phase-Resolving Wave Models with Photogrammetric Measurement Techniques*. Ocean Wave Measurement and Analysis, American Society of Civil Engineering, Vol. I, S. 191-200.