

Analyse von Bildsequenzen zur Bestimmung von Wasseroberflächen

Diplomarbeit

von

STEFAN KÖNNECKE

August 2002

Versicherung

Diese Arbeit habe ich selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Quellen entnommen worden, sind als solche kenntlich gemacht.

Hannover, 19. August 2001

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
2	BESCHREIBUNG DES VORLIEGENDEN DATENMATERIALS.....	9
	2.1 CHARAKTERISIERUNG DES AUFNAHMESYSTEMS	9
	2.2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND AUFNAHMESITUATION	10
	2.3 AUSWAHL DES DATENSATZES	13
3	GRUNDLAGEN DER DIGITALEN BILDZUORDNUNG	14
	3.1 PROBLEMSTELLUNG	14
	3.2 SIGNALBASIERTE BILDZUORDNUNG	15
	3.2.1 Bildzuordnung mittels Kreuzkorrelation.....	16
	3.2.2 Bildzuordnung mittels Kleinster-Quadrate-Methode.....	17
	3.3 AUSWAHL DES GEEIGNETEN VERFAHRENS	21
4	SOFT- UND HARDWARE	23
	4.1 HARDWARE	23
	4.2 SOFTWARE.....	24
	4.2.1 Kamerasteuerung und Videoaufnahme mit MotionBLITZ.....	24
	4.2.2 Vorverarbeitung der Bildsequenzen mit dem Bildbearbeitungsprogramm Jasc Paint Shop Pro	25
	4.2.3 Bildpunktmessung mit DPLX und Bildpunkt-Dateiformate	25
	4.2.4 Digitale Bildzuordnung mit DPCOR.....	26
	4.2.5 Übergang in den dreidimensionalen Objektraum mit BLUH	28
	4.2.6 Rasterung und Interpolation von geo-kodierten Daten mit Golden Surfer.....	29
	4.2.7 Verwendung der Programmiersprachen Perl und Java zur Automatisierung und Visualisierung.....	29
5	ENTWICKLUNG EINES ANSATZES ZUR AUTOMATISCHEN ZUORDNUNG VON DIGITALEN BILDSEQUENZEN.....	32
	5.1 EIN GEGEBENER ANSATZ: STATISCHE FORTSCHREIBUNG DER PUNKTPOSITIONEN	32
	5.2 ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS BASIEREND AUF DER DYNAMISCHEN FORTSCHREIBUNG VON PUNKTPOSITIONEN	33
	5.2.1 Entwurf einer dynamischen Punktfortschreibung.....	33
	5.2.2 Entwurf des Algorithmus	35

5.2.3	<i>Bewegungszuordnungen</i>	35
5.2.4	<i>Stereozuordnungen</i>	39
5.3	IMPLEMENTIERUNG DES ALGORITHMUS	42
5.3.1	<i>Das Hauptprogramm VMATCH</i>	42
5.3.2	<i>Umbenennen der Bilddateien</i>	48
5.3.3	<i>Ein- und Ausgabe</i>	49
5.3.4	<i>Rasterung und Interpolation</i>	49
5.3.5	<i>Prädiktion von Punktpositionen</i>	50
5.3.6	<i>Bewegungsschwellwert-Filterung</i>	51
5.3.7	<i>Kontrastfilterung</i>	51
5.3.8	<i>Segmentfilterung</i>	52
5.3.9	<i>Visualisierung von Zuordnungspunktmengen mit RAWVisu als Teil des Programmpaketes da_visu</i>	54
5.4	ERSTE ANWENDUNG DES ALGORITHMUS	55
6	VORUNTERSUCHUNGEN ZUR IMPLEMENTIERUNG	60
6.1	ERSTE BILDMATERIALSICHTUNG	60
6.2	SYNCHRONISMUS DER KAMERAS	60
6.3	AUFNAHMEFREQUENZ	64
6.4	RASTERVERFAHREN DES PROGRAMMS GOLDEN SURFER	64
6.5	ERSTE BILDZUORDNUNGEN MIT DPCOR	69
7	ERGEBNISANALYSE DER BILDSEQUENZZUORDNUNG	73
7.1	ZIELSTELLUNG DER ANALYSE	73
7.2	UNTERSUCHUNG DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION	73
7.2.1	<i>Zuverlässigkeitsabschätzung</i>	74
7.2.2	<i>Abweichung der Prädiktion von der Zuordnung</i>	76
7.2.3	<i>Genauigkeitsabschätzung</i>	79
7.2.4	<i>Bewertung</i>	82
7.3	PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION IN REGELMÄßIGE BEWEGUNGSMODELLE	83
7.3.1	<i>Zuverlässigkeitsabschätzung</i>	83
7.3.2	<i>Abweichung der Prädiktion von der Zuordnung</i>	85
7.3.3	<i>Genauigkeitsabschätzung</i>	87
7.3.4	<i>Bewertung</i>	89
7.4	BEURTEILUNG DER ERSTEN ANWENDUNG DES ALGORITHMUS	89

7.5	AUSBLICK.....	93
7.5.1	<i>Verbesserte Bewegungsmodellierung im Bildraum.....</i>	<i>93</i>
7.5.2	<i>Modellierung der Punktbewegung im Objektraum.....</i>	<i>94</i>
7.5.3	<i>Alternative Aufnahmesituation zur Steigerung der zeitlichen Auflösung.....</i>	<i>95</i>
7.5.4	<i>Optimierungsansätze bezüglich Algorithmus und Implementierung</i>	<i>96</i>
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	100
9	LITERATURVERZEICHNIS	101
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	106
11	TABELLENVERZEICHNIS	108
12	FORMELVERZEICHNIS.....	109

1 Einleitung

Maßnahmen der Küstensicherung und des Schutzes der Bevölkerung stehen zunehmend im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Diese Maßnahmen zählen gemäß Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland zu den Aufgaben des Bundes und der Länder zum Schutz des natürlichen Lebensraumes auch für zukünftige Generationen [vgl. Grundgesetz 2001, Artikel 20a].

Selbst beim Einsatz erheblicher Ressourcen für den Küstenschutz treten dennoch immer wieder Katastrophen, wie die Sturmfluten 1976, 1990 und 1994, auf [vgl. BMVEL 2002, S.88].

Aus der notwendigen Optimierung von Bauten des Küstenschutzes – Deckwerk, Deich oder Buhne – ergeben sich zwangsläufig Aufgaben für die praxisbezogene Forschung. Dem Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen und dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover wurde in diesem Rahmen die Forschungsaufgabe „Automatisierte Erfassung und Modellierung von Brandungszonen auf Basis digitaler Bildsequenzen“ zu teil [vgl. Strybny/Wegmann].

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit sollen vorliegende Bildsequenzen hinsichtlich der Verwendbarkeit zur Bestimmung von Wasseroberflächen analysiert werden. Ausgehend von dem Stand der Forschung ist ein Lösungsansatz zur automatischen Bildsequenzzuordnung zu entwickeln. Dabei wird unterstellt, dass eine quasi-kontinuierliche Bestimmung einer bewegten Wasseroberfläche mit synchronen Bildsequenzen in Stereoanordnung grundsätzlich möglich ist. Zu diesem Zweck sind synchrone Bildsequenzen Bild für Bild durch digitale Bildzuordnung zu verknüpfen. Diese Art der Verknüpfung soll im Rahmen dieser Arbeit mit digitaler Bildsequenzzuordnung bezeichnet werden.

Eine Bestandsaufnahme der verfügbaren Daten erfolgt im zweiten Abschnitt dieser Arbeit. Theoretische Erörterungen zu den bekannten Verfahren der digitalen Bildzuordnung werden im dritten Abschnitt vorgestellt. Eine Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Soft- und Hardware soll Abschnitt vier bieten.

Im fünften Abschnitt wird die Entwicklung des Lösungsansatzes zur automatischen Zuordnung von digitalen Bildsequenzen vollzogen. Ausgehend von der Idee wird die Ausformulierung des Algorithmus sowie dessen Implementierung und schließlich die erste Anwendung des Lösungsansatzes vorgestellt. Für die Implementierung und erste Anwendung des Algorithmus werden im Abschnitt sechs Bewertungen und Voruntersuchungen dargestellt.

Auf die Ergebnisse der ersten Anwendung des entwickelten Lösungsansatzes wird im siebten Abschnitt eingegangen. Dabei werden insbesondere Zuverlässigkeits- und Genauigkeitsabschätzungen vorgenommen. Darüber hinaus soll ein Ausblick für zukünftige Arbeiten gegeben werden.

In einer Zusammenfassung werden die Thesen der vorliegenden Diplomarbeit benannt.

Der im Rahmen dieser Arbeit verfasste Quelltext und die erzeugten Daten sind dieser Arbeit auf CD-ROMs beigelegt.

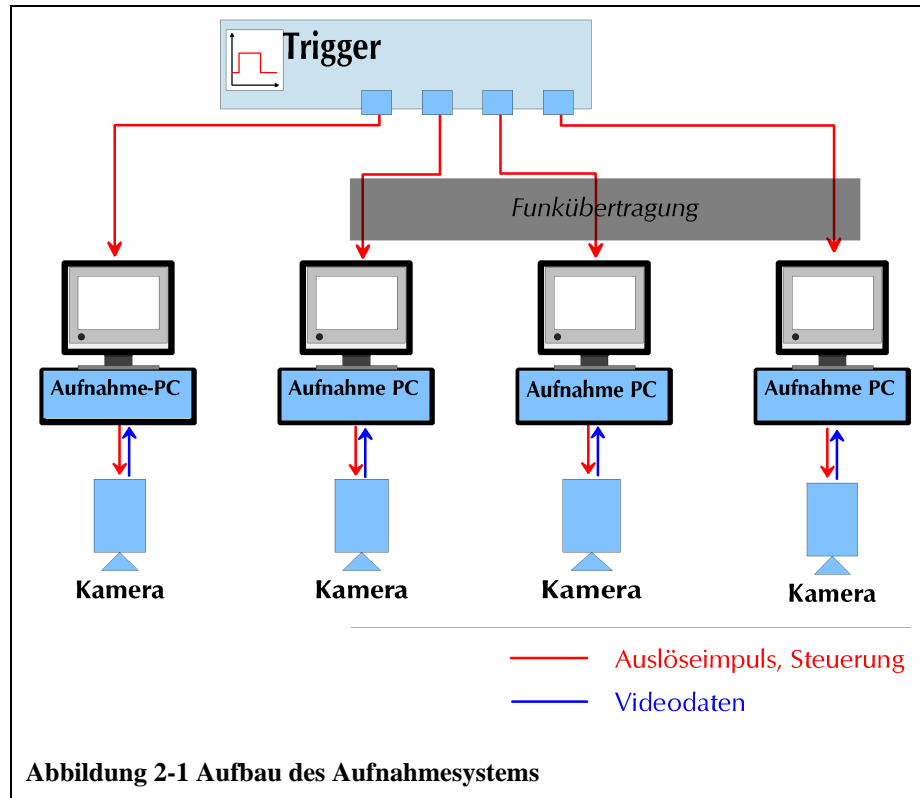
2 Beschreibung des vorliegenden Datenmaterials

Im Rahmen des Projektes WAVESCAN wurden im August 2001 erste Versuchsmessungen auf der Nordseeinsel Norderney durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, eine Datengrundlage zur Entwicklung und Evaluierung von Auswerteprozessen zu schaffen. Einen Teil dieser Auswerteprozesse stellt die automatische Zuordnung von Bildsequenzen dar [vgl. Strybny/ Wegmann 2000, S.12]. Die im August 2001 erfassten Evaluierungsdaten sollen in dieser Diplomarbeit zur Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Zuordnung von Bildsequenzen angewandt werden.

2.1 Charakterisierung des Aufnahmesystems

Das verwendete Aufnahmesystem besteht aus vier digitalen Videokameras und einem externen Trigger zur synchronen Auslösung der Kameras. Bei den vier verwendeten digitalen Videokameras handelt es sich um Geräte des Typs SKC-131-12E des Herstellers Ikegami. Ihre digitale Aufnahmetechnik beruht auf einem 2/3 Zoll großen *interline-progressiv-scan-CCD*-Sensor [vgl. Ikegami 2002]. Dieser Sensor erzeugt 10-Bit Graubilderfolgen¹ und verfügt über eine geometrische Auflösung von 6,7 x 6,7 μm . Der CCD-Sensor hat eine Größe von 1296 x 1031 Pixel. Die vom Hersteller angegebene Bildrate beträgt 12 Bilder je Sekunde (12 Hz zeitliche Auflösung). Die Kameras weisen mit dem verwendeten Objektiv eine Kammerkonstante von 50 mm auf. Der externe Trigger sendet zeitgleich Auslöse-Impulse an die vier Kameras. Die aufgenommenen Videos sind dadurch synchronisiert. Abbildung 2-1 verdeutlicht das Zusammenwirken von Kamera, Trigger und Aufnahme-PC.

¹ 10-Bit Graubilderfolgen sind Videos mit 10 Bit Graubildern.



Da die Kameras räumlich getrennt voneinander aufgestellt werden, wird das Triggersignal mit einem dafür entwickelten Funksystem an alle Kameras weitergegeben.

2.2 Untersuchungsgebiet und Aufnahmesituation

Für die erforderlichen Messungen wurden die Bühnenfelder am Nordstrand der Insel Norderney ausgewählt (vgl. Abbildung 2-2). Dort werden seit mehreren Jahrzehnten Naturmessungen durch das Forschungszentrum Küste (FSK) durchgeführt [vgl. Strybny/ Wegmann 2000, S.14]. Der Nordstrand wurde unter anderem aus folgenden Gründen gewählt:

- Die bisherigen Datenmessungen des FSK können als Referenzdaten herangezogen werden.
- Durch die Wahl eines günstigen Aufnahmepunktes, der möglichst hoch über der Wasseroberfläche liegt, können Verdeckungen vermieden werden [vgl. Redweik, 1993, S. 19]. Als Aufnahmepunkte wurden unter Ausnutzung dieses Sachverhaltes die am nördlichen Strand befindlichen Hochhäuser gewählt.

Das Untersuchungsgebiet wird in der folgenden Abbildung 2-2 dargestellt.

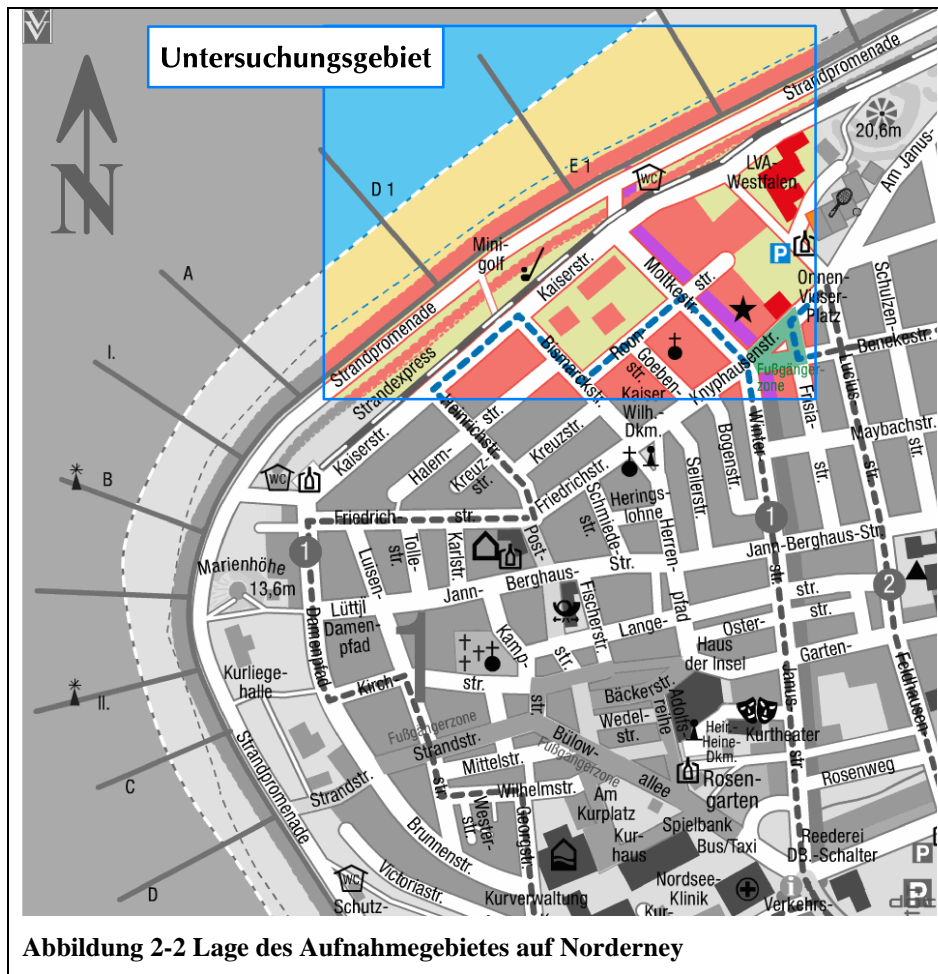


Abbildung 2-2 Lage des Aufnahmegebietes auf Norderney

Die durch das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation durchgeführten Messungen umfassten die Aufnahme von hochauflösenden Videos der Bühnenfelder. Zum Zweck der Geo-Referenzierung und zur Bestimmung der äußeren Orientierung² wurden permanente Passpunkte eingesetzt. Als Passpunkte wurden in die Bühnenfelder eingebrachte Stahlpfähle verwendet. Zusätzlich wurden bei Ebbe Zieltafeln auf Stativen im trockengefallenen Bereich aufgestellt, die von den Kameras ohne Veränderung der Orientierung abgebildet wurden. Auf den Messaufbau soll im folgenden Abschnitt detaillierter eingegangen werden.

² Die äußere Orientierung kennzeichnet Aufnahmeort und Aufnahmerichtung der Kamera. Die innere Orientierung legt die Lage des Projektionszentrums bezüglich der Bildebene fest (vgl. Kraus 1986, S.13f).

Aufnahmesituation

Die Kameras wurden auf Hochhäusern in Strandnähe aufgestellt. Diese Hochhäuser stellen ideale Kamerastandorte dar [vgl. Strybny/ Wegmann 2001a]. Von dort wird ein etwa $200 \times 200 \text{ m}^2$ großer Bühnenbereich abgedeckt. Kamera II und Kamera III wurden zum photogrammetrischen Normalfall [vgl. Kraus 1986, S.21] zusammengefasst. Kamera I und IV waren konvergent angeordnet, um die Objektgenauigkeit zu verbessern. Dies erschien notwendig, da das Basis-Höhenverhältnis der Normalfallkonstellation für nicht ausreichend erachtet wurde [vgl. Santel 2002, S.2].

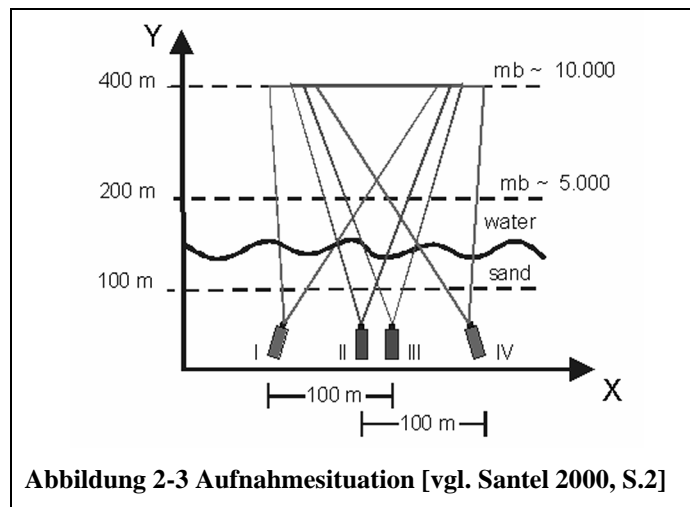


Abbildung 2-3 verdeutlicht die Aufnahmesituation. Die zu erwartende Genauigkeit im Objektraum³ hängt im Wesentlichen von der Objektgröße, der Anzahl der genutzten Kameras, deren Kammerkonstante und der Kameraposition relativ zum aufgenommenen Objekt ab [vgl. Santel 2002, S.2]. Bei einer Kammerkonstante von 50 mm und einer maximalen Aufnahmeentfernung von 400 m liegt der kleinste Bildmaßstab M bei 1:10.000 (entspricht einer größten Bildmaßstabszahl von $m=10.000$). Einer abgeschätzten Bildpunkt-Messgenauigkeit von 0,5 Pixel, also $\sigma_0 = 3,35 \mu\text{m}$, entspricht eine horizontale Objektgenauigkeit von $\sigma_x = \sigma_y = 3,35 \text{ cm}$ (vgl. Formel 2-1). Die vertikale Objektgenauigkeit σ_y ist mit 16,75 cm abgeschätzt worden.

³ In der Photogrammetrie unterscheidet man oft zwischen Bild- und Objektraum. Der Objektraum ist der Teil der dreidimensionalen, realen Welt, der in den aufgenommenen Bildern erfasst ist. Die zweidimensionalen Bilder definieren den Bildraum.

$$s_x = s_y = m \cdot s_0 = 3,35cm$$

$$s_z = \frac{h}{b} \cdot m \cdot s_0 = 16,75cm$$

Formel 2-1: Abschätzung der Objektgenauigkeiten [vgl. Luhmann 2000, S.107f]

Dabei ist:

- $s_x = s_y$: geschätzte horizontale Genauigkeit im Objektraum,
- s_z : geschätzte vertikale Genauigkeit im Objektraum,
- m : maximale Bildmaßstabszahl (10.000),
- $\frac{h}{b}$: Höhenbasisverhältnis (hier geschätzt mit 5).

Die äußere Orientierung wurde durch terrestrisch bestimmte Passpunkte im aufgenommenen Objektraum näherungsweise etabliert. Auf eine Kamerakalibrierung wurde verzichtet, da für die Verfahren, die Bestandteile dieser Arbeit sind, genäherte Parameter der inneren und äußeren Orientierung als ausreichend angesehen worden.

2.3 Auswahl des Datensatzes

Als Ergebnis der Aufnahmen auf Norderney sind mehrere Datensätze verschiedener Kamerapositionen gesichert worden. Für die Entwicklung eines Ansatzes zur automatischen Zuordnung von Bildsequenzen innerhalb dieser Diplomarbeit wurde der Datensatz „Pauls 2“ ausgewählt.

Die zur Realisierung der Bildsequenzzuordnung verwendete Bildzuordnungssoftware DPCOR ist in der vorliegenden Version auf Bilder im photogrammetrischen Normalfall beschränkt. Für die vorliegende Diplomarbeit wurden daher die Bildsequenzen der Kameras II und III (vgl. Abbildung 2-3) verwendet.

3 Grundlagen der digitalen Bildzuordnung

3.1 Problemstellung

Die Aufgabe der Bestimmung von homologen Punkten in korrespondierenden, digitalen Bildern werden als „digitale Bildzuordnung“ (engl. *image matching*) oder auch Korrespondenzanalyse bezeichnet [vgl. Heipke 1990, S.8; Luhmann 2000, S.417ff].

Es sollen im Folgenden die Begriffe Bildkorrelation und Bildzuordnung eindeutig getrennt werden, um Verwechslungen zu vermeiden. Nach [Heipke 1990, S.8] ist Bildkorrelation lediglich eine von vielen Lösungen des Problems der Bildzuordnung, bei der durch Maximierung des Korrelationskoeffizienten homologe Punkte in zwei Bildern einander zugeordnet werden.

Das Problem der Bildzuordnung gehört zu den unzureichend formulierten Problemen (*ill posed problems*), „... d.h. es ist nicht sicher, ob eine Lösung überhaupt existiert, eindeutig und robust gegenüber Variationen in den Eingangsdaten ist.“ [Luhmann 2000, S.417]. Typische Probleme sind nach [Luhmann 2000, S.417]:

1. Es kann keine Übereinstimmung zu einem Punkt gefunden werden.
2. Es wurden mehrere Übereinstimmungen gefunden. Eine eindeutige Auswahl ist nicht sinnvoll.

Der erste Fall tritt zum Beispiel auf, wenn eine Überdeckung des Punktes in einem der Bilder durch andere Objekte vorliegt. Der zweite Fall ergibt sich, wenn sich wiederholende Texturen oder mehrere gleichfarbige Flächen in der Umgebung des zu suchenden Punktes vorliegen.

[Luhmann 2000, S.417]: „Praktikable Lösungen gehen daher in der Regel davon aus, dass folgende Voraussetzungen an Objekt und Bildaufnahme weitestgehend erfüllt sind:

- die Intensitätswerte aller beteiligten Bilder liegen im gleichen Bereich
- konstante Beleuchtung, atmosphärische Einflüsse und Medienübergänge für den Zeitraum der Bildaufnahme
- formstabile Objektoberfläche für den Zeitraum der Bildaufnahme
- stückweise glatte Objektoberfläche

- undurchsichtige Objektoberfläche
- weitgehend diffuse Reflexionen der Oberfläche
- bekannte Näherungswerte für Orientierungsdaten (Bildüberlappung) und Objektdaten (geometrische und radiometrische Parameter)“.

Neben den von [Luhmann 2000] genannten Regeln ist für eine Bildsequenzzuordnung zusätzlich die Kenntnis über den Zeitpunkt der Aufnahme jedes einzelnen Bildes der Sequenz notwendig.

Die digitale Bildzuordnung kann durch verschiedene Ansätze automatisiert werden. Bei diesen Ansätzen unterscheidet man drei Gruppen: signal- bzw. flächenbasierte, merkmalsorientierte oder relationale Bildzuordnung [vgl. Heipke 1990, S.10; Xu 1994, S.12ff]. Werden verschiedene dieser drei Verfahren kombiniert, dann spricht man von hybrider Bildzuordnung [vgl. Xu 1994, S.14].

Im Anschluss wird näher auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendete signal- bzw. flächenbasierte Bildzuordnung eingegangen.

3.2 Signalbasierte Bildzuordnung

Die signalbasierte Bildzuordnung bestimmt ein Ähnlichkeitsmaß r zwischen einem Musterbild (Mustermatrix) $f(x_f, y_f)$ und einem Suchbild (Suchmatrix) $g(x_g, y_g)$ für eine Menge k potentiell homologer und zu untersuchender Punkte in g (vgl. Abbildung 3-1). Im einfachsten Fall wird der Punkt aus k mit dem höchsten Ähnlichkeitsmaß r_{\max} als das Abbild von f in g festgelegt [nach Luhmann 2000, S.401].

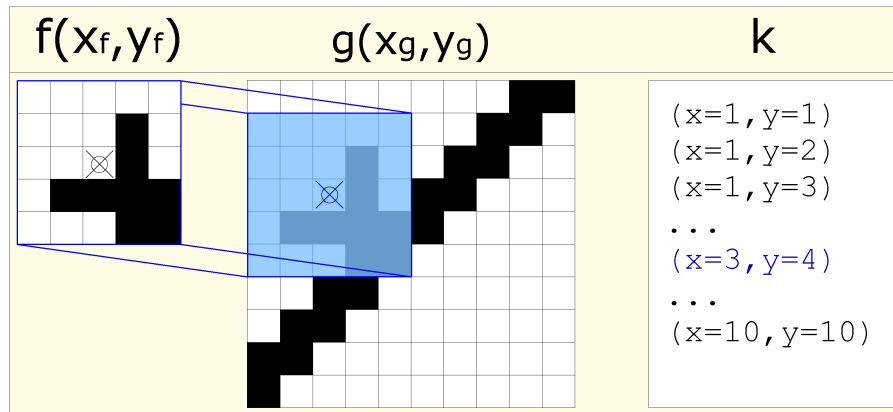


Abbildung 3-1: Prinzip signalbasierter Bildzuordnung

Die Methoden der signalbasierten Bildzuordnung sind weiterhin aufgrund der Art und Weise der Ermittlung des Ähnlichkeitsmaßes zu unterscheiden. Im Folgenden soll auf die Kreuzkorrelation und die Kleinste-Quadrate-Methode eingegangen werden.

3.2.1 Bildzuordnung mittels Kreuzkorrelation

Eines der ältesten Verfahren der automatischen Bildzuordnung basiert auf der Verwendung der Kreuzkorrelation (vgl. Formel 3-1 als Ähnlichkeitsmaß zwischen zwei gleichgroßen Bildausschnitten:

$$\mathbf{r}_{fg} = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (f(r,c) - \bar{f}) \cdot (g'(r,c) - \bar{g}')}{\sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (f(r,c) - \bar{f})^2} \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g'(r,c) - \bar{g}')^2}}$$

Formel 3-1: Normierter Kreuzkorrelationskoeffizient [nach Luhmann 2000, S.401; Heipke 1995, S.30]

Dabei ist:

- \mathbf{r}_{fg} der normierter Kreuzkorrelationskoeffizient,
- $f(r,c)$ der Intensitätswert des Pixels (r,c) in der Mustermatrix,
- $g'(r,c)$ der Intensitätswert des Pixels (r,c) in dem Ausschnitt aus dem Suchbild g um einen Punkt aus der Menge k potentiell homologer Punkte,
- \bar{f} der mittlere Intensitätswert der Mustermatrix,
- \bar{g}' der mittlere Intensitätswert des Ausschnittes aus der Suchmatrix und
- R, C sind die Anzahl der Zeilen und Spalten in den gleichgroßen Bildmatrizen f und g'.

Nach [Luhmann 2000, S.402] ist Bildzuordnung mittels Kreuzkorrelation robust und kontrastunabhängig. Maßstabsunterschiede, Rotationen und Verzerrungen zwischen Muster- und Suchbild und der hohe Rechenaufwand setzen ihrer Anwendung Grenzen.

3.2.2 Bildzuordnung mittels Kleinster-Quadrate-Methode

Die Kleinste-Quadrate-Methode (engl. *least square matching*) ist ebenfalls als signalbasierte Bildzuordnung einzuordnen. Als Ähnlichkeitsmaß dient die Quadratsumme der Differenzen der Intensitätswerte zwischen den beiden Bildausschnitten [vgl. Schenk 1999, S.257f]. Die von dem Musterbild f und dem Suchbild g abgedeckte Oberfläche im Objektraum wird als eben angenommen. Diese Ebene wird durch Zentralprojektion in den beiden Bildausschnitten abgebildet. Somit erscheint das gleiche Objekt in den jeweiligen Bildern f und g unterschiedlich.

Folgende Grafiken verdeutlichen die verschiedenen, durch die Kleinste-Quadrate-Methode modellierten, projektiven Verzerrungen sinnbildlich. Die Abbildung 3-2 stellt Folgen von Verschwenkung (Rotation) der Kameras zueinander dar.

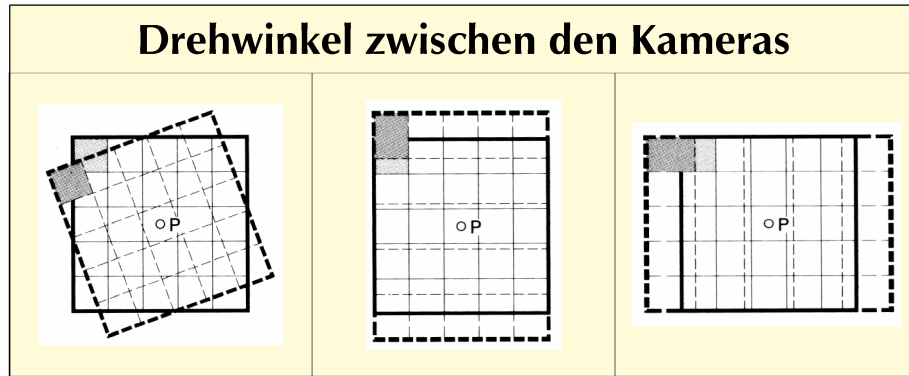


Abbildung 3-2: Unterschiedliche Abbildung eines ebenen Objektes durch zwei zueinander in jeweils einer Achse verschwenkten Kameras [nach Schenk 1999, S.239]

Maßstäbliche Varianzen zwischen Muster- und Suchbild werden in Abbildung 3-3 verdeutlicht.

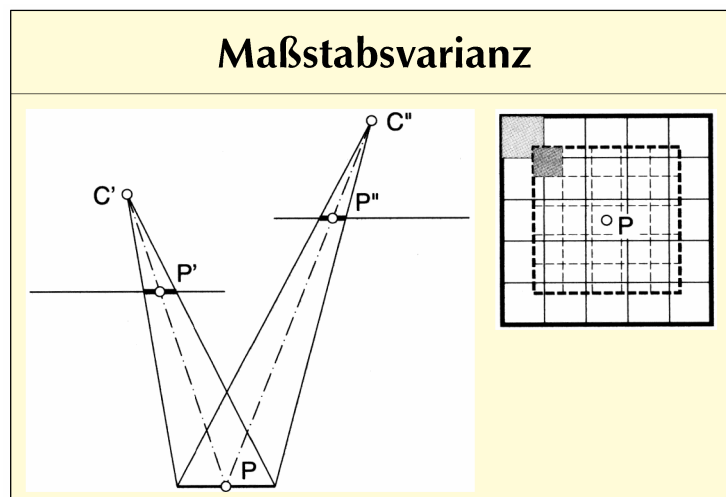


Abbildung 3-3: Veränderter Maßstab in der Abbildung eines ebenen Objektes durch unterschiedlichen Abstand vom Objekt oder unterschiedliche Kammerkonstante [nach Schenk 1999, S.238]

Auch sind verschiedene Maßstäbe für die zwei Bildkoordinatenrichtungen, wie in Abbildung 3-4 verdeutlicht, denkbar.

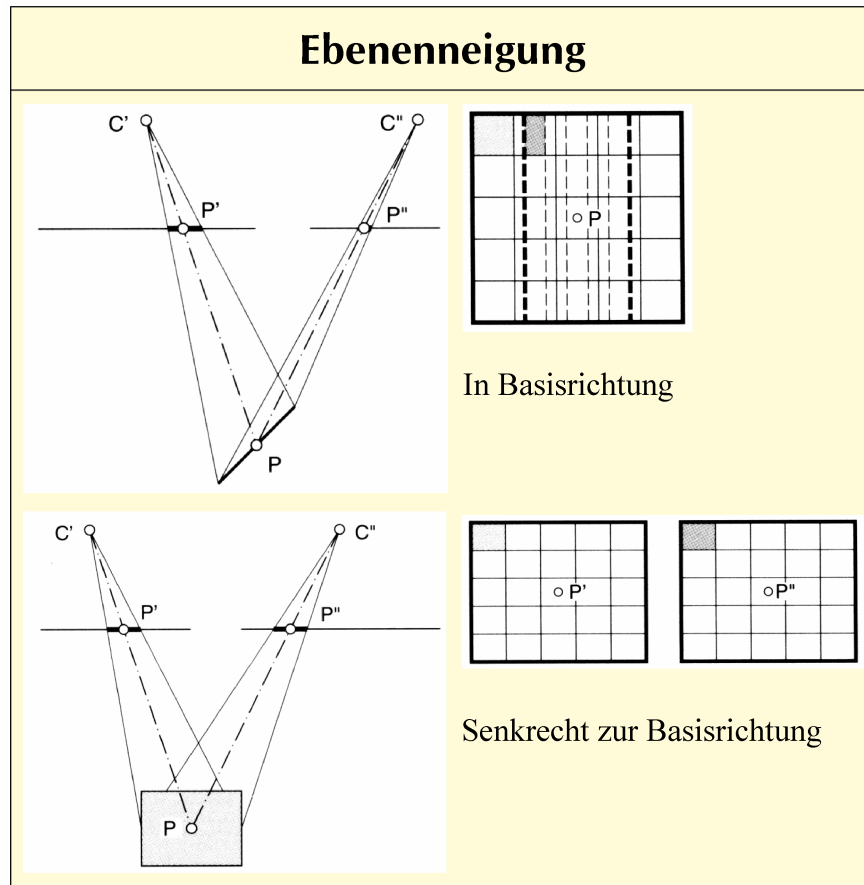


Abbildung 3-4: Abbildung einer geneigten Ebene durch zwei Kameras
[nach Schenk 1999, S.240]

In der Realität treten alle diese Verzerrungen gleichzeitig auf. Die Summe der Verzerrungen wird in der Regel mit Hilfe der Affintransformation (vgl. Formel 3-2) mathematisch modelliert [vgl. Luhmann 2000, S.403; vgl. Schenk 1999, S.258]:

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix}$$

Formel 3-2: Affintransformation Mustermatrix $f \rightarrow$
Suchmatrix g [nach Luhmann 2000, S.31]

Dabei ist:

- x_g, y_g, x_f, y_f Koordinaten eines Punktes in der Suchmatrix g und in der Mustermatrix f ,
- a_0, b_0 Translation in x- und y-Richtung,
- a_1, b_1, a_2, b_2 Maßstäbe in x- und y-Richtung, Rotation, Scherung.

Zusätzlich wird eine radiometrische Transformation (vgl. Formel 3-3) zwischen den Intensitätswerten der Mustermatrix f und der Suchmatrix g eingeführt:

$$f(x_f, y_f) = r_1 + r_2 \cdot g(x_g, y_g)$$

Formel 3-3: Lineare radiometrische Anpassung
[nach Heipke 1990, S.12f; Luhmann 2000, S.404]

Dabei ist:

- $f(x_f, y_f)$: Intensitätswert des Pixels (x_f, y_f) der Mustermatrix f ,
- $g(x_g, y_g)$: Intensitätswert des Pixels (x_g, y_g) der Suchmatrix g ,
- r_1 : Helligkeitsverschiebung,
- r_2 : Kontraststreckung.

Radiometrische Anpassung und Affintransformation stellen das mathematische Modell einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen⁴ dar. Dabei liefert der Intensitätswertunterschied zwischen jedem Pixel aus der Mustermatrix f und dem zugeordneten Pixel aus der Suchmatrix g jeweils eine Verbesserungsgleichung (vgl. Formel 3-4).

⁴ Ausgleichungen nach vermittelnden Beobachtungen sind eine Art der Ausgleichung nach dem auf C.F.Gauß zurückgehenden Prinzip der kleinsten Quadrate [vgl. Pelzer 1985, S.84].

$$v(x_f, y_f) = r_1 + r_2 \cdot g(a_1 \cdot x_f + a_2 \cdot y_f + a_0, b_1 \cdot x_f + b_2 \cdot y_f + b_0) - f(x_f, y_f)$$

**Formel 3-4: Verbesserungsgleichungen der Kleinsten Quadrate Methode
[nach Heipke 1990, S.13]⁵**

Dabei ist:

- $f(x_f, y_f)$: Intensitätswert des Pixels (x_f, y_f) der Mustermatrix,
- $g(x_g, y_g)$: Intensitätswert des Pixels (x_g, y_g) der Suchmatrix,
- r_1 : Helligkeitsverschiebung,
- r_2 : Kontraststreckung.

Zur korrekten Punktzuordnung mittels der Methode der kleinsten Quadrate sind ausreichend genaue Näherungswerte für die zu schätzenden Parameter notwendig, da die realisierte Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen dies verlangt [vgl. Pelzer 1985, S.79f]. Insbesondere die Parameter der Translation a_0 und b_0 müssen vorgegeben sein. Die verbleibenden Parameter können durch vorgegebene Standardwerte abgeschätzt werden. Dies können etwa folgende Werte sein: $a_1 = b_2 = r_2 = 1$ und $a_2 = b_1 = r_1 = 0$.

In der Regel wird die Kleinste-Quadrate-Methode iterativ angewendet. Die verbesserten Parameter eines Durchganges gehen als Näherungswerte in den nächsten ein. Wichtig für die iterative Vorgehensweise ist die Formulierung von Qualitätskriterien (z.B. Quadratsumme der Verbesserungen unterschreitet eine Signifikanzgrenze) und Abbruchbedingungen (z.B. maximale Anzahl zulässiger Iterationen oder Erfüllung des Qualitätskriteriums) [vgl. Schenk 1999, S.263].

3.3 Auswahl des geeigneten Verfahrens

In dieser Diplomarbeit wird das Programm DPCOR zur digitalen Bildzuordnung mittels Kleinsten-Quadrate-Methode verwendet. Verschiedene Arbeiten mit diesem Programm

⁵ Die Koordinaten $(x_g, y_g) = (a_1 \cdot x_f + a_2 \cdot y_f + a_0, b_1 \cdot x_f + b_2 \cdot y_f + b_0)$ sind in der Regel keine ganzen Zahlen. Der Intensitätswert $g(x_g, y_g)$ muss daher durch *Resampling* aus der Umgebung von $g(x_g, y_g)$ entnommen werden. *Resampling* ist dabei die Neuberechnung von Bildelementen und deren Intensitätswerten nach zum Beispiel geometrischen Transformationen des Bildes. Man unterscheidet die Arten des *Resampling* nach den verschiedenen Methoden der Interpolation (z.B. linear, bi-linear) zur Berechnung der neuen Intensitätswerte [vgl. Schenk 1999, S.64].

[vgl. Santel 2001; Vennegeerts 2001; Groß de Wente 2001] demonstrierten Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Programms. Die Anwendbarkeit des Programms zur Bestimmung von Wasseroberflächen wurde darüber hinaus durch [Redweik 1993] nachgewiesen.

Das Programm DPCOR und andere in dieser Arbeit verwendete Soft- und Hardware werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4 Soft- und Hardware

4.1 Hardware

Ein Teil des verwendeten Aufnahmesystems wurde bereits in Abschnitt 2.1 erläutert. Im Folgenden soll die Rechentechnik erläutert werden, die zur Aufnahme, Speicherung und anschließender Weiterverarbeitung verwendet wurde.

Jede der vier Kameras wird mit je einem Aufnahme-PC über eine Framegrabber-Karte verbunden. Diese vier PCs steuern die Kameras und speichern die von den Kameras erzeugten hochauflösenden Videos. Die große Menge an Daten, die in Echtzeit auf die Festplatten gesichert werden muss, erfordert dafür speziell optimierte Rechentechnik. Die PCs sind deshalb mit einem RAID-Controller⁶ ausgerüstet, mit dessen Hilfe pro PC zwei der drei installierten Festplatten zu einem *Striping Array* zusammen gefasst sind. Dies führt zu einer im Vergleich zu den einzelnen Festplatten nahezu verdoppelten Lese- und Schreibgeschwindigkeit der Speichermedien. Alle vier Aufnahmecomputer wurden mit Breitband-Netzwerktechnik (100 MBit/s) und einer mit einem CD-Brenner zur Datensicherung ausgerüstet. Die übrigen Komponenten dieser Aufnahme-PCs sind mit einem handelsüblichen Rechner vergleichbar: Pentium III Prozessor mit 850 MHz, 256 MByte Arbeitsspeicher und ein einfaches Desktop-Grafiksystem mit 15-Zoll-Monitor.

Weiterhin wurde ein Computer zur weiterführenden Bearbeitung der Bildsequenzen genutzt. Dieser besitzt keine Framegrabber-Karte und wird zukünftig als Arbeitsrechner oder Arbeits-PC bezeichnet. Der Arbeitsrechner ist wie folgt aufgebaut: Pentium III Celeron Prozessor mit 700 MHz, 512 MByte Arbeitsspeicher, RAID-Controller mit zwei als *Striping Array* konfigurierten Festplatten, Breitband-Netzwerkanschluss, CD-Brenner und 19-Zoll-Monitor. Aufgrund der verwendeten Bildzuordnungssoftware war es erforderlich, den Arbeits-PC in erhöhtem Umfang mit Arbeitsspeicher auszustatten.

⁶ RAID (engl. *Redundant Array of Inexpensive Disks*) ist eine Methode, bei der Daten über mehrere zu einem virtuellen Datenträger zusammengefasste Speichermedien verteilt werden. Man unterscheidet fünf verschiedene RAID- Modi. Der RAID- Modus 0 (*Striping*) führt bei nahezu gleich bleibender Zugriffsgeschwindigkeit zu einer Addition der Lese- und Schreibbandbreiten der verwendeten Festplatten [vgl. Neuffer 2002].

4.2 Software

4.2.1 Kamerasteuerung und Videoaufnahme mit MotionBLITZ

Das Aufnahmesystem, das aus den vier Aufnahme-PCs, den Kameras und dem externen Trigger besteht, wird um die Software MotionBLITZ ergänzt. Mit ihr werden die Kameras konfiguriert und zur Aufnahme vorbereitet. MotionBLITZ ermöglicht es, dass die von den vier Kameras aufgenommenen Videos von den Framegrabber-Karten mitgeschnitten und auf den RAID-Festplatten gespeichert werden.

Das zur Speicherung verwendete Video⁷-Dateiformat ist herstellerspezifisch ausgelegt. Die Videos werden daher mit einer von MotionBLITZ zur Verfügung gestellten Funktion in Einzelbilder zerlegt und als BMP⁸-Bilder abgespeichert. Dabei werden die 10-Bit-Graubilderfolgen der Videos (vgl. Abschnitt 2.1) in ein 8-Bit-Grauwertformat umgesetzt.

Alle Bilder eines Videos bilden eine Bildsequenz⁹. Die Einzelbilder sind durchgehend nach der zeitlichen Folge nummeriert. Die Dateinamen der Einzelbilddateien (z.B. „Norderney42.bmp“) setzen sich dabei aus einem vor dem Speichern festzulegendem Stammnamen (hier „Norderney“), der fortlaufenden Nummer des Bildes innerhalb des Videos (hier „42“) und der formattypischen Dateinamensendung (hier „.bmp“) zusammen.

Alle Bildsequenzen der vier Kameras werden nach Abschluss der Aufnahmen per Netzwerk auf den PC, der mit CD-Brenner ausgestattet ist, zur anschließenden Sicherung auf CD-ROM übertragen.

⁷ Normdefinition Video: Ein Video ist eine Serie von Bildern, welche in einem kontinuierlichen Strom von Einzelaufnahmen mit einer Kamera aufgezeichnet wurden. Alle Bilder eines Videos sind dabei gemäß ihrer chronologischen Reihenfolge in ein und derselben Videodatei gespeichert.

⁸ BMP: Das BMP- (Bitmap)- Dateiformat für Bilder speichert die Bildinformationen in Matrixform Zeile für Zeile ab. Dabei ist die Zeilenreihenfolge invertiert. Das bedeutet, der Bildkoordinaten- Ursprung ist links unten anstatt, wie üblich bei Bildern, links oben. Das BMP- Format beinhaltet bildspezifischen Informationen wie Größe, Auflösung und Farbmodell des Bildes in einem der Matrix vorangestelltem Prolog (engl. *Header*).

⁹ Normdefinition Bildsequenz: Eine Bildsequenz ist eine Serie von Einzelbilddateien, die gemäß der zeitlichen Reihenfolge ihrer Aufnahme nummeriert sind. Die Bildnummer ist im Dateinamen eindeutig festzuhalten und sollte der Nummer des Bildes in dem ursprünglichen Video entsprechen.

4.2.2 Vorverarbeitung der Bildsequenzen mit dem Bildbearbeitungsprogramm Jasc Paint Shop Pro

Die später in diesem Abschnitt vorgestellte Bildzuordnungssoftware DPCOR stellt klare Anforderungen an ihren Dateninput. So müssen etwa alle Bilddateien im RAW¹⁰-Format vorhanden sein. Die von den Sicherungs-CD-ROMs auf den Arbeits-PC kopierten Bildsequenzen liegen aber im BMP-Format vor. Das in der Bildbearbeitungssoftware Paint Shop Pro der Firma Jasc Software Inc. [vgl. Jasc 2002] integrierte Konvertierungstool wird dazu genutzt, die BMP-Dateien in RAW-Dateien im Rahmen eines automatischen Prozesses umzuwandeln.

Paint Shop Pro dient weiterhin der ersten Sichtung des Bildmaterials.

4.2.3 Bildpunktmessung mit DPLX und Bildpunkt-Dateiformate

DPLX stellt eine Oberfläche für das kombinierte Arbeiten mit dem Programm DPCOR und dem Programmsystem BLUH des Institutes für Photogrammetrie und GeoInformation dar [vgl. Jacobsen 1996]. Zusätzlich beinhaltet es Module zur semi-automatischen und manuellen Bildpunktmessung [vgl. Jacobsen 1996, S.8].

DPCOR wird für die Bildzuordnung verwendet, wozu Startpunkte notwendig sind. Diese Startpunkte können durch Punktmessung mit dem dafür am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation entwickelten Programm DPLX bestimmt werden. Die gemessenen Startpunkte werden in dem textbasierten Monoformat abgespeichert. Werden homologe Punkte in zwei Bildern gemessen, dann können diese zu dem zu DPCOR kompatiblen textbasierten Stereoformat zusammengefasst werden.

Verwendete, textbasierte Datenformate

Für die Datenspeicherung werden die durch das Programmsystem BLUH definierten Prinzipien der Datenspeicherung genutzt [vgl. Jacobsen 1996, S.10f]. Das gilt sowohl für das von DPLX erzeugte Mono- und Stereoformat als auch für das Bildzuordnungsprogramm DPCOR.

¹⁰ RAW steht für Rohdatenformat. Die Bildinformationen sind ähnlich dem BMP-Format in Matrixform gespeichert. Dem RAW-Bildformat fehlen allerdings die Informationen über Größe, Auflösung und Farbmodell des Bildes. Es ist also zum Lesen der Bilder explizites Wissen notwendig. Bei den in dieser Arbeit verwendeten RAW-Bilddateien handelt es sich um 8-Bit-Graubilder als Einzelbilder der Bildsequenzen oder um 24-Bit-RGB-Farbbilder als Ergebnis einer Visualisierung.

Die Notation der Bildpunktinformationen erfolgt in dem angesprochenen textbasierten Monoformat in der Form (Punktnummer, x-Koordinate, y-Koordinate). Im Stereoformat werden in zwei Bildern homologe Bildpunkte in der Notation (Punktnummer, x-Koordinate im ersten Bild, y-Koordinate im ersten Bild, x-Koordinate im zweiten Bild, y-Koordinate im zweiten Bild) abgelegt. Sowohl im Mono- als auch im Stereoformat werden die Daten textbasiert und nicht binär gesichert. Dies verursacht einen erhöhten Speicherplatzbedarf, schafft aber zusätzliche Transparenz, da textbasierte Daten einfach gelesen und editiert werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit kommen noch weitere textbasierte Formate zum Einsatz. Sie alle sind ähnlich aufgebaut, beinhalten aber im Vergleich zum Mono- und Stereoformat andere Daten, oder folgen einer anderen Notation.

4.2.4 Digitale Bildzuordnung mit DPCOR

Das zur digitalen Bildzuordnung verwendete Programm DPCOR basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate und des *Region Growing* [vgl. Otto 1989]. Auf die Kleinste-Quadrate-Methode der digitalen Bildzuordnung wurde bereits in Abschnitt 3.2.2 eingegangen. Sie verlangt hinreichende Näherungswerte für die berechneten Parameter. Vor allem die Näherungswerte für die Translationen in beide Koordinatenrichtungen a_0 und b_0 sind von Bedeutung (vgl. Formel 3-2 auf Seite 19). Die Translationen a_0 und b_0 werden DPCOR in Form von so genannten Startpunkten in einer Punktdatensatz im Stereoformat übergeben.

Das *Region Growing* geht von einem in zwei Bildern homologen Startpunkt aus. Anhand dieses Startpunktes erfolgt eine erste Zuordnung nach der Kleinsten-Quadrate-Methode. Ergebnisse sind die exakten Positionen der Punkte in beiden Bildern und die Transformationsparameter zwischen Muster- und Suchmatrix. Das Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate wird dabei iterativ angewendet bis sich die berechneten Parameter nur noch unwesentlich im Vergleich zum letzten Iterationsschritt verändern. Die Iteration konvergiert so auf die zu bestimmende Lösung der Punktzuordnung. Die Muster- und Suchmatrix werden nun um eine festzulegende Schrittgröße nach oben, rechts, links und unten verschoben (vgl. Abbildung 4-1). Die Positionen der Muster- und Suchmatrix stellen vier neue Näherungswertepaare dar. [vgl. Heipke 1993, S.126]

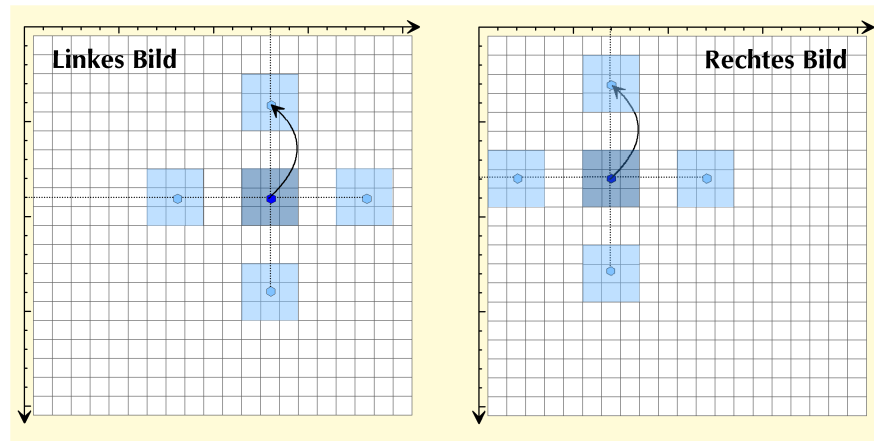


Abbildung 4-1: Verschieben der Muster- und Suchmatrix beim *Region Growing*

Mit Hilfe dieser vier neuen Muster- und Suchmatrizen werden neue Zuordnungen nach der Methode der kleinsten Quadrate vollzogen, die als erfolgreich gewertet werden, wenn nach [Heipke 1993, S.126] folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die zur Punktzuordnung notwendige Iterationen überschreitet nicht eine maximale Anzahl (z.B. 10).
- Der Korrelationskoeffizient für das Ähnlichkeitsmaß weist ein festzulegendes Mindestmaß auf (z.B. 0,8).
- Der Unterschied der exakten Position zum Näherungswert ist kleiner als ein festzulegendes Toleranzmaß (z.B. 4 Pixel).

Durch die Verschiebung der Such- und Mustermatrix werden die Translationsparameter a_0 und b_0 verändert. Alle anderen Parameter, die Ergebnis der ursprünglichen Punktzuordnung vor der Verschiebung waren, wurden als Näherungswerte für die vier Punktzuordnungen nach der Verschiebung ohne Veränderung übernommen. Dieser Verfahrensweise liegt die Überlegung zugrunde, dass sich die Parameter von benachbarten Punkten nur unwesentlich unterscheiden, wenn die abgebildete Objektoberfläche hinreichend glatt ist [vgl. Otto 1989]. In Anlehnung an [vgl. Vennegeerts 2001, S.53] wird in der folgenden Abbildung das Prinzip des *Region Growing* in DPCOR schematisch dargestellt:

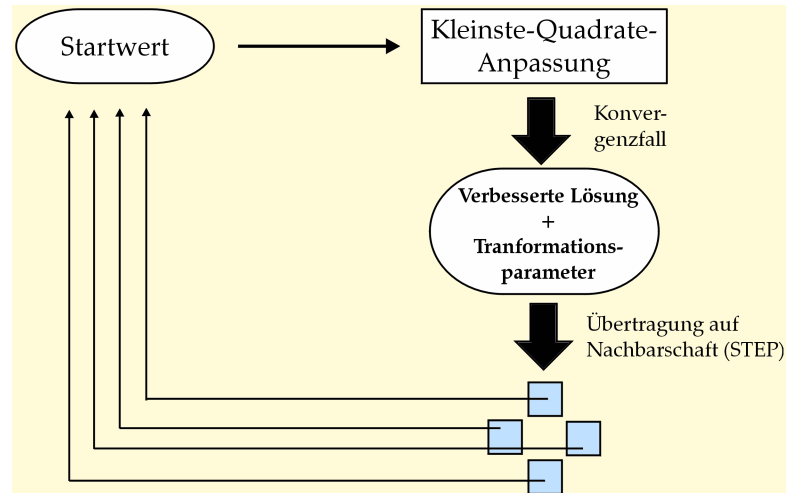


Abbildung 4-2: Prinzip des *Region Growing* in DPCOR
[nach Vennegeerts 2001, S.53]

Wie in Abbildung 4-2 verdeutlicht, werden die durch Verschiebung erhaltenen Positionen bei erfolgreicher Punktzuordnung als neue Startpunkte für ein weiteres *Region Growing* verwendet. Dieser Algorithmus ist so bemüht, den gesamten Bildraum mit homologen Punkten zu bedecken.

Für eine detailliertere Auseinandersetzung mit der dargestellten Verfahrensweise sei auf [IPI 2000] und auf [Heipke 1993] verwiesen.

4.2.5 Übergang in den dreidimensionalen Objektraum mit BLUH

Das Ziel der Zuordnung von digitalen Bildern ist die Ermittlung von homologen Punkten, die dann der dreidimensionalen Modellierung des Objektraumes dienen. Ermittelte homologe Bildpunkte in korrespondierenden Bildern können durch Vorwärtseinschneiden¹¹ mit Hilfe von Teilen des Programmsystems BLUH vom zweidimensionalen Bildraum in den dreidimensionalen Objektraum überführt werden [vgl. Jacobsen 1996].

¹¹ Homologe Bildpunkte mehrerer Bilder repräsentieren von den Kamerastandpunkten ausgehende Raumstrahlen zu einem Objektpunkt. Mittels des räumlichen Vorwärtsschnittes werden die Raumrichtungen zum Schnitt gebracht und bestimmen so die dreidimensionale Lage des Objektpunktes [vgl. Luhmann 2000, S.314].

4.2.6 Rasterung und Interpolation von geo-kodierten Daten mit Golden Surfer

Das Programm Golden Surfer der Firma Golden Software Inc. ist ein Visualisierungsprogramm für Ingenieure und Wissenschaftler. Die genutzte Version 8 des Programms bietet unter anderen folgende Möglichkeiten [vgl. Golden 2002a]:

- Rasterung von geo-kodierten Daten und Interpolation in diese Raster,
- Visualisierung geo-kodierter Daten als Isolinienkarten,
- Dreidimensionale Oberflächendarstellungen,
- Darstellungen von Vektorfeldern und
- Hinterlegung von Basiskartenmaterial und Darstellung von Symbolen und Bezeichnungen.

In der hier vorliegenden Arbeit wird Golden Surfer zum Rastern und Interpolieren sowie zur Visualisierung des Datenmaterials genutzt.

Vom Programm werden verschiedene Rastermethoden bereitgestellt. Hierbei handelt es sich beispielsweise um *Kriging*, *Inverse Distance to a Power* und *Modified Shepard's Method* [vgl. Golden 2002b].

4.2.7 Verwendung der Programmiersprachen Perl und Java zur Automatisierung und Visualisierung

Im Hinblick auf die Struktur der zu verarbeitenden Daten als textbasierte Punktinformationen oder binäre Bilddateien wurden die Entwicklungsplattformen Perl und Java verwendet und miteinander verknüpft.

Verarbeitung textbasierter Daten mit Perl

Die zu leistende Entwicklungsarbeit orientiert sich an dem in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten textbasierten Dateiformaten. Die Programmiersprache Perl¹² wurde als Zusammenfassung der positiven Eigenschaften der Programmiersprachen C, Pascal und verschiedener Shellskript-Sprachen konzipiert [vgl. Petter 1998, S.11; Schwartz, 1998, S.2].

Perl eignet sich zur Manipulation von textbasierten Daten [Petter, 1998, S.11]. Es findet weite Verbreitung für automatisch ablaufende Aufgaben im Bereich der Computer- und Netzwerkadministration. Perl-basierte CGI¹³-Skripte für HTML¹⁴-Seiten im Internet haben sich als Standard etabliert und durchgesetzt [vgl. Johnson 2001, S.15].

Perl stellt aufgrund seiner Stärken in der Textmanipulation ein geeignetes Mittel zur Automatisierung der Bildsequenzzuordnung auf der Grundlage von DPCOR dar.

Verarbeitung binärer Bilddaten mit Java

Die Verarbeitung der binären Bildinformationen erfolgt mit der Programmiersprache Java¹⁵. Hierbei kommt das Java SDK¹⁶ Version 1.4 in Verbindung mit der Bibliothek JAI¹⁷ Version 1.1 der Firma Sun zum Einsatz. Java bietet vorgefertigte Arbeitsabläufe zur automatischen Bildbearbeitung einzusetzen. Frei verfügbare Programmsysteme wie ImageJ¹⁸ demonstrieren eindrucksvoll das Potential von Java im Bereich der

¹² Perl steht nach seinem Entwickler, Larry Wall, für "*Practical Extraction and Report Language*" (frei übersetzt: Praktische Extraktions- und Berichtssprache) oder auch für *Pathologically Eclectic Rubbish Lister* (frei übersetzt: Krankhaft auswählendes Abfallauflistungsprogramm) [vgl. Schwartz, 1998, S. 1].

¹³ CGI (*Common Gateway Interface*) erlaubt interaktive Kommunikation zwischen Anwender und Anbieter im Internet (speziell im World Wide Web) [vgl. NCSA 1998; Connolly, 1999].

¹⁴ HTML (Hypertext Mark-up Language) ist die nach ISO/IEC 15445:2000 standardisierte Sprache zum Verfassen von interaktiven Texten (Hypertext) zur Veröffentlichung im Internet [vgl. W3C 08/2002].

¹⁵ Java ist eine objektorientierte Programmiersprache [vgl. Sun Microsystems 2002a].

¹⁶ Java SDK (engl. *Java Source Development Kit*) stellt die von der Firma Sun zur Verfügung gestellte Standardentwicklungsplattform für Java dar [vgl. Sun Microsystems 2002a].

¹⁷ Die Bibliothek JAI (engl.: *Java Advanced Imaging*) erweitert Java um eine Vielzahl von Bildmanipulationsfähigkeiten [vgl. Sun Microsystems 2002b].

¹⁸ ImageJ ist ein von Wayne Rasbund vom National Institut of Mental Health entwickeltes, auf Java basierendes, frei verfügbares Bildbearbeitungsprogramm.

Bildmanipulation. Java bildet somit auch für diese Arbeit eine geeignete Entwicklungsumgebung der automatischen Bildverarbeitung.

5 Entwicklung eines Ansatzes zur automatischen Zuordnung von digitalen Bildsequenzen

Es sollen von zwei Kameras synchron erstellte Bildsequenzen einander zugeordnet werden. Dies soll auf der Basis von digitaler Bildzuordnung der Einzelbilder nach der Methode der kleinsten Quadrate mit der Software DPCOR geschehen.

Die Methode der kleinsten Quadrate erfordert hinreichend genaue Näherungswerte für die Position von homologen Punkten (vgl. Abschnitt 3.2.2; vgl. Abschnitt 4.2.4). Dem Programm DPCOR werden diese Näherungswerte in Form von Startpunkten zur Verfügung gestellt.

Für die Bildzuordnung einer geringen Anzahl von Bildern ist die manuelle Bestimmung dieser Startpunkte (z.B. mit dem Bildmessprogramm DPLX) möglich. Die Anzahl der Bilder der im Rahmen des Projektes WAVESCAN entstehenden Bildsequenzen erfordert jedoch die automatische Bestimmung der Startpunkte, da eine manuelle Messung nicht rationell wäre [vgl. Strybny/ Wegmann 2000, S.10].

Zu diesem Zweck ist es notwendig, menschliches Wissen und menschliche Fähigkeiten, die bei den manuellen Messungen der Startpunkte zum Einsatz kommen, durch einen geeigneten Algorithmus zu ersetzen. Nachbildung von menschlichen Fähigkeiten und menschlichem Wissen durch Algorithmen und Datenstrukturen ist nicht trivial. Ihr widmen sich die Forschungsbereiche der künstlichen Intelligenz (*Artificial Intelligence*) und des Computersehens (*Computer Vision*).

Ein bereits existierender Ansatz zur Bildsequenzzuordnung wird im folgenden Absatz vorgestellt.

5.1 Ein gegebener Ansatz: Statische Fortschreibung der Punktpositionen

Das Verfahren der statischen Fortschreibung der Punktpositionen beruht auf der Annahme, dass die Bewegungen der Wassermassen zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten so klein sind, dass sie vernachlässigt werden können.

Aus diesem Grund können homologe Punkte einer erfolgreichen Zuordnung eines Bildpaares¹⁹ des Zeitpunktes T_i als Startpunkte für eine darauffolgende Zuordnung des Bildpaares des Zeitpunktes T_{i+1} verwendet werden. Da die Bewegungen abgebildeter Wassermassen unberücksichtigt bleibt, soll von statischer Fortschreibung der Punktpositionen gesprochen werden.

Erste manuelle Tests dieser Verfahrensweise mit kurzen Ausschnitten der Bildsequenzen zeigten, dass eine Anzahl von Startpunkten nicht durch DPCOR zugeordnet werden kann, da die tatsächlich stattfindenden Punktbewegungen zwischen den Zeitpunkten T_i und T_{i+1} vernachlässigt wurden. Dieser Verlust an Startpunkten wird jedoch durch deren große Gesamtanzahl der Startpunkte kompensiert [vgl. Santel 2002, S.3].

Zur Realisierung einer automatischen Zuordnung der gesamten Sequenzen soll im nächsten Abschnitt ein Verfahren entwickelt werden, das die Dynamik der Wassermassen modelliert und diese Modelle zur Fortschreibung von Punktpositionen gebraucht.

5.2 Entwicklung eines Verfahrens basierend auf der dynamischen Fortschreibung von Punktpositionen

5.2.1 Entwurf einer dynamischen Punktfortschreibung

Aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Bilder jeder Bildsequenz nacheinander, mit konstantem Zeitintervall, von der gleichen Kamera und mit konstanter innerer und äußerer Orientierung aufgenommen wurden, kann man die Bewegung von Objektpunkten – und somit auch die Bewegung ihrer zweidimensionalen Abbilder in den Aufnahmen – während dieser Zeitintervalle kinematisch modellieren. Ein simples kinematisches Modell stellt die lineare Approximation und Extrapolation für kleine Zeiträume dar.

Dabei ist es unverzichtbar, die durch die Approximation bedingten Fehler aufzudecken und zu eliminieren. Eine Aufsummierung der Ungenauigkeiten mit fortlaufender Zeit wird so vermieden.

¹⁹ Bilder eines Zeitpunktes verschiedener Kameras wurden zu Bildpaaren zusammengefasst.

Im Rahmen der weiteren Erörterung des Algorithmus wird auf die in Tabelle 5-1 formulierten Begriffe, Definitionen und Symbole zurückgegriffen, um dieses zentrale Thema der Arbeit möglichst verständlich darzustellen. Dabei beziehen sich Indizes in Klammern auf Zeitintervalle und ohne Klammern auf Zeitpunkte.

<i>Größe und Synonyme</i>	<i>Definition</i>	<i>Symbol und Zusammenhänge</i>
Zeitpunkt (lat. Tempus)	Zeitpunkt Nr. i ist das sehr kurze Zeitintervalls der Bildbelichtung durch die Kamera (z.B. 0,8 ms). Bilder gleichen Zeitpunktes werden als synchron bezeichnet.	T_i
Zeitabschnitt, Zeitschritt, Zeitintervall (lat. Æra)	Zeitabschnitt Nr. i ist der zeitliche Raum zwischen den Zeitpunkten T_i und T_{i+1} .	$\mathcal{Æ}_{(i)} = T_{i+1} - T_i$
Bild	Mit Bild Nr. i ist die Einzelaufnahme des Zeitpunktes i im allgemeinen (B), der linken (L) bzw. rechten (R) Bildsequenz gemeint.	B_i, L_i bzw. R_i
Zuordnung (lat. coniunctio)	.. ist die Verknüpfung zweier Bilder durch homologe Punkte. Diese Verknüpfung erfolgt durch das Programm zur automatischen Bildzuordnung DPCOR (vgl. Abschnitt 3.2.2, 4.2.4).	C
Bewegungszuordnung, Bewegungsbildzuordnung	.. des Zeitschrittes Nr. (i) ist die Zuordnung von den Bildern einer Kamera der Zeitpunkte Nr. i und Nr. $i+1$. Es wird unterschieden nach Kamera links (L) bzw. rechts (R).	$C_{L_{i+1}}^{L_i}$ bzw. $C_{R_{i+1}}^{R_i}$
Stereozuordnung, Stereo bildzuordnung	Der Begriff Stereozuordnung wird für die Zuordnung des linken und rechten Bildes eines Zeitpunktes i .	$C_{R_i}^{L_i}$
Startpunktmenge (vor = lat. ante)	Eine Startpunktmenge ist eine Liste von genäherten Punktpositionen homologer Punkte.	$a_{L_{i+1}}^{L_i}, a_{R_{i+1}}^{R_i}$ und $a_{R_i}^{L_i}$
Ergebnispunktmenge (nach = lat. post)	Eine Ergebnispunktmenge ist eine Liste DPCOR bestimmten, genauen Punktpositionen homologer Punkte.	$p_{L_{i+1}}^{L_i}, p_{R_{i+1}}^{R_i}$ und $p_{R_i}^{L_i}$
Unregelmäßiges Bewegungsmodell	Aus einer Ergebnispunktmenge einer Bewegungszuordnung lassen sich für alle Punkte dieser Punktmenge zweidimensionale Bewegungsvektoren ableiten. Alle Vektoren und ihre Ursprünge, also die unregelmäßig verteilten Punktpositionen im ersten Bild der Bewegungszuordnung, sind ein Vektorfeld. Dieses Vektorfeld wird als unregelmäßiges Bewegungsmodell bezeichnet.	$UBM_{(i)}^L$ bzw. $UBM_{(i)}^R$
Regelmäßiges Bewegungsmodell	Durch Rasterung der Koordinatenkomponenten der Vektoren eines UBM ergibt sich ein regelmäßiges Bewegungsmodell.	$RBM_{(i)}^L$ bzw. $RBM_{(i)}^R$

Tabelle 5-1: Begriffe und Symbole der Algorithmusbeschreibung

5.2.2 Entwurf des Algorithmus

Gesetztes Ziel ist es, die Ergebnisse einer Stereobildzuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ eines Bildpaares des Zeitpunktes T_i als Grundlage zur Initiierung der darauffolgenden Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ zu nutzen. Zu diesem Zweck wird die Bewegung der abgebildeten Objekte, hier Wasseroberflächen, während des Zeitschrittes $\mathcal{E}_{(i)} = T_{i+1} - T_i$ analysiert und mathematisch modelliert.

Die daraus entwickelten Bewegungsmodelle werden zur Ermittlung der Startpunktmengen $a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ aus den Ergebnispunktmengen $p_{R_i}^{L_i}$ der Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ genutzt. Erst diese ermittelten Startpunkte $a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ ermöglichen die nächste Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$.

5.2.3 Bewegungszuordnungen

Nachfolgend soll die prinzipielle Vorgehensweise beschrieben werden, die es ermöglicht, alle Bilder einer Bildsequenz einer Kamera mittels Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate zu verknüpfen. Ergebnisse sollen Ergebnispunktmengen von homologen Punkten zwischen jeweils zeitlich benachbarten Bildern sein. Aus diesen lassen sich Modelle der Punktbevewegung – im Folgenden als Bewegungsmodelle bezeichnet – im Bildraum von Bild zu Bild ableiten.

Voraussetzung ist eine vollständige Bildsequenz einer Kamera. Die Bilder B_i dieser Sequenz wurden mit einem konstanten und hinreichend kurzem zeitlichen Abstand $\mathcal{E}_{(i)} = T_{i+1} - T_i$ aufgenommen (vgl. Abschnitt 2.1).

Es sei angenommen, dass eine Ergebnispunktmenge $p_{B_{i+1}}^{B_i}$ der Bewegungszuordnung $C_{B_{i+1}}^{B_i}$ einer Bildsequenz vorliegt²⁰. Da die Bilder B_i und B_{i+1} einer Bildsequenz von der gleichen Kamera zu zwei direkt aufeinander folgenden Zeitpunkten T_i und T_{i+1} aufgenommen wurden, repräsentieren die Positionsunterschiede der homologen Punkte zwischen den beiden Bildern den Verschiebungsvektor für den Zeitschritt $\mathcal{E}_{(i)}$ der zugehörigen Objektpunkte projiziert in den Bildraum (vgl. Formel 5-1).

²⁰ mit $i = 2..n$ und n als Anzahl Bilder pro Sequenz

$$\vec{v}_{(i)} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}_{(i)} = \vec{x}_{i+1} - \vec{x}_i = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} - \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i$$

Formel 5-1 Bewegungsvektor v eines Punktes

Dabei ist:

- $\vec{v}_{(i)}$ der Verschiebungsvektor eines Punktes der Ergebnispunktmenge $p_{B_{i+1}}^{B_i}$ für den Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$,
- \vec{x}_i der Ortsvektor bzw. die Position dieses Punktes zum Zeitpunkt T_i , also vor dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$,
- \vec{x}_{i+1} der Ortsvektor dieses Punktes zum Zeitpunkt T_{i+1} , nach dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$.

Alle Verschiebungsvektoren bilden ein zweidimensionales Vektorfeld, welches im Weiteren als unregelmäßiges Bewegungsmodell $UBM_{(i)}$ bezeichnet werden soll. Abbildung 5-1 zeigt ein solches Vektorfeld dargestellt auf dem dazugehörigen Bild.

Das Vektorfeld erstreckt sich über nahezu den gesamten Bildraum. Es wird vorausgesetzt, dass das Zeitintervall $\mathcal{A}_{(i)}$ zwischen einer Aufnahme B_i und seinem Nachfolger B_{i+1} hinreichend kurz ist, um die Objektbewegung detailliert erfassen zu können, und gleich groß dem folgende Zeitintervall $\mathcal{A}_{(i+1)}$.

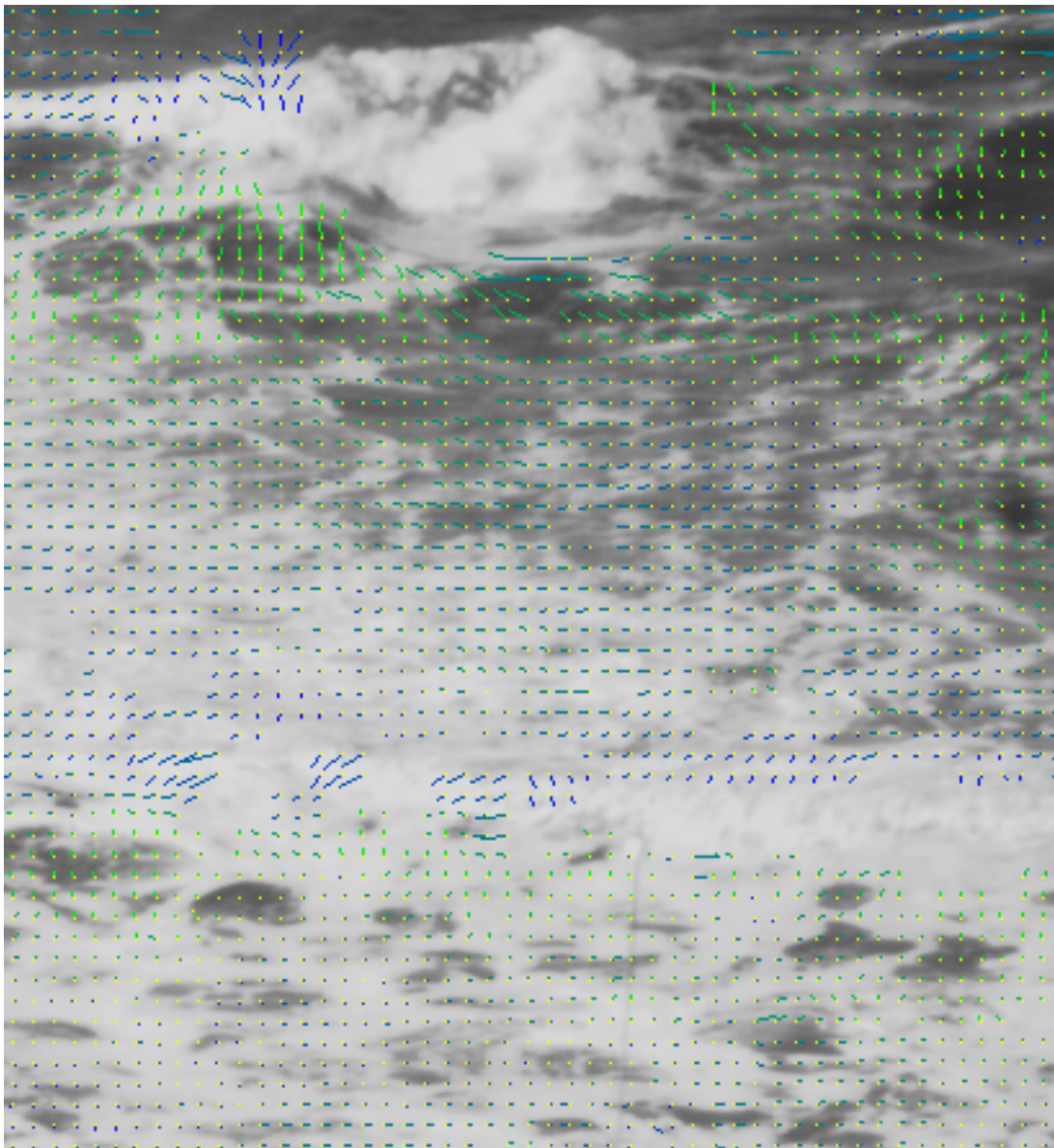


Abbildung 5-1: Zweidimensionale Punktbewegungen im Bildraum²¹

Aufgrund dieser erfüllten Bedingungen wird von einer in Betrag und Richtung gleichförmigen und geradlinigen Bewegung ausgegangen. Deshalb ist es möglich, die

²¹ Punktbewegungen sind in Vektorform als Linie dargestellt. Die Linie beginnt an dem als gelben Pixel wiedergegebenen Punkt, zu welchem die Bewegung zugeordnet ist. Die Farbe des Vektors ist von dessen Richtung im Bildraum abhängig. Zeigt der Vektor zum unteren Bildrand (in den vorliegenden Daten annähernd in Richtung Strand), ist er blau. Zeigt er zum oberen Rand (in den vorliegenden Daten Richtung offenes Meer), wird er grün dargestellt. Alle Richtungen zwischen diesen Extrema sind als Nuancen dieser beiden Farben dargestellt.

Position eines Punktes zum Zeitpunkt T_{i+2} aus der einfachen Extrapolation des Bewegungsvektors $\overrightarrow{v_{(i)}}$ zu ermitteln (vgl. Formel 5-2).

$$\overrightarrow{x_{i+2}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+2} = \overrightarrow{x_{i+1}} + \overrightarrow{v_{(i)}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}_{(i)}$$

Formel 5-2: Prädiktion einer Punktposition durch lineare Extrapolation

Dabei ist:

- $\overrightarrow{v_{(i)}}$ der Verschiebungsvektor des Punktes für den Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$, welcher als Näherung für den Verschiebungsvektor $\overrightarrow{v_{(i+1)}}$ des folgenden Zeitschrittes $\mathcal{A}_{(i+1)}$ dient,
- $\overrightarrow{x_{i+1}}$ der Ortsvektor des Punktes zum Zeitpunkte T_{i+1} also vor dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i+1)}$ bzw. nach dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$
- $\overrightarrow{x_{i+2}}$ der Ortsvektor des Punktes nach dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i+1)}$.

Das Ergebnis ist eine große Auswahl von Punkten, deren Positionen jeweils für Bild B_i und Bild B_{i+1} mit DPCOR-Genauigkeit und Zuverlässigkeit bekannt sind. Die Positionen der gleichen Punkte wird für den Zeitpunkt T_{i+2} geschätzt. Für die Bildzuordnung $C_{B_{i+2}}^{B_{i+1}}$ kann ein ausgewählter Teil dieses Ergebnisses als Startpunktmenge $a_{B_{i+2}}^{B_{i+1}}$ dienen. Die Zuordnung $C_{B_{i+2}}^{B_{i+1}}$ liefert nun eine neue Ergebnispunktmenge $p_{B_{i+2}}^{B_{i+1}}$ mit wiederum DPCOR-Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Startpunkte, die erfolgreich zugeordnet werden können, erhalten nach der Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung verbesserte Koordinaten (vgl. Abschnitt 3.2.2). Somit werden die durch die Gleichförmigkeits- und Linearitätsapproximationen erzeugten Ungenauigkeiten eliminiert und nicht fortgeschrieben.

Anhand der vorangegangenen Argumentation ist erkennbar, dass eine Bildzuordnung $C_{B_{i+2}}^{B_{i+1}}$ genau dann möglich ist, wenn die vorherige Zuordnung $C_{B_{i+1}}^{B_i}$ ebenfalls erfolgreich war.

Die erste Zuordnung $C_{B_2}^{B_1}$ erfolgt mit Hilfe von manuell gemessenen Startpunkten $a_{B_2}^{B_1}$. Somit ist eine Induktionskette vom ersten bis zum letzten Bild der Sequenz erzeugt worden. Die Resultate sind Ergebnispunktmenge für alle Bewegungszuordnungen sowie unregelmäßige Bewegungsmodelle im Bildraum für jeden Zeitschritt der Sequenz. Mit anderen Worten: Alle Bilder der Sequenz wurden jeweils mit dem nächsten zeitlichen Nachbarn durch homologe Punkte verknüpft.

Die unregelmäßigen Bewegungsmodelle UBM werden durch Rasterung in regelmäßige Bewegungsmodelle RBM überführt.

Die Bewegungszuordnungen haben innerhalb der linken und innerhalb der rechten Bildsequenz unabhängig voneinander zu erfolgen. Anschließend liegen dann regelmäßige Bewegungsmodelle für die nun folgenden Stereozuordnungen vor.

5.2.4 Stereozuordnungen

Das Ziel des gesamten Algorithmus ist es neben der Verknüpfung von Bildern einer Sequenz vordergründig die Bildzuordnung zwischen synchronen Bildern verschiedener Sequenzen des gleichen Objektraumes zu etablieren.

Es soll daher aufgezeigt werden, dass die Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ eines beliebigen Zeitpunktes T_{i+1} möglich ist, wenn die vorherige Stereobildzuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ des Zeitpunktes T_i erfolgreich war, und regelmäßige Bewegungsmodelle (RBM) im Bildraum für den Zeitschritt $\Delta T_{(i)} = T_{i+1} - T_i$, sowohl für die linke $RBM_{(i)}^L$ als auch für die rechte Bildsequenz $RBM_{(i)}^R$, vorliegen.

Wenn die Voraussetzung erfüllt ist, dass die Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ erfolgreich war, dann liegt eine hinreichend große Menge homologer Punkte $p_{R_i}^{L_i}$ für dieses Stereopaar L_i / R_i mit DPCOR-Genauigkeit und Zuverlässigkeit vor.

Es existiert kein direkter funktionaler Zusammenhang zwischen der Ergebnispunktmenge der Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ und den Ergebnispunktmenge der Bewegungszuordnungen $C_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $C_{R_{i+1}}^{R_i}$. Aber alle drei Punktmenge beziehen sich auf den gleichen Bildraum der benachbarten Zeitpunkte T_i und T_{i+1} .

Wie vorausgesetzt liegen die regelmäßigen Bewegungsmodelle $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$ des Zeitschrittes $\mathcal{A}_{(i)}$ vor. Es ist daher möglich, Verschiebungsvektoren für die Punkte der Ergebnispunktmenge der Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ aus den regelmäßigen Bewegungsmodellen $RBM_{(i)}^L$ der linken und $RBM_{(i)}^R$ rechten Sequenz durch Interpolation abzuleiten.

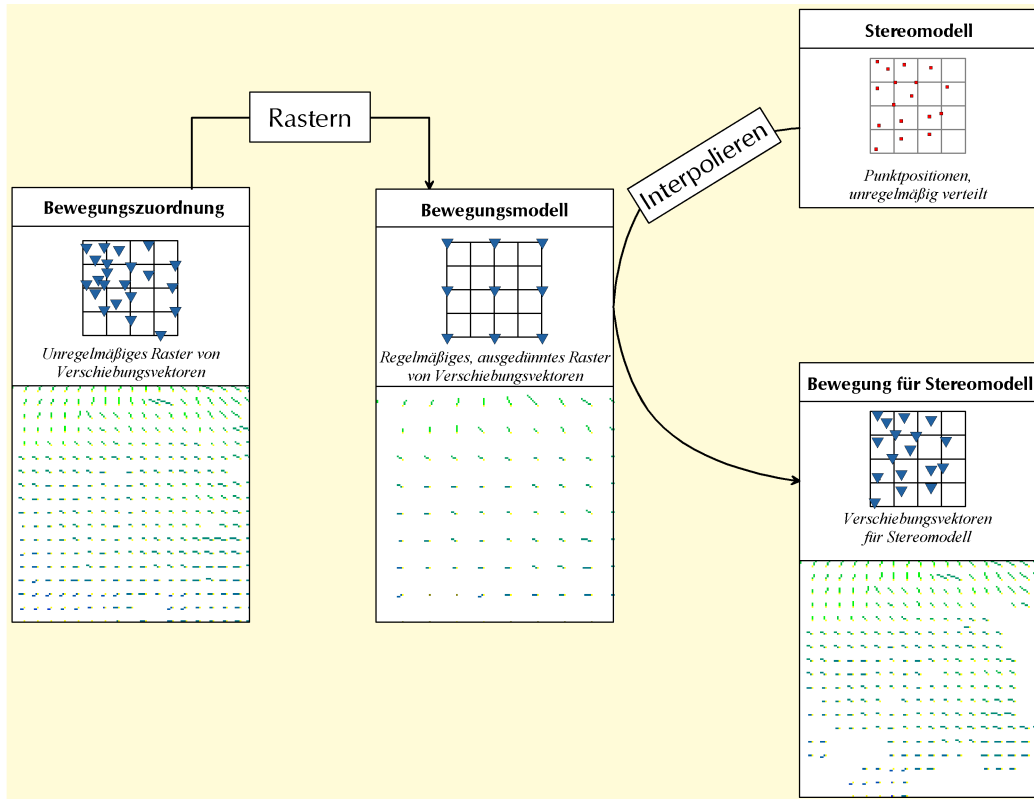


Abbildung 5-2: Verschiebungsvektoren für Stereomodellpunkte durch Interpolation der Punktposition in den Bewegungsmodellen

Die Position eines jeden Punktes der Ergebnismenge $p_{R_i}^{L_i}$ der Stereozuordnung zum Zeitpunkt T_{i+1} lässt sich durch Addition der zugehörigen, aus den Bewegungsmodellen $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$ durch Interpolation abgegriffenen Verschiebungsvektoren zu seiner Position zum Zeitpunkt T_i vorhersagen (vgl. Formel 5-3).

$$\vec{x}_{i+1} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = \vec{x}_i + \vec{v}_{(i)} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}_{(i)}$$

Formel 5-3: Prädiktion einer Punktposition

Dabei ist:

- $\vec{v}_{(i)}$ der Verschiebungsvektor des Punktes für den Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$ aus der Interpolation in den Bewegungsmodellen $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$,
- \vec{x}_i der Ortsvektor des Punktes zum Zeitpunkt T_i ,
- \vec{x}_{i+1} der Ortsvektor des Punktes zum Zeitpunkt T_{i+1} nach dem Zeitschritt $\mathcal{A}_{(i)}$.

Eine Auswahl der Punkte der Ergebnispunktmenge $p_{R_i}^{L_i}$ bildet so eine neue Menge von Startpunkten $a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ für die Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ des folgenden Zeitpunktes T_{i+1} . Die Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ kann erfolgen und erzeugt eine neue Ergebnispunktmenge $p_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$. Diese Punkte besitzen wieder DPCOR-Genauigkeit und Zuverlässigkeit, sodass die durch die Gleichförmigkeits- und Linearitätsannahmen sowie durch die Interpolation erzeugten Ungenauigkeiten der Bewegungsmodelle eliminiert werden. Des Weiteren werden grobe Ausreißer mangels erneuter Zuordnung durch DPCOR zu wesentlichen Anteilen eliminiert. Verbleibende, durch DPCOR nicht aufgedeckte Ausreißer müssen durch noch zu implementierende Plausibilitätstests erkannt und entfernt werden.

Es zeigt sich somit, dass die Stereobildzuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ wie behauptet möglich ist, solange die Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ erfolgreich war, und Bewegungsmodelle $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$ des Zeitschrittes $\mathcal{A}_{(i)}$ vorliegen. Eine erste Stereobildzuordnung $C_{R_1}^{L_1}$ wird wiederum durch manuell gemessene Startpunkte $a_{R_1}^{L_1}$ ermöglicht. Somit ist ebenfalls eine vollständige Induktionskette vom ersten bis zum letzten Stereopaar etabliert.

Ergebnisse sind Listen von homologen Stereopunkten (Ergebnispunktmen- gen der Stereozuordnung) für jeden Zeitpunkt der synchronen Bildsequenzen.

5.3 Implementierung des Algorithmus

Im vorangegangenen Abschnitt wurde verdeutlicht, dass eine Lösung der Problemstel- lung der automatischen Zuordnung von Bildsequenzen durch dynamische Fortschrei- bung von Punktpositionen möglich ist. Die wichtige Komponente, die Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten mit DPCOR, wurde in Fortran programmiert und stellt ein in sich abgeschlossenes Programm dar. In- und Output müssen auf das Programm DPCOR und seine Schnittstellendefinitionen angepasst werden (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Die Implementierung der Bildsequenzzuordnung VMATCH und seiner Komponenten wurde vom Autor dieser Arbeit überwiegend in Perl durchgeführt. Kleinere Bibliothe- ken sind auch in Java verfasst worden.

Im Folgenden soll auf die vorliegende Realisierung des Algorithmus als Programm VMATCH eingegangen werden. Alle Programm-Quelltexte befinden sich auf den dieser Arbeit beigelegten CD-ROMs.

5.3.1 Das Hauptprogramm VMATCH

Das Hauptprogramm VMATCH (*vmatch.pm*) stellt mit 412 Zeilen ca. 1/7 des Gesamtumfanges des in Perl verfassten Codes. Es gliedert sich in zwei wesentliche Teile: die Initialisierung sowie die Hauptschleife. Die Initialisierung bereitet Eingangsdaten auf und führt erste Rechenschritte zur Vorbereitung auf die Hauptschlei- fe durch.

Es wurden für beide Hauptteile getrennte Ablaufdiagramme (vgl. Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4) erstellt. In diesen sind Daten durch abgerundete Rechtecke symbolisiert. Einzelne Funktionen (bzw. Rechenschritte) sind durch nicht abgerundete Rechtecke dargestellt. Die gelb gekennzeichneten Daten sind Eingangsdaten oder bedeutende Zwischen- oder Endergebnisse. Mit Hilfe der Ablaufdiagramme in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 soll die Realisierung des vorgestellten Verfahrens (vgl. Abschnitt 5.2) erläutert werden.

Initialisierung

Als erstes werden durch die Initialisierung aus einer VMATCH-spezifischen Projektdatei Steuerparameter für den gesamten Programmablauf gelesen. Anschließend werden die Eingangsdaten (im Ablaufdiagramm Abbildung 5-3 mit D0 für Datensatz 0 bezeichnet) gelesen und aufbereitet. Dazu zählt, die Bildsequenzen auf Vollständigkeit zu prüfen sowie manuell gemessene Startpunkte der ersten zwei Bilder beider Sequenzen L_1 , L_2 , R_1 und R_2 zu lesen.

Zwei initiale Bewegungszuordnungen $C_{L_2}^{L_1}$ und $C_{R_2}^{R_1}$ (vgl. F1 in Abbildung 5-3) mit anschließender Kontrastfilterung liefern als Ergebnis homologe Punkte $p_{L_2}^{L_1}$ und $p_{R_2}^{R_1}$ (vgl. Abbildung 5-3, D1). Aus diesen werden im Funktionsschritt F2 unregelmäßige Bewegungsmodelle für links $UBM_{(1)}^L$ und rechts $UBM_{(1)}^R$ nach Formel 5-1 berechnet. Diese UBM werden einerseits durch Rasterung (vgl. Abbildung 5-3, F5) in regelmäßige Bewegungsmodelle $RBM_{(1)}^L$ und $RBM_{(1)}^R$ zur späteren Verwendung gewandelt. Andererseits werden die UBM zur Prädiktion durch lineare Extrapolation (vgl. Abbildung 5-3, F3) genutzt. Ein in diese Prädiktion integriertes dynamisches Fortschreiben der Punktposition mit Hilfe der prädizierten Bewegung führt zu Mengen potentieller Startpunkte für folgende Bewegungszuordnungen $a_{L_2}^{L_1}$ und $a_{R_2}^{R_1}$. Diese Mengen sind mittels Segmentfilter (vgl. Abbildung 5-3, F4) auf einen sinnvollen Umfang zu begrenzen. Die so gefilterten Startpunktmengen (vgl. Abbildung 5-3, D5) stellen ein Ergebnis der Initialisierung dar.

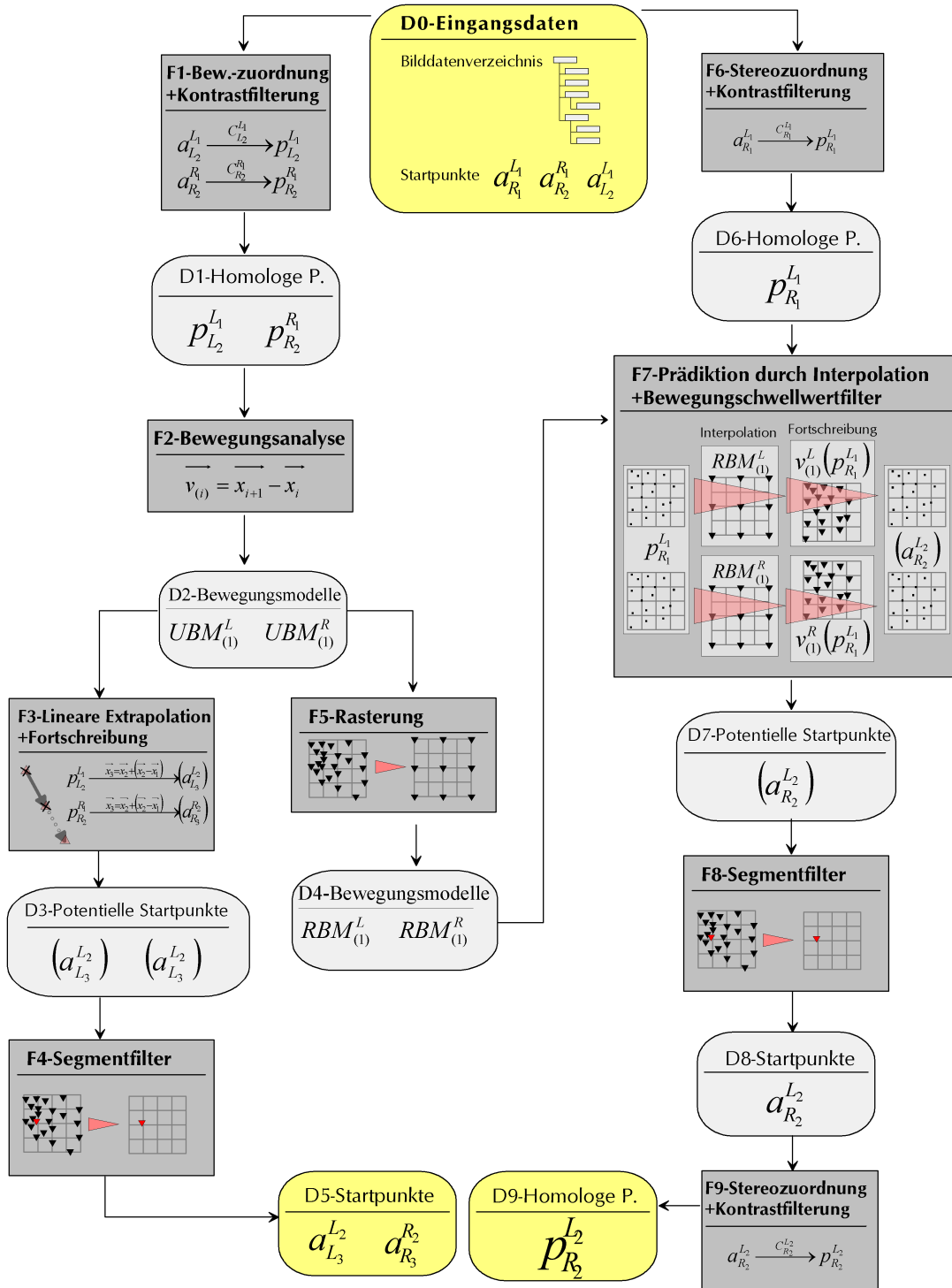


Abbildung 5-3: Ablaufdiagramm des Hauptprogramms VMATCH - Initialisierung

Die initiale Stereozuordnung $C_{R_1}^{L_1}$ (vgl. Abbildung 5-3, F6) nutzt ebenfalls die aufbereiteten Eingangsdaten und liefert als Ergebnis homologe Punkte $p_{R_1}^{L_1}$. Die

Positionen dieser Punktmenge werden in die regelmäßigen Bewegungsmodelle $RBM_{(1)}^L$ und $RBM_{(1)}^R$ interpoliert, um Punktbewegungen für alle Punkte aus $p_{R_1}^{L_1}$ zu schätzen. Nicht plausible Punktbewegungen werden durch den in die Interpolation integrierten Bewegungsschwellwert-Filter erkannt und verworfen. Mit Hilfe der so erhaltenen Punktbewegungen werden ebenfalls in Funktionsschritt F7 die Positionen der Punkte aus $p_{R_1}^{L_1}$ für den nächsten Zeitpunkt präzidiert. Prädiktionsergebnisse sind potentielle Startpunkte ($a_{R_2}^{L_2}$), die mittels des Segmentfilters (vgl. Abbildung 5-3, F8) ausdünnen sind. Die gefilterten Startpunkte (vgl. Abbildung 5-3, D8) werden einer zweiten Stereozuordnung $C_{R_2}^{L_2}$ zugeführt, deren Ergebnisse wiederum homologe Punkte $p_{R_2}^{L_2}$ sind. Diese stellen auch ein zweites Ergebnis der gesamten Initialisierung dar. Beide Ergebnisse, die Ergebnispunktmenge $p_{R_2}^{L_2}$ der Stereozuordnung $C_{R_2}^{L_2}$ sowie die Startpunkt mengen $a_{L_3}^{L_2}$ und $a_{R_3}^{R_2}$ für folgende Bewegungszuordnungen sind die Grundlage für die Hauptschleife.

Hauptschleife

Wie im Ablaufdiagramm (vgl. Abbildung 5-4) der Hauptschleife deutlich wird, wird sie für alle Indizes i von 2 bis $(n-1)$ durchlaufen. Die Zahl n ist dabei die Anzahl der Bildpaare bzw. der Bilder pro Bildsequenz. Der Index i entspricht der Nummer des Aufnahmezeitpunktes.

Die Hauptschleife setzt zwei Startpunkt mengen $a_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $a_{R_{i+1}}^{R_i}$ sowie eine Ergebnispunktmenge $p_{R_i}^{L_i}$ der letzten Stereozuordnung als Eingangsdaten voraus. Dies sind für den ersten Durchlauf ($i=2$) die Ergebnisse der Initialisierung.

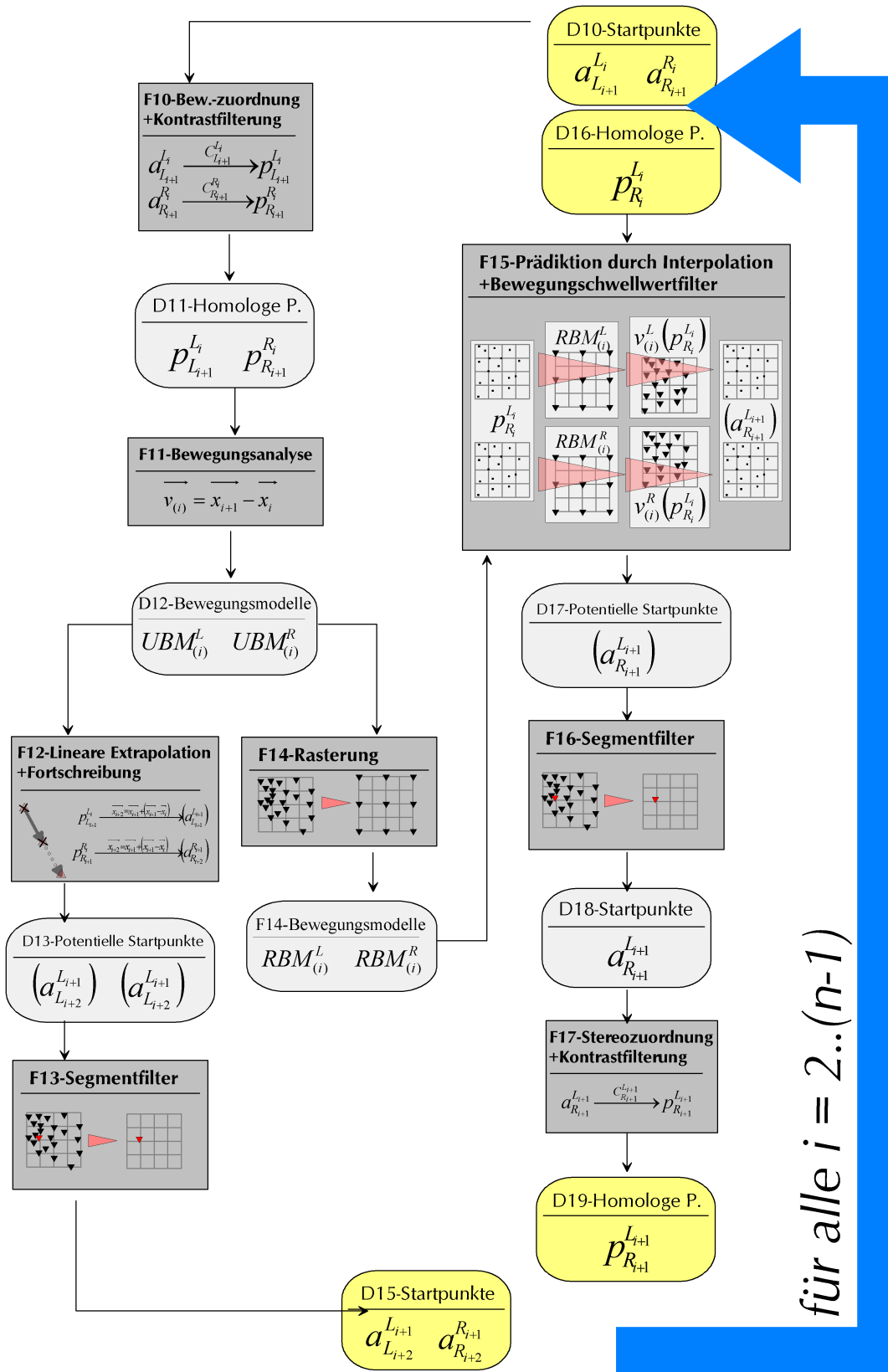


Abbildung 5-4: Ablaufdiagramm des Hauptprogramms VMATCH - Hauptschleife $i=2..(n-1)$

In der Hauptschleife erfolgen als erstes zwei Bewegungszuordnungen $C_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $C_{R_{i+1}}^{R_i}$ (vgl. Abbildung 5-4, F10) auf der Grundlage der Startpunktmengen $a_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $a_{R_{i+1}}^{R_i}$, gefolgt von einer Kontrastfilterung. Die Zuordnungsergebnisse, die Mengen homologer Ergebnispunkte $p_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $p_{R_{i+1}}^{R_i}$, werden durch die Bewegungsanalyse (vgl. Abbildung 5-4, F11) in unregelmäßige Bewegungsmodelle $UBM_{(i)}^L$ und $UBM_{(i)}^R$ überführt. Diese UBM dienen einerseits zur Bestimmung von regelmäßigen Bewegungsmodellen $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$ durch Rastern (vgl. Abbildung 5-4, F14). Andererseits werden sie zur dynamischen Fortschreibung der Punktpositionen (vgl. Abbildung 5-4, F12) verwendet. Die fortgeschriebenen Punktpositionen werden auf die Startpunktmengen $a_{L_{i+2}}^{L_{i+1}}$ und $a_{R_{i+2}}^{R_{i+1}}$ durch den Segmentfilter (vgl. Abbildung 5-4, F13) reduziert und stellen so ein Ergebnis des Schleifendurchlaufes i dar.

Die von der Hauptschleife vorausgesetzten Ergebnispunktmengen der letzten Stereozuordnung $p_{R_i}^{L_i}$ werden in die regelmäßigen Bewegungsmodelle $RBM_{(i)}^L$ und $RBM_{(i)}^R$ interpoliert, um die Punktbeziehung der Punkte aus $p_{R_i}^{L_i}$ zwischen dem Zeitpunkt T_i und T_{i+1} zu schätzen (vgl. Abbildung 5-4, F15). Nicht plausible Punktbeziehungen werden durch Bewegungsschwellwert-Filter eliminiert. Mit Hilfe der verbleibenden Punktbeziehungen können die Positionen der Punkte aus $p_{R_i}^{L_i}$ für den nächsten Zeitpunkt T_{i+1} prädiziert werden.

Die prädizierten Punkte ($a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$) werden mittels Segmentfilter (vgl. Abbildung 5-4, F16) auf die Startpunktmenge $a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ reduziert. Diese Startpunkte werden der Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ zugeführt, welche die Ergebnispunktmenge $p_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ liefert.

Die Startpunkte $a_{L_{i+2}}^{L_{i+1}}$ und $a_{R_{i+2}}^{R_{i+1}}$ sowie die Ergebnispunktmenge $p_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ stellen die Ergebnisse dieses Schleifendurchlaufes i dar. Sie gehen als Voraussetzung in den nächsten Schleifenschritt ($i+1$) ein.

Ergebnisse des Programms VMATCH sind Ergebnispunktmengen der Stereozuordnungen $C_{R_i}^{L_i}$ für alle Stereopaare L_i/R_i für $i=1$ bis $i=n$ (mit n als Anzahl der Bilder pro Sequenz).

Das Hauptprogramm gebraucht verschiedene Module, die entweder ebenfalls in Perl oder in Java vom Autor dieser Arbeit erstellt worden sind. Alle für das Verständnis des gesamten Programmablaufes wesentlichen Bibliotheken bzw. Subroutinen sollen hier näher erläutert werden. Der Quelltext des Hauptprogramms VMATCH sowie der anderen erstellten Module und Programme befinden sich auf den dieser Arbeit beigefügten CD-ROMs.

5.3.2 Umbenennen der Bilddateien

Im Allgemeinen werden die Bilddateien nach dem Dateinamen sortiert. Diese Sortierung entspricht jedoch nicht der zeitlichen Folge der Bildaufnahmen. Die Dateinamen müssen daher durch Umbenennung an die zeitliche Folge der Aufnahme angepasst werden. Dies soll im nächsten Abschnitt erläutert werden.

Die fortlaufenden Nummern aller Dateinamen einer Sequenz müssen die gleiche Zifferanzahl aufweisen, um die zeitliche Folge der Bilder zu wahren. Dies soll durch anfügen von führenden Nullen an die Zahl geschehen. Die nachstehende Abbildung 5-5 verdeutlicht die Vorgehensweise anhand von Beispielen.

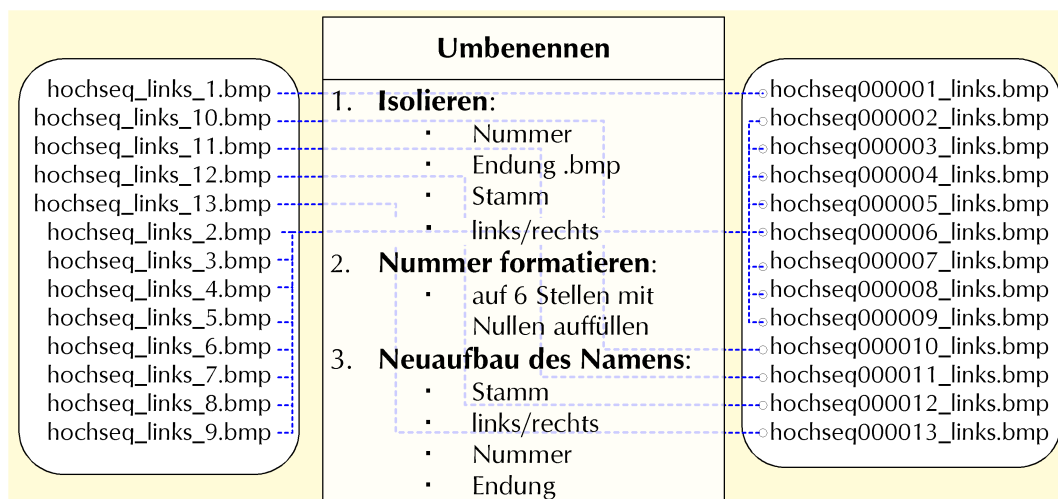


Abbildung 5-5: Beispiele für das Umbenennen der Bilddateien

Die zum automatischen Umbenennen der Bilddateien notwendigen Arbeitsschritte wurden mit Hilfe des vom Autor erstellten Programms RENAME realisiert.

5.3.3 Ein- und Ausgabe

Eine wichtige Grundlage der Implementierung stellen Routinen zur Ein- und Ausgabe von Daten dar. Diese sind notwendig, um den Datenfluss zwischen DPCOR, Golden Surfer und den Subroutinen zu gewährleisten. Aber auch zur finalen Datenablage sind sie unabdingbar. Wesentliche Aufgaben sind das Lesen und Schreiben von Punktlisten in den verschiedenen Mono- und Stereoformaten, jeweils kompatibel zu Golden Surfer oder DPCOR. Die Routinen zum Lesen und Schreiben von zu DPCOR kompatiblen Formaten sind in dem Modul *bluhformat.pm* vom Autor dieser Arbeit verfasst. Ein- und Ausgabefunktion für Golden Surfer sind im Modul *surfer.pm* definiert. Auf *surfer.pm* wird im nächsten Abschnitt noch näher eingegangen.

Außerdem müssen Monodateien nicht nur gelesen, sondern anhand gemeinsamer Punktnummern zu Stereodateien verknüpft werden können. Dafür wurde die Funktion *LinktoStereoData* im Modul *bluhformat.pm* verfasst.

5.3.4 Rasterung und Interpolation

Um den Entwicklungsaufwand klein zu halten, wurde bei der Implementierung der Rasterung und Interpolation auf das kommerzielle Programm Golden Surfer der Firma Golden Software zurückgegriffen [vgl. Golden 2002a]. Für diese Entscheidung war der Umstand ausschlaggebend, dass die Software verschiedene Rasterverfahren mit diversen Parametern als auch die Interpolation in die Raster anbietet. Rasterverfahren, Interpolation und alle anderen Fähigkeiten des Programms Golden Surfer sind durch externe Programme mit Hilfe von Basic-Skripten nutzbar. Diesen Umstand macht sich das durch den Verfasser dieser Arbeit erstellte Modul *surfer.pm* des Programms VMATCH in der Funktion *grid* nutzbar, um die in VMATCH anfallenden unregelmäßigen Bewegungsmodelle durch Rastern²² in regelmäßige Bewegungsmodelle zu wandeln. Darüber hinaus wird auch Golden Surfers Interpolation im Modul *surfer.pm* durch die Funktion *interpolate* genutzt. Beide Funktionen erzeugen jeweils ein BASIC-Skript, in welchem die Aufgabenstellungen für Golden Surfer formuliert werden. Diese BASIC-Skripte werden Golden Surfer zur Ausführung übergeben.

²² vgl. Abbildung 5-3, F5 und Abbildung 5-4, F14

5.3.5 Prädiktion von Punktpositionen

Hierbei wird die Prädiktion nach der Art der Zuordnung (Bewegungszuordnung und Stereozuordnung) unterschieden, da Ergebnisse einer Prädiktion potentielle Startpunkte für eine erneute Zuordnung sind.

Für die Bewegungszuordnung werden Startpunkte als Näherungswerte für die folgende Zuordnung durch lineare Extrapolation gemessener Punktbewegungen (vgl. Formel 5-2) ermittelt. Dies geschieht in der Funktion *predict* des Moduls *prediction.pm*²³.

Für die Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ werden die Startpunkte $a_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ mit Hilfe der Funktion *interpolatedPrediction* des Moduls *prediction.pm* anhand folgender Parameter bestimmt:

- Positionen erfolgreich zugeordneter Punkte aus der vorherigen Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ und
- den regelmäßigen Bewegungsmodellen links $RBM_{(i)}^L$ und rechts $RBM_{(i)}^R$.

Dabei wird die Position jedes Punktes der vorigen Stereozuordnung in die RBM links und rechts mit Hilfe des Moduls zur Rasterung und Interpolation, *surfer.pm*, interpoliert. Die Interpolation liefert für die Punkte der vorigen Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ geschätzte Bewegungsvektoren. Diese Bewegungsvektoren durchlaufen den im Anschluss vorgestellten Bewegungsschwellwert-Filter. Durch diesen Filter nicht verworfene Bewegungsvektoren werden auf die dazugehörigen Punktpositionen der vorigen Stereozuordnung $C_{R_i}^{L_i}$ addiert. Die Summe entspricht einer Positionsprädiktion²⁴ (vgl. Formel 5-3).

Die Positionsprädiktionen sind potentielle Startpunkte für die Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$. Durch die Verwendung des Kontrast-, Bewegungsschwellwert- und Segmentfilters werden aus der Menge aller Positionsprädiktionen die Startpunkte für die folgende Stereozuordnung $C_{R_{i+1}}^{L_{i+1}}$ bestimmt.

²³ vgl. Abbildung 5-3, F3 und Abbildung 5-4, F12

²⁴ vgl. Abbildung 5-3, F7 und Abbildung 5-4, F15

5.3.6 Bewegungsschwellwert-Filterung

Der Bewegungsschwellwert-Filter ist Bestandteil der Funktion *interpolatedPrediction* des Moduls *prediction.pm*. Durch diesen Filter werden aus der Interpolation stammende Bewegungsvektoren untersucht.

Punkte, deren Bewegung eine Plausibilitätsgrenze²⁵ überschreiten, können als Ausreißer klassifiziert und für die weitere Berechnung verworfen werden. Es handelt sich um Fehlzusordnungen (z.B. durch das Bild fliegende Möwen).

Die Höhe des Schwellwertes bzw. der Plausibilitätsgrenze wurde anhand von kurzen Testläufen bestimmt und schließlich auf 8 Pixel festgelegt. Dieser Wert ist entsprechend den Kenndaten des Datenmaterials, wie Aufnahmesituation, Aufnahmesystem und Objektgeschwindigkeiten, anzupassen.

5.3.7 Kontrastfilterung

Das Verfahren der digitalen Bildzusordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate liefert dann unzureichende Ergebnisse, wenn die zu vergleichenden Bildabschnitte einen zu geringen lokalen radiometrischen Kontrast aufweisen. Gleichfarbige Bildbereiche sind durch sehr geringen radiometrischen Kontrast gekennzeichnet. Durch Anwendung des Kontrastfilters nach jeder Bildzusordnung²⁶ werden Ergebnispunkte mit geringem lokalem Kontrast für die weitere Verwendung verworfen. Hierdurch können große Teile potentieller Fehlzusordnungen eliminiert werden.

Zur Untersuchung des lokalen Kontrastes um einen Punkt ist es notwendig, das als binäre RAW-Bilddateien vorliegende Bildmaterial zu lesen²⁷. Der Kontrastfilter wurde teilweise in Java implementiert, da Java zur Handhabung binärer Daten aus Sicht des Autors ein geeignetes Mittel darstellt, und da die in Java bereits realisierten Routinen zur Bildmanipulation die Programmierung vereinfachen. Die Standardabweichung der Intensitätswerte (vgl. Formel 5-4) in einem Ausschnitt um einen Punkt ist nach [Schenk 1999, S.45] ein Maß für den lokalen Kontrast.

²⁵ In dem Modul *matching.pm* des Programmes VMATCH wird die Plausibilitätsgrenze durch die Variable *\$maxDelta* in Zeile 19 festgelegt.

²⁶ vgl. Abbildung 5-3, F1, F6, F9 und Abbildung 5-4, F10, F17.

²⁷ Das Lesen und Schreiben von RAW- Dateien ist in dem Modul RAWCoder des Paktes awtX realisiert.

$$\overline{g(x, y)} = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \left(\sum_{r=-R/2}^{R/2} \left(\sum_{c=-C/2}^{C/2} g(x+r, y+c) \right) \right)$$

$$\mathbf{s}(x, y) = \sqrt{\frac{1}{R \cdot C - 1} \cdot \left(\sum_{r=-R/2}^{R/2} \left(\sum_{c=-C/2}^{C/2} \{g(x+r, y+c) - \overline{g(x, y)}\}^2 \right) \right)}$$

Formel 5-4: Statistische Kenngrößen eines Bildausschnittes um (x,y)
[nach Schenk 1999, S.45]

Dabei ist:

- (x, y): Koordinaten des Punktes, dessen lokale Umgebung statistisch untersucht wird,
- R,C: Dimensionen des als lokaler Bereich betrachteten rechteckigen Bildausschnittes um den Punkt (x,y),
- $\overline{g(x, y)}$: Helligkeitsniveau bzw. Intensitätswertmittel des lokalen Bereiches um (x,y) und
- $\mathbf{s}(x, y)$: Kontrast bzw. Standardabweichung der Intensitätswerte des lokalen Bereiches um (x,y).

Die Untersuchung des lokalen Kontrastes einer ganzen Liste von Punkten ist in dem Programm *checkContrast.java* des Paketes *da_visu* realisiert. *CheckContrast.java* ergänzt die ihm übergebene Punktliste um die Werte der lokalen Kontraste der Punkte dieser Liste. Es wird aus der Funktion *filterByContrast* des perl-Moduls *filter.pm* aufgerufen. Diese Perl-Funktion verwirft dann alle Punkte der Ergebnisliste, deren Grauwertvarianz einen in der Variable *\$minContrast* im Modul *matching.pm* festgelegten Wert unterschreitet. Die in der Punktmenge verbleibenden Punkte weisen somit einen akzeptablen lokalen Kontrast auf. Es wurden demnach Zuordnungen von farblich homogenen Flächen verworfen.

5.3.8 Segmentfilterung

Die Ergebnispunktmenge einer Bildzuordnung umfasst bei der Verwendung der vorgestellten Parameter ca. 15.000 Punkte bei der Stereozuordnung und bis zu 12.000 Punkte bei der Bewegungszuordnung. Aus diesen homologen Punkten werden die Startpunkte für die nächstfolgende Bewegungs- bzw. Stereozuordnung ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass DPCOR in der vorliegenden Version bis zu 2000 Startpunkte verarbeiten kann. Die Anzahl der Startpunkte wird daher mit Hilfe von

verschiedenen Filtern, anhand von Merkmalsausprägungen, reduziert. Nachdem bereits Kontrast- und Bewegungsschwellwert-Filter durchlaufen sind, wird die immer noch große Punktmenge durch den Segmentfilter²⁸ auf einen zweckmäßigen Umfang begrenzt. Hierzu wird der Bildraum in gleich große Bildausschnitte in Gitteranordnung unterteilt. Durch Anwendung des Segmentfilters wird in jedem Gittersegment der Punkt mit dem größten Korrelationskoeffizienten als Startpunkt für die weitere Berechnung ausgewählt.

Die Anzahl der Startpunkte ist von der Größe der Gittersegmente abhängig. Wenn die Punkte vor Segmentfilterung homogen über den Bildraum verteilt sind, kann man die festzulegende Segmentgröße wie folgt abschätzen:

$$x_s^2 = \frac{x_b^2}{n} \quad y_s^2 = \frac{y_b^2}{n}$$

Formel 5-5: Zu wählende Segmentgröße zur Segmentfilterung auf eine festgelegte maximale Punktzahl n

Dabei ist:

- n : Anzahl der Segmente bzw. maximale Anzahl verbleibender Punkte,
- x_s ; y_s : Dimension der Segmente und
- x_b ; y_b : Dimension des Bildes.

Die maximale Anzahl der Ergebnispunkte des Filters entspricht der Anzahl der Segmente n , da je Bildsegment nur ein Punkt ausgewählt wird, und alle anderen verworfen werden. Das Verfahren der Segmentfilterung erlaubt die Begrenzung der Punktmenge bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der homogenen Verteilung²⁹. Der Segmentfilter ist als Funktion *filterStereoData* im Modul *filter.pm* implementiert. Ihm werden die Dimensionen des Bildes und die Segmentdimension als Parameter übergeben.

²⁸ vgl. Abbildung 5-3, F13 und Abbildung 5-4, F16

²⁹ Bei homogener Verteilung der Startpunkte und gleich bleibender Startpunktzahl wird die Wahrscheinlichkeit einer optimalen Bedeckung des Bildraumes mit homologen Punkten durch die Zuordnung größer.

5.3.9 Visualisierung von Zuordnungspunktmenngen mit RAWVisu als Teil des Programmpaketes da_visu

Zur Beurteilung von Zwischen- und Endergebnissen ist es hilfreich, wenn diese in einer aussagekräftigen Form visuell dargestellt sind. Das Programm RAWVisu ermöglicht die Darstellung von in textbasierten Datenformaten abgespeicherten Bildpunktmenngen auf den dazugehörigen Bildern. Es bietet dazu fünf (0 bis 4) verschiedene Modi der Punktvisualisierung. So können etwa einfache Symbole wie Kreise oder Quadrate an der Punktposition im Bild gezeichnet werden. Außerdem wurde die Analyse von Bewegungszuordnungen und aus ihnen abgeleitete Bewegungsmodelle durch anschauliche Darstellung der Bewegungsvektoren an den zugehörigen Punktpositionen ermöglicht³⁰.

RAWVisu liest und schreibt binäre Bilddateien. Es wurde daher als Bestandteil des Programmpaketes da_visu in Java erstellt. Die Quelltexte des Programmpaketes da_visu befinden sich, wie auch alle anderen im Rahmen dieser Arbeit erstellten Programme, auf den beigefügten CD-ROMs. Es soll auf die Darstellung von Einzelheiten zu da_visu verzichtet werden. Stattdessen sind in folgender Tabelle kurz die Bestandteile des gesamten Paketes da_visu und die des von da_visu genutzten Paktes awtX aufgezählt:

³⁰ Als Beispiele für die Visualisierungsmodi sei auf Abbildung 6-5 und Abbildung 5-1 verwiesen.

<i>Dateiname</i>	<i>Inhalt</i>
<i>CheckContrast.java</i>	<i>CheckContrast.java</i> berechnet den lokalen Kontrast für jeden Punkt von im Stereoformat gespeicherten Punktlisten. Die Ergebnisse werden in eine neue Datei geschrieben. Im Rahmen des Kontrastfilters (vgl. Abschnitt 5.3.7) werden dann diese Dateien gelesen und die ursprüngliche Punktmenge gefiltert.
<i>ImageManipulation.java</i>	In dem Modul <i>ImageManipulation.java</i> sind einfache Funktionen zur Bearbeitung von Bilddaten vereinbart.
<i>ImageStatistics.java</i>	Mit Hilfe dieses Moduls können statistische Werte für Bildausschnitte oder ganze Bilder berechnet werden. Dies sind in der vorliegenden Version nur die von <i>CheckContrast.java</i> benötigten Werte des Mittelwertes und der Standardabweichung der Intensitätswerte des Bildausschnittes (vgl. Formel 5-4).
<i>RAWCoder.java</i>	Das Modul <i>RAWCoder.java</i> erlaubt das Lesen und Schreiben von RAW-Bilddateien (vgl. Fußnote 10 auf Seite 25).
<i>RAWVisu.java</i>	Mit dem Modul <i>RAWVisu.java</i> lassen sich sowohl Bewegungs- zuordnung als auch Stereozuordnungsergebnisse anschaulich darstellen.

Tabelle 5-2: Dateien einer Stereobildzuordnung

5.4 Erste Anwendung des Algorithmus

Für einen ersten ausgedehnten Test des implementierten Algorithmus wurden anhand der Voruntersuchungen und ihrer Ergebnisse folgende Festlegungen bezüglich der variablen Parameter des Programms VMATCH getroffen:

- Es wurde zur Rasterung der unregelmäßigen Bewegungsmodelle auf die Delaunay Triangulation mit linearer Interpolation zurückgegriffen. Dabei betrug die Gitterweite 1 Pixel. Die Randbereiche der entstehenden regelmäßigen Bewegungsmodelle wurden bei der Interpolation in die RBM verworfen, da, wie in Abschnitt 6.4 festgestellt, das Randverhalten der Rastermethode Triangulation mit linearer Interpolation unzureichend ist.
- Die Plausibilitätsgrenze des Bewegungsschwellwert-Filters wurde aufgrund von kurzen Testläufen auf 8 Pixel festgelegt.
- Der minimal zulässige Kontrast beim Kontrastfilter entsprach einer Standardabweichung des Intensitätswertes von $s_l = 8$.

- Bei allen Bewegungs- und Stereozuordnungen wurden folgende Parameter für DPCOR gewählt:
 - Schrittweite des Region Growing (STEP) 8 Pixel,
 - maximale Abweichung der ermittelten Position zum Startpunkt ca. 4 Pixel (halbe Schrittweite),
 - Mustermatrixgröße 20 Pixel,
 - maximale Anzahl der Iterationen 10 und
 - minimal akzeptierter Korrelationsfaktor 0,8.

Der in Abschnitt 5.2 beschriebene Algorithmus wurde, wie in Abschnitt 5.3 erläutert, implementiert und mit dem vorliegenden Datensatz (vgl. Abschnitt 2.3) getestet. Die Funktionsfähigkeit des Programms VMATCH – und somit auch des vorgestellten Verfahrens der Bildsequenzzuordnung durch dynamische Punktfortschreibung – konnte festgestellt werden. Als Nachweis gelten die vorgelegten Ergebnisse der ersten Anwendung. Diese sind auf den dieser Arbeit beiliegenden CD-ROMs gesichert und können dort eingesehen werden.

Die vorhandene Rechenkapazität ließ zunächst nur eine Verarbeitung der ersten 105 der 1060 Bilder (links und rechts) zu. Nach der Zuordnung des 105. Bildpaares wurde das Programm abgebrochen. Die Ergebnisse der ersten Überprüfung des Algorithmus sind:

- den Bewegungszuordnungen $C_{L_{i+1}}^{L_i}$ und $C_{R_{i+1}}^{R_i}$ für alle $i = 1..104$,
- den daraus abgeleiteten unregelmäßigen und regelmäßigen Bewegungsmodellen $UBM_{(i)}^L$, $RBM_{(i)}^L$, $UBM_{(i)}^R$ und $RBM_{(i)}^R$ für alle $i = 1..104$ und
- den Stereozuordnungen $C_{R_i}^{L_i}$ für alle $i = 1..105$.

Ziel der Bildsequenzzuordnung sind die Stereozuordnungen $C_{R_i}^{L_i}$, da sie eine Modellierung des dreidimensionalen Objektraumes erlauben. Zur qualitativen Beurteilung des vorgestellten Algorithmus und seiner Implementierung VMATCH werden auch die anderen, oben aufgelisteten Ergebnisse herangezogen.

Die gesamte Ergebnisdatenmenge umfasst ein Volumen von über 15 Gigabyte³¹. Aus diesem Grund wurden alle Daten nach Stereo- bzw. linker oder rechter Bildzuordnung und nach der Nummer des ersten zu Grunde liegenden Bildes sortiert und untergliedert. Es ergeben sich so 313 Verzeichnisse mit jeweils einer Bildzuordnung als Inhalt.

Die Bewegungsmodelle wurden in dem Verzeichnis der Bewegungszuordnung, von der sie abgeleitet worden, abgelegt.

Die Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 skizzieren den Inhalt der Verzeichnisse der Bewegungs- und Stereozuordnungen.

³¹ Dies entspricht ca. 22 CD-ROMs.

<i>Dateiname</i>	<i>Inhalt</i>
<i>conj.out</i>	Ergebnisse der Bewegungszuordnung mit DPCOR im erweiterten Stereoformat
<i>conj.out.CheckContrastLog</i>	Bildschirmausgabe des Kontrastfilterprogramms
<i>conj.out.contrastFiltered</i>	Ergebnisse der Bewegungszuordnung mit DPCOR; ausschließlich Punkte mit ausreichendem lokalem Kontrast
<i>conj.out.filtered</i>	Kleine Auswahl der Ergebnisliste <i>conj.out.contrastFiltered</i> ; mit dem Segmentfilter erzeugt; dient als Startpunktmenge für die nächste Zuordnung
<i>conj.pix</i>	Ergebnisse der Bewegungszuordnung mit DPCOR im Stereoformat
<i>da_visu.out</i>	Bildschirmausgabe des Visualisierungstools <i>da_visu</i>
<i>delta.dat</i>	Ergebnisliste der letzten Interpolation in das Bewegungsmodell dieser Zuordnung; von keiner Bedeutung für diese Bewegungszuordnung
<i>dpcor.log</i>	Log-Datei von DPCOR
<i>dpcor.out</i>	DPCOR's Bildschirmausgabe
<i>dx.grd, dy.grd</i>	Dies sind die von Golden Surfer erstellten Rasterdateien der x- und y-Komponente der unregelmäßigen Bewegungsmodelle. Sie stellen somit die regelmäßigen Bewegungsmodelle dar.
<i>grid.bas</i>	Dynamisch erzeugtes Basicprogramm zum Erstellen der Bewegungsraster mit Hilfe von Golden Surfer
<i>grid.bas.log</i>	Log-Datei von <i>grid.bas</i>
<i>interpolate.bas</i>	Dynamisch erzeugtes Basicprogramm zur Interpolation in die Bewegungsraster
<i>Mask_hochseq000016_links.raw</i>	Eine Maskendatei; Ausgabe von <i>da_visu</i> ; 24-Bit RAW-Dateiformat
<i>Mask_hochseq000017_links.raw</i>	analog
<i>Predicted.filtered</i>	Bereits in die nächste Bewegungszuordnung fortgeschriebene <i>conj.out.filtered</i> ; entspricht der Startpunktdatei <i>stereo.dat</i> der nächsten Bewegungszuordnung dieser Sequenz
<i>project.prj</i>	die DPCOR- Projektdatei
<i>stereo.dat</i>	die Startpunkte für die Bildzuordnung mittels DPCOR
<i>tmp.out</i>	Zwischenergebnis der Interpolation mittels <i>interpolate.bas</i> und Golden Surfers
<i>tmp.pix</i>	Zwischenergebnis der Interpolation mittels <i>interpolate.bas</i> und Golden Surfers

Tabelle 5-3: Dateien einer Bewegungsbildzuordnung

<i>Dateiname</i>	<i>Inhalt</i>
<i>conj.out</i>	Ergebnisse der Stereozuordnung mit DPCOR im detaillierten Format
<i>conj.out.CheckContrastLog</i>	Bildschirmausgabe des Kontrastfilterprogramms
<i>conj.out.contrastFiltered</i>	Ergebnisse der Stereozuordnung mit DPCOR; ausschließlich Punkte mit ausreichendem lokalem Kontrast
<i>conj.pix</i>	Ergebnisse der Stereozuordnung mit DPCOR im Kurzformat
<i>dpcor.log</i>	Log-Datei von DPCOR
<i>dpcor.out</i>	DPCOR's Bildschirmausgabe
<i>predicted.pix</i>	Alle Punkte der Zuordnung nach einer ersten Vorfilterung werden mittels Interpolation in die Bewegungsmodelle links und rechts fortgeschrieben. <i>predicted.pix</i> enthält das Ergebnis.
<i>predicted.pix.filtered</i>	Auswahl von <i>predicted.pix</i> ; nach Segmentfilterung
<i>project.prj</i>	Die DPCOR-Projektdatei
<i>stereo.dat</i>	Die Startpunkte für die Bildzuordnung mittels DPCOR

Tabelle 5-4: Dateien einer Stereobildzuordnung

Die Ergebnisse der ersten Anwendung des Algorithmus sowie alle implementierten Programme und Programmteile wurden in komprimierter Form auf CD-ROMs gesichert und sind dieser Arbeit beigelegt.

6 Voruntersuchungen zur Implementierung

Nach dem Entwurf des in Abschnitt 5.2 vorgestellten Algorithmus war es notwendig, zentrale Funktionalitäten, Forderungen und Annahmen auf ihre Korrektheit zu überprüfen, bevor der Algorithmus in Abschnitt 5.3 implementiert werden konnte. Zu diesem Zweck wurden die Bildsequenzen gesichtet, das Aufnahmesystem auf Synchronismus und Aufnahmefrequenz und die zur Verfügung stehenden Rasterverfahren auf Verwendbarkeit untersucht. Schließlich wurden erste Probezuordnungen von Bildern der Bildsequenzen mit DPCOR vollzogen.

6.1 Erste Bildmaterialsichtung

Nach dem Umbenennen der Bilddateien der Bildsequenzen mit dem Programm RENAME (vgl. Abschnitt 5.3.2) wurden von den Bildern Kopien erzeugt, deren optische Auflösung auf $\frac{1}{4}$ gesenkt wurde. Erst die Verringerung der Auflösung erlaubt ein rasches Betrachten der Bildfolgen am Arbeits-PC, da bei gevierter Auflösung das Datenvolumen pro Bild auf $\frac{1}{16}$ reduziert wird.

Bei den Bildsequenzen ist teilweise festzustellen, dass die Kameras nicht in jedem Fall stabil aufgestellt waren. Es ist zu erkennen, dass die Kameras unter Windeinwirkung ihre Aufnahmerichtung leicht veränderten. Diese Veränderung scheint elastischer Natur zu sein. Das heißt, bei Verschwinden der äußeren Krafteinwirkung durch den Wind kehrt die Kamera in ihre Ausgangslage zurück. Für zukünftige Aufnahmen wurde am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation eine stabile Art der Kameraaufstellung entwickelt.

6.2 Synchronismus der Kameras

Es soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass ein möglicher Synchronismusfehler nur so groß sein darf, dass der schnellste Punkt im Objektraum innerhalb der Spanne der zeitlichen Abweichung maximal zehn Prozent des horizontalen Genauigkeitsmaßes³², also 3,35 mm, zurückgelegt haben darf.

³² In Abschnitt 2.2 wird die horizontale Objektgenauigkeit mit 3,35 cm abgeschätzt.

Die Geschwindigkeit der schnellsten Wellen wird in dieser Arbeit mit 4 m/s abgeschätzt. Das heißt, dass die schnellste Welle 0,84 ms benötigt, um 3,35 mm zurückzulegen.

Der Synchronismus der Kameras hängt weitestgehend von dem zum Einsatz vorgesehenem Trigger ab. Die Genauigkeit des externen Triggers wurde im Labor untersucht. Dabei wurde eine Scheibe³³ als Zielmarke mit unterschiedlichen aber konstanten Winkelgeschwindigkeiten in Rotation versetzt, während alle Kameras von den vorgegebenen Standpunkten Bilder dieser Zielmarke aufnahmen (vgl. Abbildung 6-1). Anschließend wurden die Positionen der Markierungen auf der Scheibe zwischen den korrespondierenden Bildern der vier Kameras verglichen. Zur Feststellung des Synchronismus ist es erforderlich, dass die erfassten Markierungen auf der Scheibe keine Positionsdifferenzen auf den Bildern der vier Kameras aufweisen.

³³ Die Scheibe ist, wie in Abbildung 6-1 erkennbar, geviertelt markiert. Es wechseln sich schwarze und weiße Viertel ab.

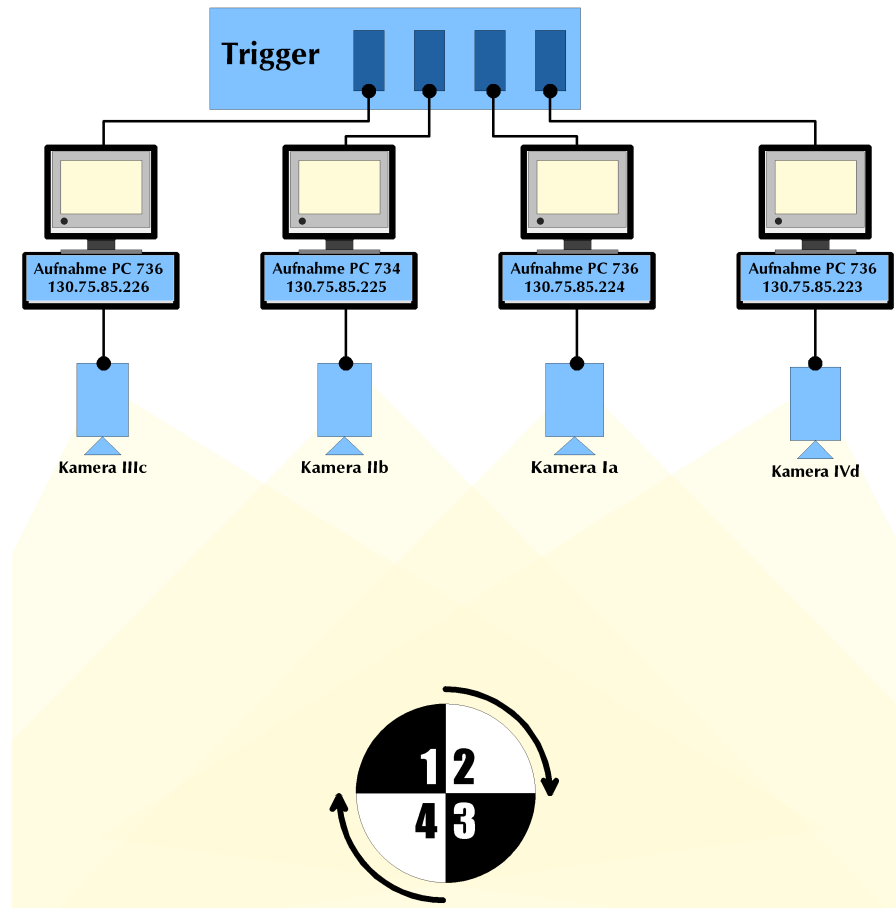


Abbildung 6-1: Versuchsaufbau zum Nachweis des Synchronismus der Kameras

Die Scheibe wurde mit einer Frequenz von 50 Hertz gedreht. Das heißt, sie vollzieht alle 20 ms einen Vollkreis. Innerhalb der durch die 10%-Grenze festgelegten 0,84 ms dreht sich die Scheibe um $15,12^\circ$.

Abbildung 6-2 zeigt eines der vielen Bilderquartetts, die von den vier Kameras nach einer synchronen Auslösung erstellt wurden.

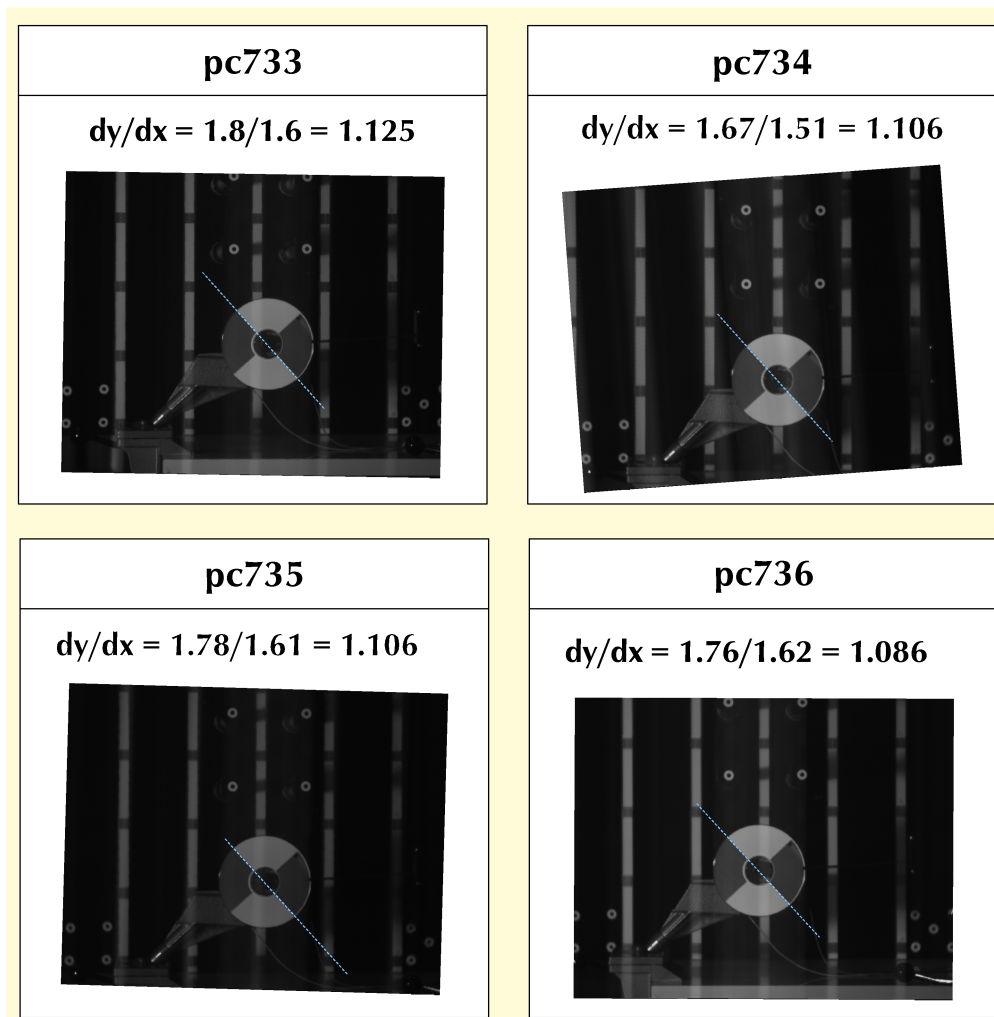


Abbildung 6-2: Aufnahmen zum Nachweis des Synchronismus der Kameras

Die Bilder wurden grob orientiert, bedürfen aber aufgrund der kleinen Basis zwischen den Kameras keiner Entzerrung. Eine manuelle Winkelmessung der Scheibe – in Abbildung 6-2 durch die blauen Linien angedeutet – ergab eine Ausrichtung von $48,4^\circ$, $47,9^\circ$, $47,9^\circ$ und $47,4^\circ$. Die maximale Abweichung der Ausrichtung der Scheibe in den Kameras beträgt also $0,5^\circ$ mit ca. $\pm 4,2^\circ$ Standardabweichung³⁴.

Die ermittelten Winkeldifferenzen der Scheibe in den Bildern (vgl. Abbildung 6-2) unterschreitet die festgelegte Höchstgrenze von $15,12^\circ$ deutlich. Somit kann festgestellt

³⁴ Die grobe Orientierung und die manuelle Winkelmessung erlauben eine Genauigkeitsangabe von $\pm 3^\circ$ für die Einzelwinkelmessung. Nach Fehlerfortpflanzungsgesetz ist die Differenz mit ca. $3^\circ \cdot \sqrt{2} = 4,2^\circ$ abzuschätzen [nach Pelzer 1985, S.55].

werden, dass das Aufnahmesystem hinreichend synchron zur Aufnahme von den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Wasseroberflächen ist.

6.3 Aufnahmefrequenz

Während der Experimente zur Zeitsynchronisation wurden gleichfalls Untersuchungen hinsichtlich der maximal möglichen Aufnahmefrequenz der Kameras durchgeführt. Dies war notwendig, da die vom Hersteller zugesagte Frequenz von 12 Hz während der Aufnahmen auf Norderney nicht erreicht werden konnte.

Die Kameras lassen die maximale Frequenz von 12 Hz nur dann zu, wenn jeder Kamera die Festlegung des Aufnahmezeitpunktes selbst überlassen bleibt. Diese Arbeitsweise erlaubt keine externe Aufnahmeimpulsmodulation mittels Triggers und daher keine synchronen Aufnahmen durch die Kameras.

Bei Verwendung des externen Triggers zur synchronen Auslösung der Kameraaufnahmen wurde mit den Kameras eine maximale Aufnahmefrequenz von 10 Hz erzielt. Um Aussetzer zu vermeiden, sollte daher bei zukünftigen Messkampagnen mit dem vorliegenden Aufnahmesystem die Frequenz nicht höher als 8 Hz gewählt werden.

6.4 Rasterverfahren des Programms Golden Surfer

Im Folgenden sind die vom Programm VMATCH verwendeten Raster- und Interpolationsmethoden der Software Golden Surfer hinsichtlich ihrer möglichen Eignung für Bewegungsmodelle zu erläutern.

Bei der Rasterung von unregelmäßigen Bewegungsmodellen werden die Bewegungsvektoren \vec{v} in ihre zwei Komponenten v_x und v_y aufgeteilt und getrennt gerastert. Es ergeben sich für die Rasterung der x-Komponente Stützpunkte der Art $(x, y, z = v_x)$ und für die Rasterung der y-Komponente Stützpunkte der Art $(x, y, z = v_y)$.

Die x-Komponente v_x des unregelmäßigen Bewegungsmodells $UBM_{(1)}^L$ wurde mit den Verfahren des Programms Golden Surfer gerastert. Die Ergebnisse sind als Isolinienkarten in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellt und sollen im folgenden Abschnitt bewertet werden. Dabei erfolgt die Beurteilung der Qualität der Darstellungen anhand folgender Kriterien:

1. Häufigkeit von Artefakten³⁵,
2. Verhalten am Rand und
3. angemessenes Gewicht zwischen Detailtreue und Glättung³⁶.

Beim Rastern wird durch Interpolation jedem Gitternetzpunkt des zu erzeugenden regelmäßigen Rasters ein z-Wert zugeordnet, der "stellvertretend" für die unregelmäßig verteilten, ursprünglichen Stützpunkte – also für das unregelmäßige Bewegungsmodell – steht. Die zur Rasterung verwendete Software Golden Surfer bietet drei verschiedene Arten von Methoden zur Erzeugung regelmäßiger Gitter (Raster) aus unregelmäßigen an (vgl. Tabelle 6-1).

Einfach	Mittelwert-basiert	Flächen- oder Funktions-basiert
- <i>Nearest Neighbor</i>	- <i>Inverse Distance to a Power</i> - <i>Modified Shepard's Method</i> - <i>Natural Neighbor</i> - <i>Radial Basis Function</i> - <i>Kriging</i>	- <i>Minimum Curvature</i> - <i>Delaunay Triangulation with Linear Interpolation</i>

Tabelle 6-1: Klassifizierung der Rastermethoden

Am einfachsten und schnellsten ist die *Nearest Neighbor* Methode. Der z-Wert des Punktes, der dem zu bestimmenden Gitternetzpunkt am nächsten liegt, wird dem Gitternetzpunkt zugeordnet.

Die zweite Art der Rasterung berechnet ein gewichtetes Mittel aller z-Werte der Stützpunkte. Die Verfahren, die mit diesem Prinzip arbeiten, unterscheiden sich hinsichtlich der Gewichtung der Stützpunkte. Bei der *Inverse Distance to a Power* Methode erhalten die zu transformierenden z-Werte Gewichtungsfaktoren in linearer Abhängigkeit von der Distanz der Stützpunkte zum Gitterpunkt. [vgl. Golden 2002b].

³⁵ Unter einem Artefakt soll ein durch den Rasterungsprozess künstlich hervorgerufenen lokales Maximum oder Minimum in den erzeugten regelmäßigen Rastern verstanden werden. Es lässt sich nicht anhand des für die Rasterung zugrunde liegenden Datenmaterials erklären.

³⁶ Wesentliche Details des ursprünglichen Datenmaterials sollen erhalten bleiben. Ausreißer sollen durch Glättung „entschärft“ werden. Benachbarte, homogene Bereiche sollen zusammengefasst werden.

Bei der *Shepard's* Methode sinkt die Gewichtung eines Stützpunktes exponentiell mit der Entfernung vom Gitternetzpunkt [vgl. Rase 1996].

Das Gewicht zur Mittelung bei der *Natural Neighbor* Methode wird anhand einer vorher zu vollziehenden Triangulation³⁷ der Stützpunkte und anschließender Erzeugung der dualen Thyssen-Polygone berechnet [vgl. Owen 1993].

Eine weitere Art der Interpolationsmethoden ermittelt eine stetige Fläche. Zu dieser Art gehört die *Radial Basis Function*. Entscheidend ist hier der definierbare Weichheitsfaktor der Fläche, der zusammen mit der Entfernung des Stützpunktes vom Gitternetzpunkt das Gewicht ergibt. Ausführliche Untersuchungen hinsichtlich des Weichheitsfaktors sind notwendig, um diese Methode zur Rasterung der Bewegungsmodelle anwenden zu können [vgl. Golden 2002b].

Verwerfungen und Bruchkanten werden bei den oben genannten Verfahren nicht mehr korrekt wiedergegeben. Ein Mittelwert-Verfahren, das diesem Problem Rechnung trägt, ist das *Kriging*. Es geht davon aus, dass ein Punkt nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aussagekräftig für ein Rasterfeld ist. Diese stochastische Komponente ist Teil einer Gewichtungsfunktion, in die, ähnlich wie beim *Radial-Basis-Function*-Verfahren, benutzerabhängige Variablen mit eingehen. Die Bestimmung dieser Variablen erfordert gleichfalls weitere Untersuchungen [vgl. Rase 1996; Golden 2002b].

Eine dritte Art der Rasterung erfolgt flächen- oder funktionsbasiert. Die z-Koordinate des Gitternetzpunktes ist dann ein Wert der Funktion oder ein Schnittpunkt mit einer Fläche.

Bei der *Minimum Curvature*-Methode wird eine Fläche über alle Stützpunkte gespannt. Ziel ist es, die Krümmung der Fläche so klein wie möglich zu halten, bei gleichzeitig maximaler Annäherung an die Stützpunkte. Die Gewichtung dieser beiden Kriterien legt der Weichheitsfaktor fest [vgl. Golden 2002b].

Mittels der Delaunay Triangulation werden die Bildpunkte zu möglichst kleinen Dreiecken verbunden, die sich im Raum aufspannen. Zur Bestimmung des z-Wertes eines Gitternetzpunktes wird als erstes bestimmt, zwischen welchen Stützpunkten er

³⁷ z.B. Delaunay- Triangulation

sich befindet. Anschließend errechnet sich der z-Wert dieses Gitternetzpunktes durch lineare Interpolation in das Dreieck zwischen diesen Stützpunkten [vgl. Golden 2002b].

Bewertung der Rasterverfahren

Die zur manuellen Auswertung herangezogenen visualisierten Daten aus dem Programm Golden Surfer sind unterteilt nach dem jeweils angewendeten Rasterverfahren in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellt. Die Berechnungen erfolgten für jedes Rasterverfahren ausgehend vom gleichen Datenmaterial. Für die Darstellungen wurde der gleiche Maßstab verwendet, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

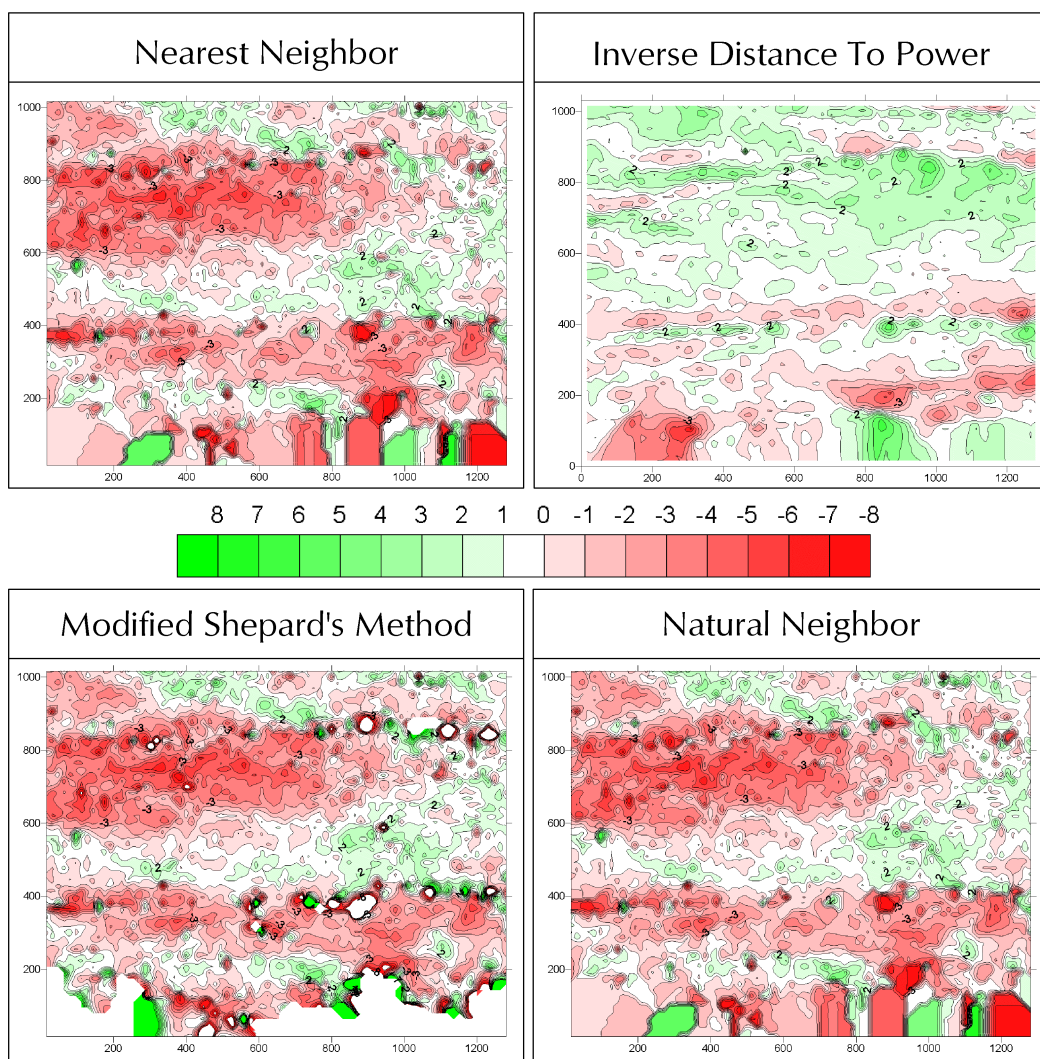


Abbildung 6-3: Rastermethoden der Software Golden Surfer angewendet auf die d_x Komponente des Bewegungsmodells $UBM_{(1)}^L$ - Teil 1

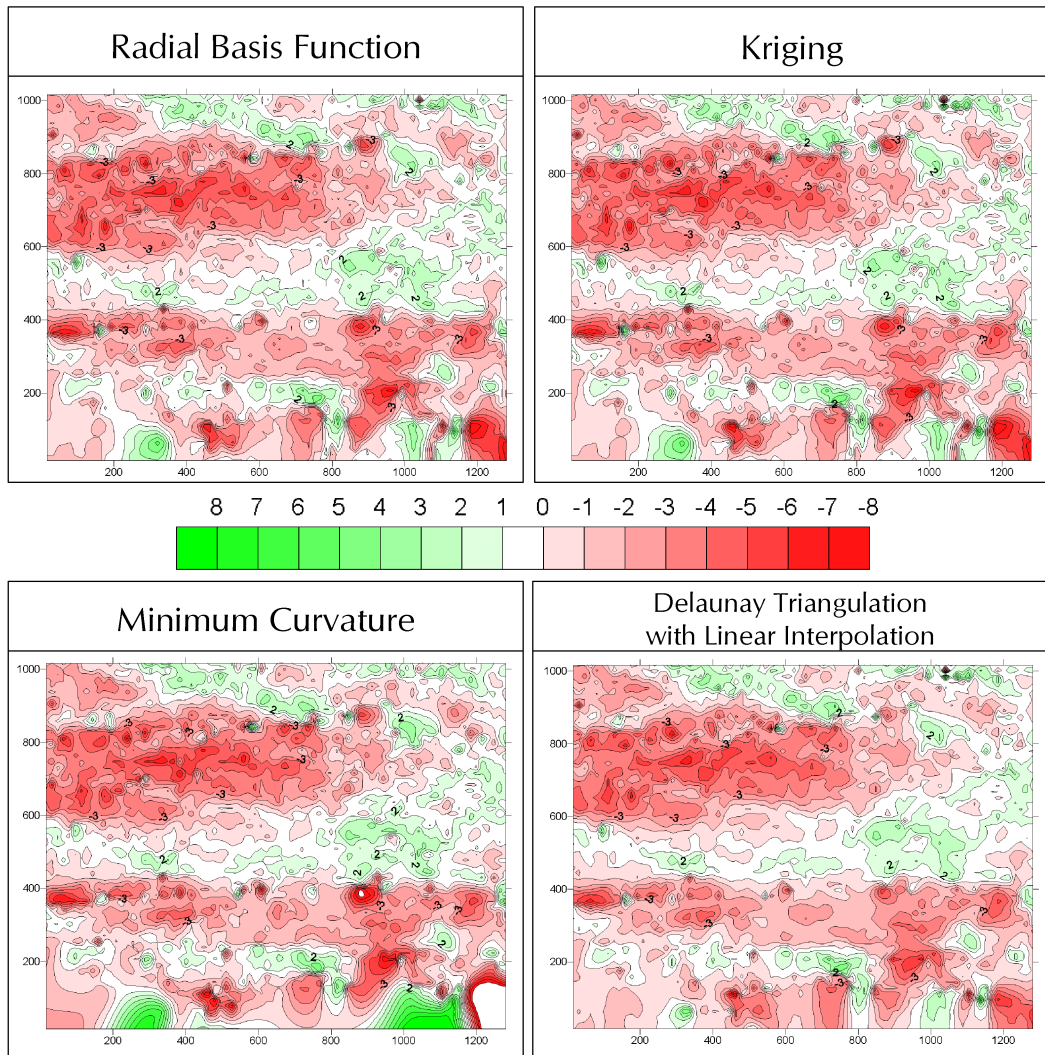


Abbildung 6-4: Rastermethoden der Software Golden Surfer angewendet auf die d_x Komponente des Bewegungsmodells $UBM_{(1)}^L$ - Teil 2

Anhand der genannten Beurteilungskriterien lassen sich Aussagen zu den einzelnen Rasterbedingungen treffen, die in Tabelle 6-2 zusammengefasst wurden.

<i>Rasterverfahren</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>verwendbar ?</i>
<i>Kriging</i>				Ja
<i>Delaunay Triangulation with Linear Interpolation</i>		x		ja, wenn Rand abgeschnitten
<i>Inverse Distance to a Power</i>				Ja
<i>Minimum Curvature</i>	x	x		nein, Artefakte
<i>Modified Shepard's Method</i>	x	x		nein, Artefakte
<i>Natural Neighbor</i>		x		ja, wenn Rand abgeschnitten
<i>Nearest Neighbor</i>			x	nein, zu geringe Glättung
<i>Radial Basis Function</i>				Ja

Tabelle 6-2: Manuelle Auswertung der Rasterverfahren;
1: Häufigkeit von Artefakten, 2: Verhalten am Rand, 3: Gewicht
zwischen Detailtreue und Glättung, x: mangelhaft³⁸

6.5 Erste Bildzuordnungen mit DPCOR

Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Datensatz “Pauls 2“ ausgewählt. Erste Bildzuordnung-Versuche sollen an dieser Stelle analysiert werden.

Zu diesem Zweck wurden mit DPLX homologe Startpunkte für eine Bewegungszuordnung $C_{L_2}^{L_1}$ und eine Stereozuordnung $C_{R_1}^{L_1}$ der Bildern L_{11} und L_{12} beziehungsweise in L_{11} und R_{11} bestimmt.

In [Redweik 1993] waren bereits erfolgreiche Bildzuordnungen mit DPCOR in Verbindung mit Aufnahmen von Wasseroberflächen demonstriert worden. Auch die Zuordnungen $C_{L_2}^{L_1}$ und $C_{R_1}^{L_1}$ dieses Versuches verliefen erfolgreich. Es wurde jeweils eine große Menge homologer Punkte gefunden. Beide Ergebnispunktmengen sind mit dem ursprünglichen Bildmaterial als Hintergrund visualisiert worden.

Charakteristische Ausschnitte dieser Visualisierungen sind in Abbildung 6-5 wiedergegeben. Es ist sichtbar, dass fast der gesamte Bildraum mit homologen Punkten bedeckt ist. Mögliche Ursachen für Ausnahmereiche ohne homologe Punkte werden in diesem Kapitel diskutiert.

³⁸ Alle drei dargestellten Kriterien sind Bestandteil der Bewertung. Ein Verfahren, das Artefakte, zu geringe Glättung oder zu geringe Detailwiedergabe aufweist, ist abzulehnen. Mangelhaftes Randverhalten kann toleriert werden, wenn die Randbereiche bei der Interpolation verworfen werden.

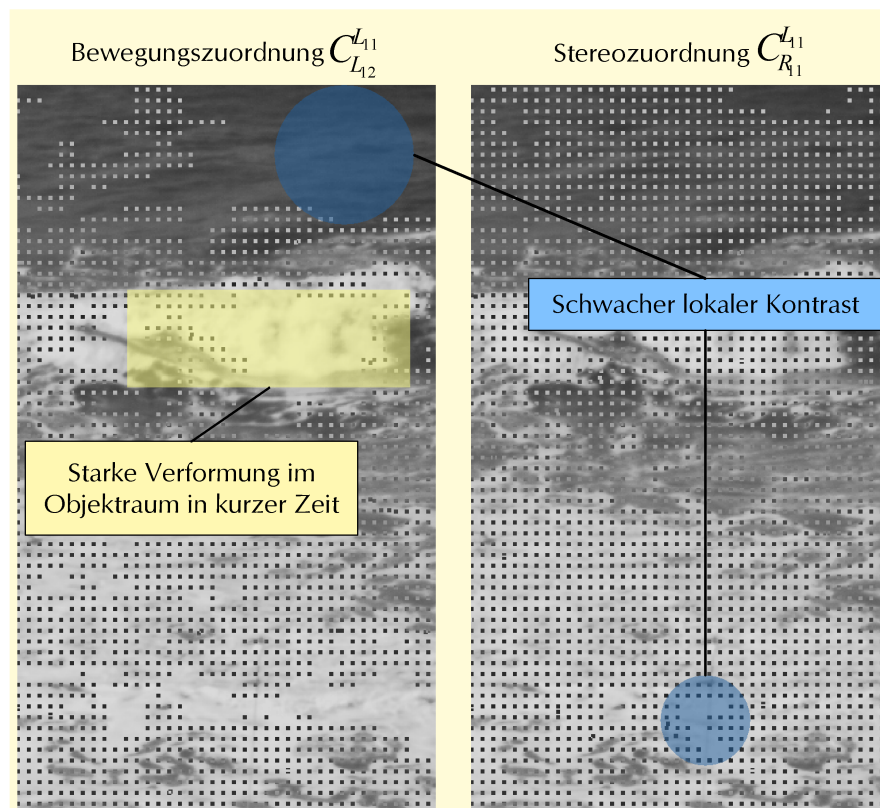


Abbildung 6-5: Versagen der Bildzuordnung mit DPCOR

Bereiche, in denen keine homologen Punkte vorliegen, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Abbilder rasanter Verformung und Bewegung im Objektraum und
- Bereiche schwachen lokalen Kontrastes.

Rasante Verformung und Bewegung treten bei sich brechenden Wellen auf. In diesen Bereichen stellt das Wasser kein kompaktes Volumen mehr dar. Es kommt zu Überschattungen und Diskontinuitäten der Oberfläche, welche nach den in Abschnitt 3.1 [Luhmann 2000, S.417] zitierten Regeln zu einem Versagen der Zuordnung führen können. Auch stückweise glatte Oberflächen dieser Bereiche verformen sich so schnell, dass das Auffinden von homologen Punkten in zwei Bildern aufeinander folgender Zeitpunkte (T_{11} und T_{12}) selbst für einen menschlichen Betrachter nicht möglich ist. In Abbildung 6-5 ist ein solcher Bereich markiert („starke Verformung im Objektraum in kurzer Zeit“).

Bereiche schwachen lokalen Kontrastes kann man sowohl in der Bewegungs- als auch in der Stereozuordnung erkennen (vgl. Abbildung 6-5: „schwacher lokaler Kontrast“). Sie sind in kamerafernen Bereichen und ebenfalls bei sich brechenden Wellen zu verzeichnen.

Abbilder kameraferner Objekte weisen aufgrund des kleineren Bildmaßstabes eine geringere Auflösung im Objektraum auf. Die für den lokalen Kontrast im Bild wichtigen Details werden in kamerafernen Bereichen verwischt. Diesen Trend verstärkt die durch den längeren Weg durch die Atmosphäre zu den fernen Bereichen bedingte stärkere, diffuse Streuung des Lichtes. Geringere Auflösung im Objektraum und stärkere diffuse Streuung des Lichtes wirken sich negativ auf den Kontrast im Bild des kamerafernen Objektes aus.

Die Ursache für die Kontrastschwäche im Bildmaterial bei sich brechenden Wellen ist eine andere. Sich brechende Wellen sind in der Regel sehr hell. Die Kameras waren aber so eingestellt, dass die Grauwerte über das gesamte Spektrum des Bildes verteilt waren. Vorhandene Intensitätsunterschiede in sich brechenden Wellen wurden so zu einer Quantifizierung der Intensitätswerte zusammengefasst. Eine Aussteuerung der Kameras speziell auf die Intensität der Rückstreuung von den brechenden Wellen könnte hier Abhilfe schaffen. Dies würde auf Kosten radiometrischer Auflösung in den anderen Bereichen des Bildes gehen.

Kontrastschwäche wirkt sich gleichermaßen negativ auf Bewegungs- und Stereozuordnung aus, da das gleiche Bildmaterial mit gleichem Kontrast zu Grunde liegt. Die unverhältnismäßig größeren Flächen ohne homologe Punkte bei der Bewegungs- und Stereozuordnung lassen sich aber nicht ausschließlich auf schnelle Bewegung und Verformung im Objektraum zurückführen. Vielmehr ist zu vermuten, dass Kontrastschwäche und Verformung sich kumulativ verstärken und zusammen zu einem erkennbar schlechteren Zuordnungsergebnis führen.

Es bleibt festzuhalten, dass das stückweise Versagen der Bewegungs- und Stereozuordnung als nicht kritisch hinsichtlich einer erfolgreichen Bildsequenzzuordnung einzuschätzen ist, solange insgesamt genügend homologe Punkte gefunden werden, und diese homogen über den Bildraum verteilt sind. Zuordnungsversagen in ganzen Bereichen der

Stereozuordnung ist jedoch nicht tolerierbar, da die Listen von homologen Punkten der Stereozuordnung das Ergebnis der gesamten Bildsequenzzuordnung darstellen.

Im Rahmen der hier vorgestellten Voruntersuchungen hat sich das Programm DPCOR zur Bildzuordnung bewährt.

7 Ergebnisanalyse der Bildsequenzuordnung

7.1 Zielstellung der Analyse

In diesem Abschnitt sollen die in Abschnitt 0 vorgestellten Ergebnisse eines ersten erfolgreichen Testes des entwickelten Verfahrens der Bildsequenzuordnung analysiert werden. Dabei soll sowohl die Prädiktion mittels linearer Extrapolation als auch die Prädiktion mittels Rasterung und Interpolation eingehend statistisch untersucht werden. Augenmerk liegt dabei auf einer möglichen Veränderung der statistischen Kenndaten im Verlauf der Abarbeitung der Daten. Es soll die These, dass sich Ungenauigkeiten mit fortschreitendem Verlauf nicht vergrößern (vgl. Abschnitt 5.2), überprüft werden.

Die vorliegenden Stereozuordnungen werden zur Berechnung von dreidimensionalen Objektpunkten genutzt. Die aus diesen Punktwolken ableitbaren digitalen Oberflächenmodelle der Wasseroberfläche werden untersucht und auf Plausibilität überprüft.

Alle folgenden Analysen beziehen sich auf eine Stichprobe jeder 10. Bildzuordnung aus den in Abschnitt 0 vorgestellten Zuordnungsergebnissen. Dazu wurden die Bewegungszuordnungen der linken Sequenz $C_{L_2}^{L_1}$, $C_{L_{42}}^{L_{41}}$, $C_{L_{22}}^{L_{21}}$, $C_{L_{32}}^{L_{31}}$, $C_{L_{42}}^{L_{41}}$, $C_{L_{52}}^{L_{51}}$, $C_{L_{62}}^{L_{61}}$, $C_{L_{72}}^{L_{71}}$, $C_{L_{82}}^{L_{81}}$, $C_{L_{92}}^{L_{91}}$, $C_{L_{102}}^{L_{101}}$ und zum Anderen die Stereozuordnungen $C_{R_1}^{L_1}$, $C_{R_{11}}^{L_{11}}$, $C_{R_{21}}^{L_{21}}$, $C_{R_{31}}^{L_{31}}$, $C_{R_{41}}^{L_{41}}$, $C_{R_{51}}^{L_{51}}$, $C_{R_{61}}^{L_{61}}$, $C_{R_{71}}^{L_{71}}$, $C_{R_{81}}^{L_{81}}$, $C_{R_{91}}^{L_{91}}$, $C_{R_{101}}^{L_{101}}$ ausgewählt. Da der Stichprobenumfang 10% der Gesamtauswahl der Bildzuordnungen übersteigt, die Stichprobe regelmäßig über die Gesamtauswahl verteilt ist und somit zeitliche Veränderungen erfasst werden können, kann die Stichprobe als durchgreifend angesehen werden.

7.2 Untersuchung der Prädiktion durch lineare Extrapolation

Eines der Grundprinzipien, auf die das vorgestellte Verfahren zur Bildsequenzuordnung beruht, ist die Prädiktion durch lineare Extrapolation von gemessenen Punktbewegungen eines Zeitintervalls $\mathcal{A}_{(i)}$. Dieses Prinzip setzt kurzfristig³⁹ gleichförmige, geradlinige Bewegung der Bildpunkte voraus und dient zur Abschätzung einer sich fortsetzenden Bewegung (vgl. Abschnitt 5.2.2; vgl. Formel 5-2).

³⁹ Mit kurzfristig ist der Zeitraum von drei aufeinander folgenden Aufnahmen gemeint.

Die Erfüllung dieser Voraussetzung soll in diesem Abschnitt untersucht werden. Dazu wird die Stichprobe der Ergebnisse der Bewegungszuordnungen näher betrachtet. Es soll sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Genauigkeit des Prädiktionsverfahrens der linearen Extrapolation abgeschätzt werden.

Die Zuordnung durch DPCOR ist das Ziel der Prädiktion. Die Prädiktion muss daher am Zuordnungsergebnis gemessen werden. Das Ergebnis dieser Zuordnung, die verbesserte Positionen des Startpunktes, wird deshalb als Sollwert bzw. fehlerfreier Erwartungswert mit 100% Zuverlässigkeitsniveau festgelegt.

7.2.1 Zuverlässigkeitsabschätzung

Bei der Zuverlässigkeitsabschätzung sollen die prädizierten Startpunkte in zwei Gruppen unterschieden werden.

1. Gruppe – Reguläre Zuordnung: Die Zuordnung dieser Startpunkte war erfolgreich. Die prädizierten Positionen unterscheiden sich von der durch DPCOR bestimmten Position nicht mehr als 8 Pixel.
2. Gruppe – Ausreißer: Die Zuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit DPCOR war für diese Startpunkte nicht erfolgreich oder die durch DPCOR ermittelten Punktpositionen unterscheiden sich von den prädizierten Positionen um mehr als 8 Pixel.

Das Verhältnis des Auftretens des ersten Falles zur Gesamtzahl der prädizierten Startpunkte liefert eine Abschätzung der Zuverlässigkeit der Prädiktion, unter der Voraussetzung, dass die Zuverlässigkeit der Zuordnung durch DPCOR mit einer Zuverlässigkeit von 100% angenommen wird.

	Absolut	Relativ
Keine Zuordnung	49	2.3%
Ausreißer ds > 8Pixel	14	0.6%
Ausreißer gesamt	63	2.9%
Regulär	2096	97.1%
Anzahl Startpunkte	2159	100.0%

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Anzahl erfolgreich (regulär) zugeordneter Startpunkte zu Ausreißern und nicht zugeordneten Startpunkten⁴⁰

Der Ausreißeranteil an der Gesamtzahl der prädizierten Startpunkte bleibt unter 3% (vgl. Tabelle 7-1).

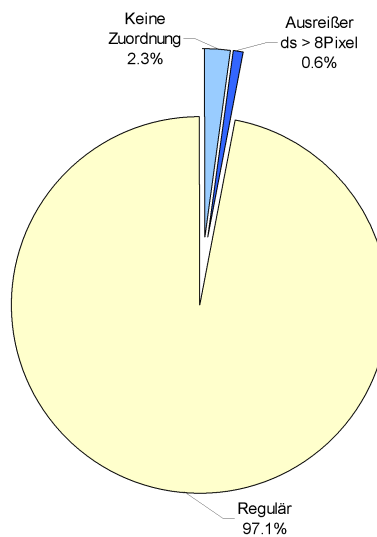


Abbildung 7-1: Darstellung der Gegenüberstellung (Tabelle 7-1)

Die Zuverlässigkeit der Prädiktion durch lineare Extrapolation ist mit 97,1% als sehr hoch einzuschätzen (vgl. Abbildung 7-1). Die Annahme von kurzzeitig gleichförmig geradlinigen Punktbewegungen ist somit hinreichend statistisch gestützt.

⁴⁰ Warum DPCOR Zuordnungsergebnisse liefert, die um mehr als das festgelegte Toleranzmaß von hier vier Pixeln (vgl. Abschnitt 4.2.4) vom Startpunkt abweichen, ist noch in zukünftigen Analysen zu klären.

7.2.2 Abweichung der Prädiktion von der Zuordnung

Wird ein Startpunkt durch DPCOR zugeordnet, so kann die ursprünglich prädizierte Position des Punktes mit der durch DPCOR verbesserten verglichen werden. Die Abweichung der Positionen ist dann:

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}$$

Formel 7-1 Abweichung der Prädiktion (ante) vom Zuordnungsergebnis (post)

Dabei ist:

- d_x, d_y die Abweichung eines Punktes in x- und y-Koordinatenrichtung,
- x_a, y_a die prädizierte Position des Punktes (diente als Startpunkt für DPCOR) und
- x_p, y_p die von DPCOR ermittelte Position dieses Punktes.

Für jede Bewegungszuordnungen der gesamten Stichprobe $C_{L_2}^{L_1}, C_{L_{12}}^{L_{11}}, C_{L_{22}}^{L_{21}}, C_{L_{32}}^{L_{31}}, C_{L_{42}}^{L_{41}}, C_{L_{52}}^{L_{51}}, C_{L_{62}}^{L_{61}}, C_{L_{72}}^{L_{71}}, C_{L_{82}}^{L_{81}}, C_{L_{92}}^{L_{91}}$ und $C_{L_{102}}^{L_{101}}$ werden jeweils alle d_x und d_y zu den Abweichungs- Vektoren \vec{d}_x und \vec{d}_y zusammengefasst:

$$\left. \begin{aligned} \vec{d}_x &:= (d_x(1) \quad d_x(2) \quad \dots \quad d_x(n)) \\ \vec{d}_y &:= (d_y(1) \quad d_y(2) \quad \dots \quad d_y(n)) \end{aligned} \right\} \forall \text{ Punkte } 1..n$$

Formel 7-2 Abweichungsvektoren für alle Startpunkte 1 bis n einer Bildzuordnung

Dabei ist:

- \vec{d}_x Abweichungen der Prädiktion in x-Richtung,
- \vec{d}_y Abweichungen der Prädiktion in y-Richtung,
- n Anzahl der erfolgreich zugeordneten Startpunkte.

Diese \vec{d}_x und \vec{d}_y sollen nun getrennt analysiert werden.

Der Wertebereich von \vec{d}_x und \vec{d}_y zwischen -2 und 2 ist in 11 Klassen eingeteilt. Alle Werte, die kleiner als -2 oder größer als 2 sind, werden zu der in Abschnitt 7.2.1 definierten Gruppe 2 der Ausreißer aufgeschlagen.

Der Wertebereich wurde dabei so gewählt, dass der Anteil aller Ausreißer deutlich weniger als 10% der Gesamtstartpunktanzahl ausmacht.

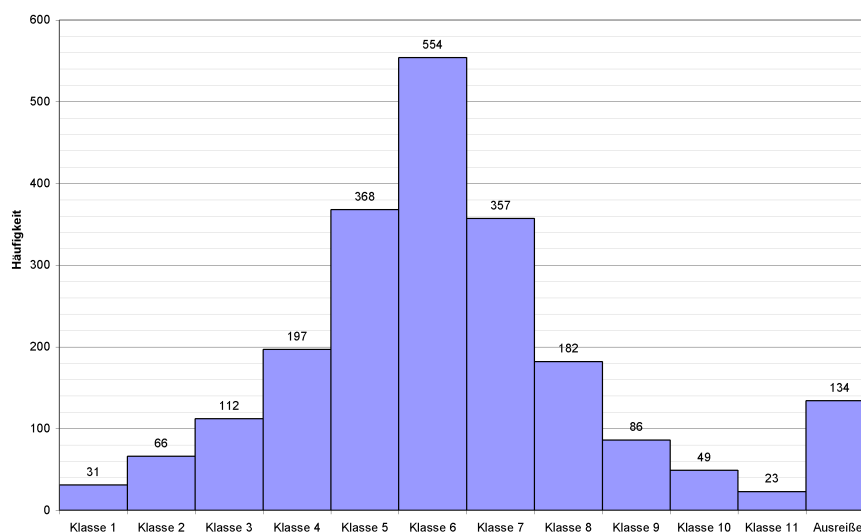


Abbildung 7-2: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_x der Prädiktion durch lineare Extrapolation

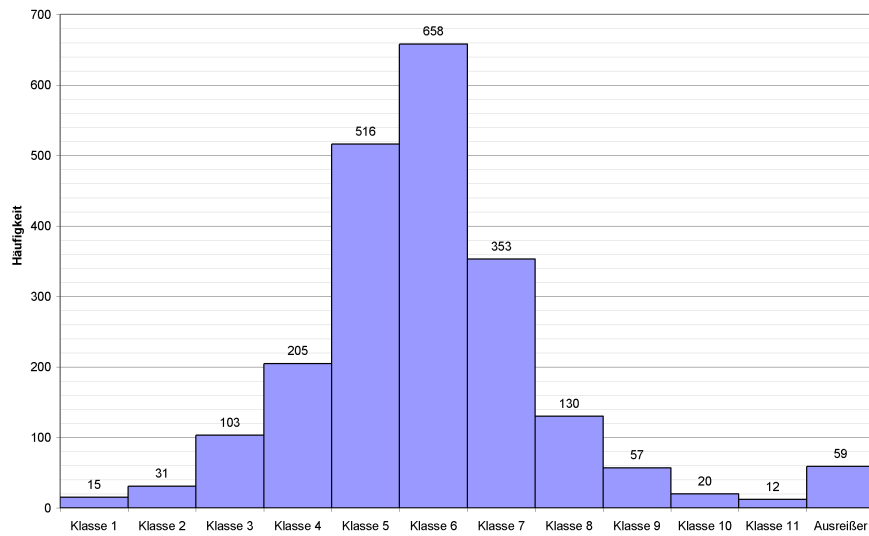


Abbildung 7-3: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_y der Prädiktion durch lineare Extrapolation

Die absoluten Klassenhäufigkeiten der \vec{d}_x und \vec{d}_y ist in Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 dargestellt. Die relativen Klassenhäufigkeiten sind in Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 über der Klassenmitte abgetragen.

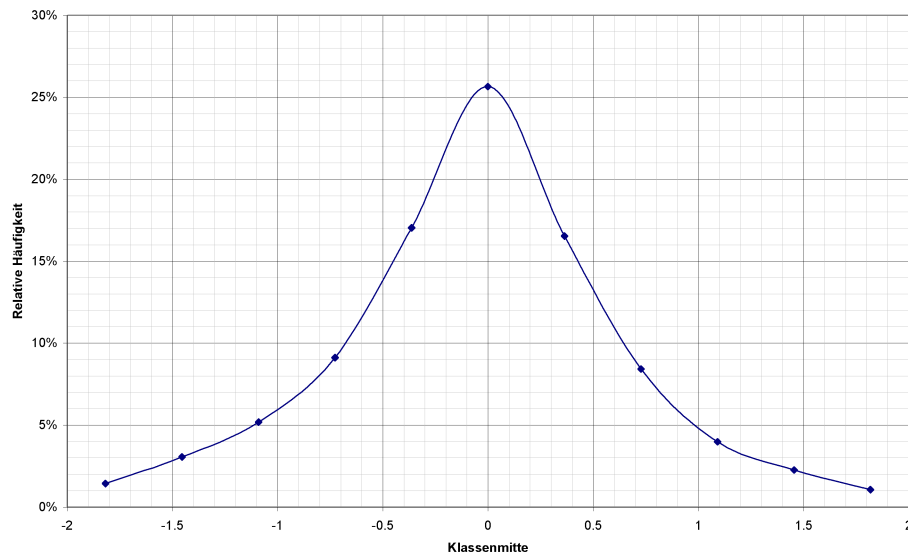


Abbildung 7-4: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_x der Prädiktion durch lineare Extrapolation

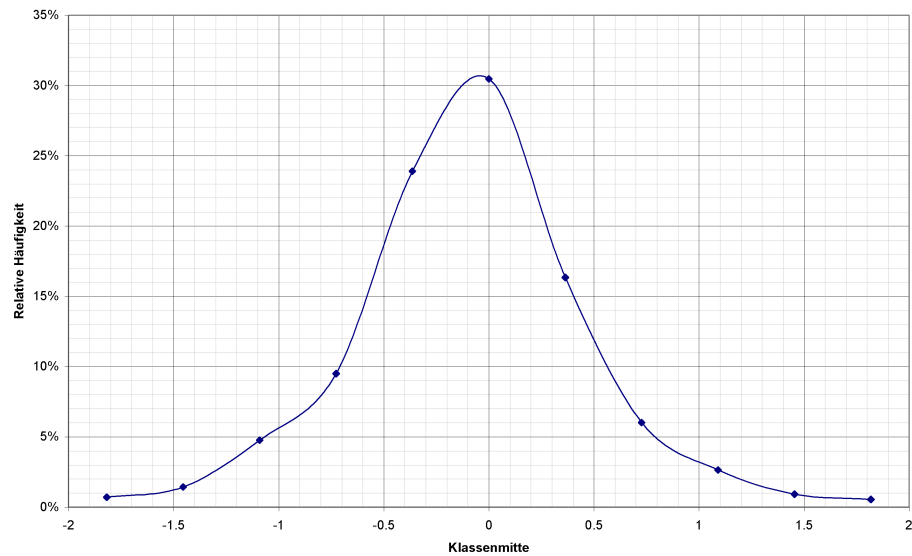


Abbildung 7-5: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_y der Prädiktion durch lineare Extrapolation

Wie in Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 sichtbar, können die Abweichungsvektoren als um Null normalverteilt charakterisiert werden.

7.2.3 Genauigkeitsabschätzung

Da die durch DPCOR bestimmte Punktposition als fehlerfreier Erwartungswert, wie in Abschnitt 7.2 definiert, zur Beurteilung der Prädiktion anzusehen ist, und die Abweichungen \vec{d}_x und \vec{d}_y normalverteilt sind, können \vec{d}_x und \vec{d}_y , wie in Abschnitt 7.2.2 gezeigt, als zufällige Abweichung⁴¹ betrachtet werden. Somit lassen sich die Varianzen der zufälligen Abweichungen $\mathbf{e}_x = \vec{d}_x$, $\mathbf{e}_y = \vec{d}_y$ und $\mathbf{e} = (\mathbf{e}_x \ \mathbf{e}_y)^T$ nach [Pelzer 1985, S.41] und [Kahmen 1997, S.16] wie folgt berechnen:

⁴¹ Zufällige Messabweichung: [vgl. Welsch 2000, S.104]

$$\Sigma_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \mathbf{e}_{2,n} \cdot \mathbf{e}_{n,2}^T = \frac{1}{n} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_x^T & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_x^T \\ \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_y^T & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_y^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_x^2 & \mathbf{s}_{yx} \\ \mathbf{s}_{xy} & \mathbf{s}_y^2 \end{pmatrix}$$

Formel 7-3 Kovarianzmatrix der Prädiktion [nach Pelzer 1985, S.47; Kahmen 1997, S.16]

Dabei ist:

- Σ_{xy} Kovarianzmatrix der Prädiktion,
- $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ zufällige Abweichung der Prädiktion von dem Erwartungswert DPCOR- Zuordnungsergebnis,
- \mathbf{s}_x Standardabweichung der Prädiktion in x-Richtung,
- \mathbf{s}_y Standardabweichung der Prädiktion in y-Richtung
- $\mathbf{s}_{xy} = \mathbf{s}_{yx}$ Kovarianz zwischen x- und y-Richtung.

Auf diese Art und Weise werden für jede der Stichproben $C_{L_2}^{L_1}, C_{L_{12}}^{L_{11}}, C_{L_{22}}^{L_{21}}, C_{L_{32}}^{L_{31}}, C_{L_{42}}^{L_{41}}, C_{L_{52}}^{L_{51}}, C_{L_{62}}^{L_{61}}, C_{L_{72}}^{L_{71}}, C_{L_{82}}^{L_{81}}, C_{L_{92}}^{L_{91}}$ und $C_{L_{102}}^{L_{101}}$ die Varianzen und Kovarianzen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 aufgezeigt.

DPCOR akzeptiert nur Startpunkte, deren Unterschied zur exakten, durch DPCOR berechneten Position kleiner als ein festzulegendes Toleranzmaß ist (vgl. Abschnitt 4.2.4). Dieses Toleranzmaß ist hier auf 4 Pixel festgelegt (vgl. Abschnitt 0). Verglichen mit diesem Toleranzmaß sind die Standardabweichungen \mathbf{s}_x und \mathbf{s}_y , die zwischen 0,58 und 1,28 Pixel schwanken, als niedrig einzuschätzen.

LEFT 1-100	Umfang	Kovarianzmatrix Sigma				Standardabweichungen		Korrelation	Ellipsenparameter Konfidenz=95%		
Daten	n [/]	σ_x^2 [Pixel ²]	σ_{yx} [Pixel ²]	σ_{xy} [Pixel ²]	σ_y^2 [Pixel ²]	σ_x [Pixel]	σ_y [Pixel]	Rxy [/]	Θ [°]	A [Pixel]	B [Pixel]
1	188	0.87	-0.10	-0.10	0.81	0.93	0.90	-0.11	-36.1	2.37	2.10
10	193	1.33	-0.01	-0.01	0.65	1.15	0.81	-0.01	-0.8	2.83	1.98
20	194	0.95	0.00	0.00	0.52	0.97	0.72	0.00	0.5	2.38	1.77
30	191	0.86	-0.01	-0.01	0.37	0.93	0.61	-0.01	-0.7	2.27	1.50
40	197	1.08	-0.01	-0.01	0.66	1.04	0.81	-0.01	-1.1	2.54	1.99
50	191	1.63	0.18	0.18	0.47	1.28	0.68	0.20	8.4	3.15	1.63
60	189	1.02	0.04	0.04	0.42	1.01	0.65	0.06	3.7	2.47	1.59
70	187	1.08	-0.11	-0.11	0.46	1.04	0.68	-0.15	-9.5	2.56	1.62
80	189	0.78	0.00	0.00	0.33	0.88	0.58	0.00	-0.3	2.16	1.41
90	189	1.21	-0.03	-0.03	0.61	1.10	0.78	-0.03	-2.5	2.70	1.91
100	188	0.97	-0.10	-0.10	0.62	0.98	0.79	-0.13	-15.1	2.44	1.89

Tabelle 7-2: Berechnete Konfidenzellipsenparameter der Prädiktion durch lineare Extrapolation

Zur Verdeutlichung der Varianzen und Kovarianzen werden in Tabelle 7-2 nach Formel 7-4 Konfidenzellipsen berechnet und in Abbildung 7-6 dargestellt.

$$w^2 = (\mathbf{s}_x^2 - \mathbf{s}_y^2)^2 + 4\mathbf{s}_{xy} \quad \text{Hilfsgröße}$$

$$\left. \begin{aligned} A^2 &= X_{2,1-a}^2 \cdot \frac{1}{2} (\mathbf{s}_x^2 + \mathbf{s}_y^2 + w) \\ B^2 &= X_{2,1-a}^2 \cdot \frac{1}{2} (\mathbf{s}_x^2 + \mathbf{s}_y^2 - w) \end{aligned} \right\} \text{Ellipsenhalbachsen}$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\mathbf{s}_{xy}}{\mathbf{s}_x^2 - \mathbf{s}_y^2} \right) \quad \text{Orientierung von A}$$

**Formel 7-4 Berechnung von Konfidenzellipsen
[nach Pelzer 1985, S.52]**

Dabei ist:

- $\mathbf{s}_x, \mathbf{s}_y, \mathbf{s}_{xy} = \mathbf{s}_{yx}$ vgl. Formel 7-3,
- $X_{2,1-a}^2$ Quantil der X^2 -Verteilung
(2 Freiheitsgrade, $1 - a$ Konfidenzniveau),
- A, B große und kleine Halbachse der Ellipse,
- Θ Orientierung der großen Halbachse.

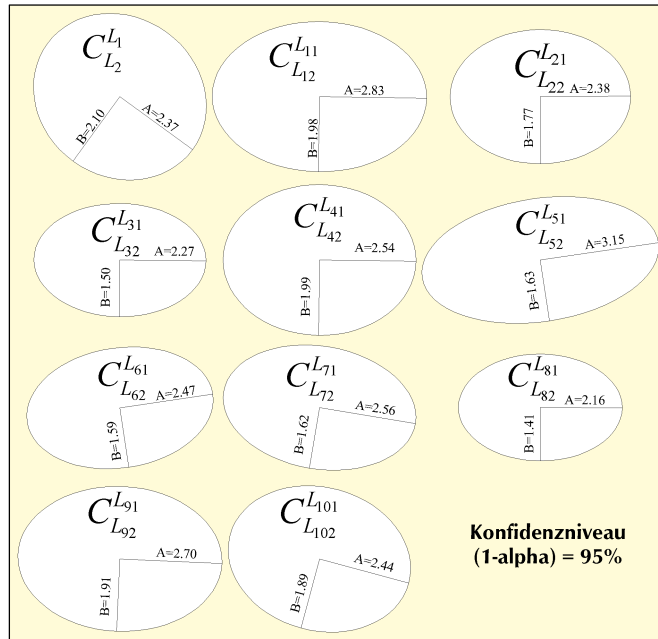


Abbildung 7-6: Konfidenzellipsen der Prädiktion durch lineare Extrapolation⁴²

Man kann sowohl in den Berechnungen (Tabelle 7-2) als auch in der grafischen Darstellung (Abbildung 7-6) erkennen, dass keine wesentlichen Veränderungen im Genauigkeitsniveau der prädizierten Punktposition vorliegen. Insbesondere lassen sich keine mit dem zeitlichen Verlauf des Algorithmus wachsenden Einflüsse feststellen. Dieser Umstand bestätigt die These, dass Prädiktionsungenauigkeiten sich nicht fortpflanzen, da nach jedem vollständigen Berechnungsschritt wieder Punkte mit DPCOR-Genauigkeit und Zuverlässigkeit vorliegen.

7.2.4 Bewertung

Das abgeschätzte Zuverlässigkeitsmaß der Prädiktion durch lineare Extrapolation liegt bei 97,1% (vgl. 7.2.1). 95% der prädizierten Startpunktpositionen befinden sich weniger als 2 Pixel von der durch DPCOR (vgl. 7.2.3) ermittelten Position entfernt. Die Abweichungen der prädizierten Position von dem durch DPCOR ermittelten Wert sind um Null normalverteilt (vgl. 7.2.2). Somit kann die Vorgehensweise der Prädiktion durch lineare Extrapolation als zulässig eingeschätzt werden.

⁴² Die Ellipsen sind entsprechend der Berechnungen (Tabelle 7-2) um Θ gedreht und maßstäblich gezeichnet. Alle Längenangaben sind in der Einheit Pixel.

7.3 Prädiktion durch Interpolation in regelmäßige Bewegungsmodelle

Das zweite vom Algorithmus verwendete Prädiktionsverfahren ist das der Ermittlung von Bewegungsvektoren durch Interpolation von Punktpositionen in regelmäßige Bewegungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.2.2). Diese Prädiktion wird zur Bestimmung der Startpunkte für die Stereozuordnungen verwendet. Sie soll daher anhand der Stereozuordnungen der Stichprobe $C_{R_1}^{L_1}$, $C_{R_{11}}^{L_{11}}$, $C_{R_{21}}^{L_{21}}$, $C_{R_{31}}^{L_{31}}$, $C_{R_{41}}^{L_{41}}$, $C_{R_{51}}^{L_{51}}$, $C_{R_{61}}^{L_{61}}$, $C_{R_{71}}^{L_{71}}$, $C_{R_{81}}^{L_{81}}$, $C_{R_{91}}^{L_{91}}$ und $C_{R_{101}}^{L_{101}}$ untersucht werden.

Die regelmäßigen Bewegungsmodelle (RBM) sind durch Rasterung aus den unregelmäßigen Bewegungsmodellen (UBM) ermittelt worden. Die UBM sind wiederum direkt von Ergebnissen der Bewegungszuordnungen mit DPCOR abgeleitet.

Die in Abschnitt 7.2 untersuchte Prädiktion der linearen Extrapolation hat somit keine direkten Auswirkungen auf die RBM und die Prädiktion durch Interpolation in die RBM. Die Untersuchung der Startpunkte der Stereozuordnungen $C_{R_1}^{L_1}$, $C_{R_{11}}^{L_{11}}$, $C_{R_{21}}^{L_{21}}$, $C_{R_{31}}^{L_{31}}$, $C_{R_{41}}^{L_{41}}$, $C_{R_{51}}^{L_{51}}$, $C_{R_{61}}^{L_{61}}$, $C_{R_{71}}^{L_{71}}$, $C_{R_{81}}^{L_{81}}$, $C_{R_{91}}^{L_{91}}$ und $C_{R_{101}}^{L_{101}}$ liefert deshalb direkte Aussagen über die Qualität der Prädiktion durch Interpolation in RBM dieser Startpunkte.

Die Untersuchung selbst soll sich dabei streng an dem Schema der Analyse in Abschnitt 7.2 orientieren. Es sind daher Zuverlässigkeit und Genauigkeit als Qualitätskriterien der Prädiktion abzuschätzen, um schließlich Aussagen über die Verwendbarkeit dieser Prädiktion treffen zu können.

Das mittels DPCOR bestimmte Stereozuordnungsergebnis wird im Rahmen der folgenden statistischen Betrachtungen als fehlerfreier Erwartungswert mit 100% Zuverlässigkeit unterstellt. Somit stellt das Verhältnis der durch DPCOR erfolgreich zugeordneten Startpunkte zur Gesamtzahl der prädizierten Startpunkte eine Abschätzung der Zuverlässigkeit der Prädiktion durch Interpolation dar. Die Genauigkeit soll wieder anhand der Abweichungen der prädizierten Punktpositionen von der durch DPCOR ermittelten Position eingeschätzt werden.

7.3.1 Zuverlässigkeitsabschätzung

Das Ergebnis der Prädiktion durch Interpolation sind Startpunkte für die folgende Stereozuordnung. Die Unterscheidung der prädizierten Startpunkte anhand des DPCOR-

Zuordnungsergebnisses erfolgt analog zu 7.2.1 in 2 Gruppen: reguläre Zuordnungen und Ausreißer.

Das Verhältnis der ersten Gruppe zur Gesamtzahl der prädizierten Startpunkte stellt die Abschätzung des Zuverlässigkeitsniveaus dar.

	Absolut	Relativ
Keine Zuordnung	58	4.0%
Ausreißer ds > 8Pixel	12	0.8%
Ausreißer gesamt	70	4.8%
Regulär	1375	95.2%
Anzahl Startpunkte	1445	100.0%

Tabelle 7-3: Gegenüberstellung Anzahl erfolgreich (regulär) zugeordneter Startpunkte zu Ausreißern und nicht zugeordneten Startpunkten

Der Anteil der Ausreißer an der Gesamtzahl bleibt dabei – ähnlich den Ergebnissen in 7.2.1 – unter 5% (vgl. Tabelle 7-3).

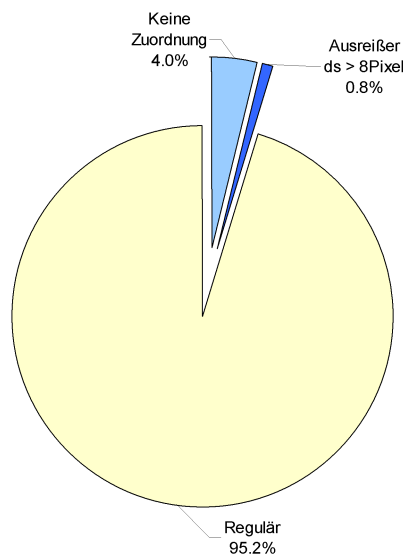


Abbildung 7-7: Darstellung der Gegenüberstellung (Tabelle 7-1)

Die Prädiktion durch Interpolation ist mit 95,2% hinreichend zuverlässig.

7.3.2 Abweichung der Prädiktion von der Zuordnung

Wie in 7.2.2 werden die Abweichungen der Prädiktion durch Interpolation mit der Formel 7-1 für jede Stereozuordnung der Stichprobe berechnet und anschließend zu den Vektoren \vec{d}_x und \vec{d}_y nach Formel 7-2 zusammengefasst.

Die Gesamtheit aller \vec{d}_x und \vec{d}_y aller Stereozuordnungen der Stichprobe soll hier analysiert werden. Dazu wird der gleiche Wertebereich von -2 bis 2 in 11 Klassen unterteilt und alle Punkte mit \vec{d}_x bzw. \vec{d}_y außerhalb des Wertebereiches der Gruppe der Ausreißer (Gruppe 2) aufgeschlagen.

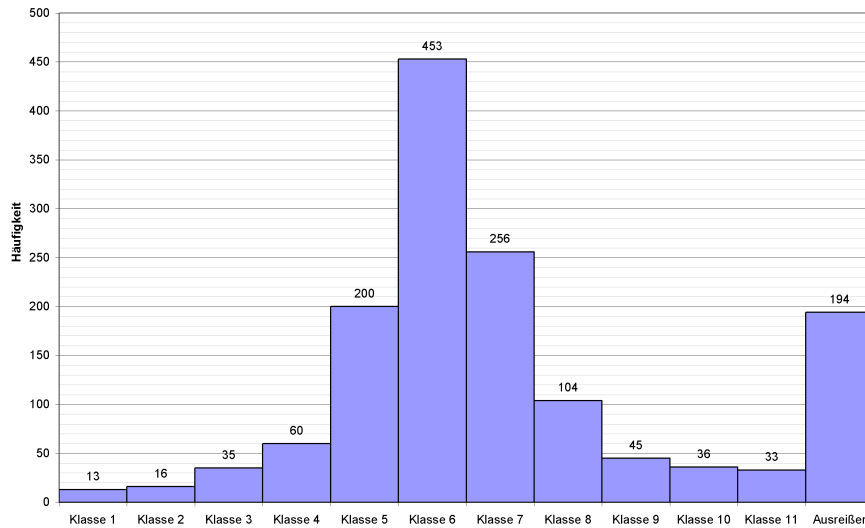


Abbildung 7-8: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_x der Prädiktion durch Interpolation

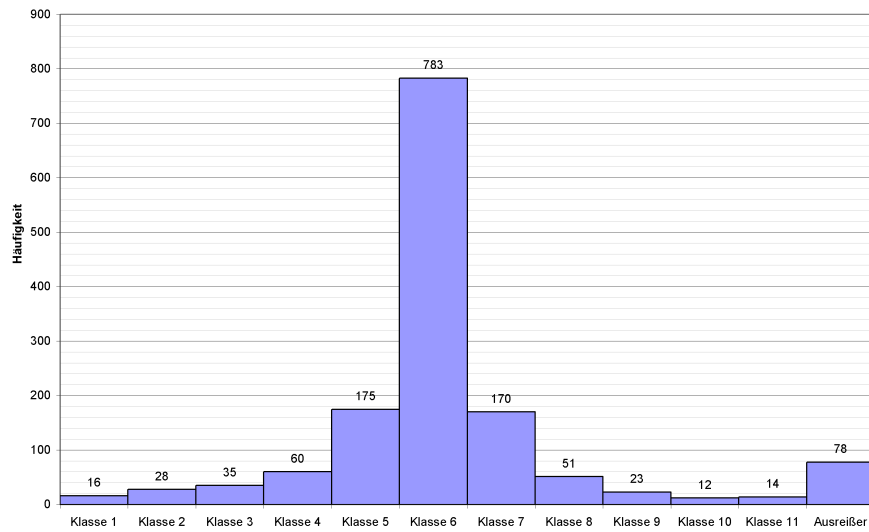


Abbildung 7-9: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_y der Prädiktion durch Interpolation

Die absoluten Klassenhäufigkeiten der \vec{d}_x und \vec{d}_y sind in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 dargestellt. Die relativen Klassenhäufigkeiten sind in Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 über der jeweiligen Klassenmitte abgetragen.

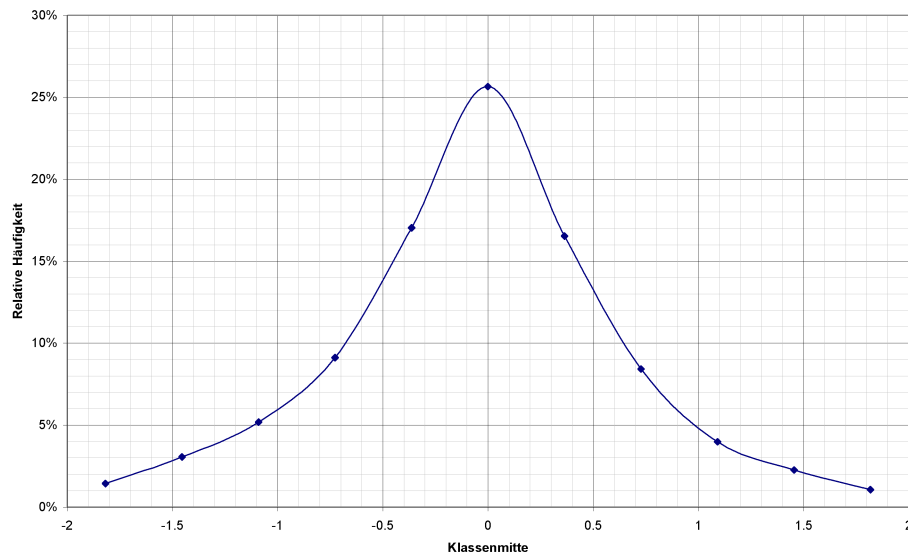


Abbildung 7-10: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_x der Prädiktion durch Interpolation

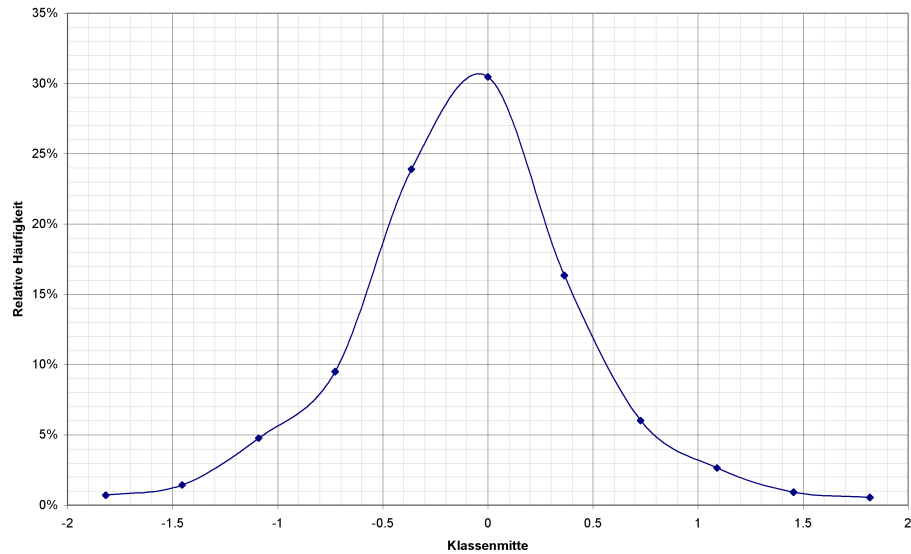


Abbildung 7-11: Histogramm des Abweichungsvektors \vec{d}_y der Prädiktion durch Interpolation

Wie in Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 sichtbar, können die Abweichungsvektoren als um Null normalverteilt angesehen werden.

7.3.3 Genauigkeitsabschätzung

Der Argumentation aus 7.2.3 folgend können die Abweichungen der Prädiktion von dem Zuordnungsergebnis \vec{d}_x und \vec{d}_y als zufällige Abweichungen $\mathbf{e}_x = \vec{d}_x$ und $\mathbf{e}_y = \vec{d}_y$ betrachtet werden. Eine Berechnung der Varianzen und Kovarianzen ist nach Formel 7-3 möglich. Die Varianzen und Kovarianzen können durch Formel 7-4 als Konfidenz-ellipsen für jede Stereozuordnung der Stichprobe verdeutlicht werden. Die Konfidenz-ellipsen sind in Abbildung 7-12 und ihre Parameter in Tabelle 7-4 dargestellt.

STEREO 1-100	Umfang n []	Kovarianzmatrix Sigma				Standardabweichungen		Korrelation Rxy []	Ellipsenparameter (Konfidenz=95%)		
		σ_x^2 [Pixel ²]	σ_{yx} [Pixel ²]	σ_{xy} [Pixel ²]	σ_y^2 [Pixel ²]	σ_x [Pixel]	σ_y [Pixel]		Θ [°]	A [Pixel]	B [Pixel]
stereo 1	126	0.30	-0.12	-0.12	0.22	0.54	0.47	-0.46	-36.46	1.80	1.68
stereo 10	132	1.59	0.01	0.01	0.40	1.26	0.63	0.01	0.52	2.75	1.94
stereo 20	134	1.05	-0.03	-0.03	0.23	1.02	0.47	-0.06	-2.02	2.48	1.69
stereo 30	135	0.69	-0.01	-0.01	0.16	0.83	0.40	-0.03	-1.06	2.23	1.56
stereo 40	134	0.19	-0.04	-0.04	0.27	0.44	0.52	-0.19	-66.11	1.76	1.62
stereo 50	141	0.90	-0.10	-0.10	0.77	0.95	0.88	-0.12	-28.07	2.39	2.29
stereo 60	131	3.80	-0.08	-0.08	0.19	1.95	0.43	-0.10	-1.31	3.42	1.61
stereo 70	131	2.08	0.23	0.23	0.54	1.44	0.73	0.22	8.30	2.94	2.10
stereo 80	126	0.46	0.19	0.19	0.32	0.68	0.56	0.50	34.56	2.02	1.83
stereo 90	129	0.48	-0.09	-0.09	0.15	0.69	0.39	-0.35	-14.72	2.04	1.52
stereo 100	126	0.99	-0.21	-0.21	0.18	0.99	0.42	-0.51	-13.88	2.44	1.58

Tabelle 7-4: Berechnete Konfidenzellipsenparameter der Prädiktion durch Interpolation

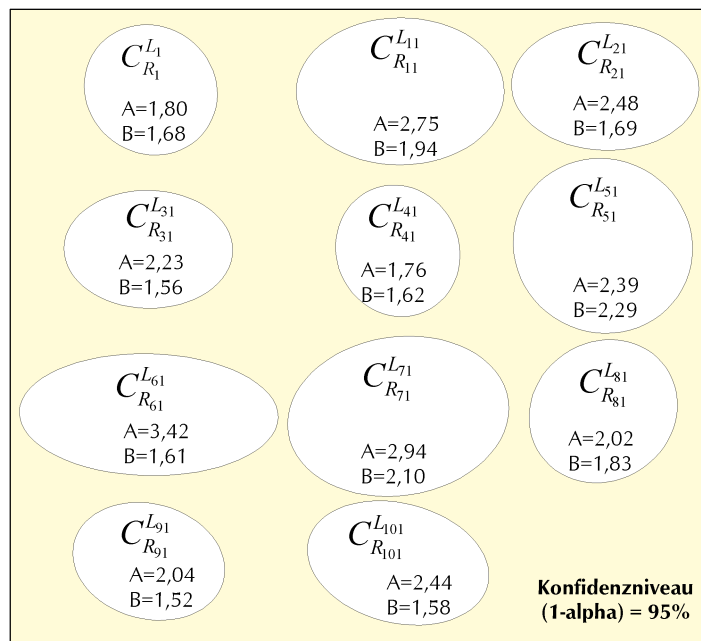


Abbildung 7-12: Konfidenzellipsen der Prädiktion durch Interpolation⁴³

Die Genauigkeiten der Prädiktion durch Interpolation liegen im gleichen Niveau wie bei der Prädiktion durch lineare Extrapolation (vgl. Abschnitt 7.2.3) und sind verglichen mit DPCORs Toleranzmaß zum Verwerfen von Startpunkten als hoch anzusehen.

⁴³ Die Ellipsen sind entsprechend der Berechnungen (Tabelle 7-2) um Θ gedreht und maßstäblich gezeichnet. Alle Längenangaben sind in der Einheit Pixel.

7.3.4 Bewertung

Das abgeschätzte Zuverlässigkeitsmaß der Prädiktion durch Interpolation in regelmäßige Bewegungsmodelle liegt bei 95,2% (vgl. 7.3.1). 95% der durch Interpolation prädizierten Startpunktpositionen befinden sich weniger als 2,5 Pixel von der durch DPCOR (vgl. 7.3.3) ermittelten Position entfernt. Die Abweichungen der prädizierten Position von dem durch DPCOR ermittelten Wert sind um Null normalverteilt (vgl. 7.3.2). Somit ist die Prädiktion durch Interpolation in die Bewegungsmodelle zur Startpunktbestimmung geeignet.

7.4 Beurteilung der ersten Anwendung des Algorithmus

Die für die weitere Verarbeitung wesentlichen Ergebnisse der Bildsequenzuordnung sind die homologen Punkte der Stereozuordnungen. Sie können bei bekannten Orientierungsparametern der Kameras durch räumliches Vorwärtseinschneiden zur Berechnung von dreidimensionalen Objektpunkten genutzt werden. Die Ergebnispunktmengen der Stereozuordnungen $C_{R_1}^{L_1}$, $C_{R_{11}}^{L_{11}}$, $C_{R_{21}}^{L_{21}}$, $C_{R_{31}}^{L_{31}}$, $C_{R_{41}}^{L_{41}}$ und $C_{R_{51}}^{L_{51}}$ sind so durch räumliches Vorwärtseinschneiden mit dem Programmsystem BLUH (vgl. Abschnitt 4.2.5) in den dreidimensionalen Objektraum überführt worden und liegen als dreidimensionale Punktmengen vor.

Aufgrund der Tatsache, dass die Parameter der äußeren und inneren Orientierung nur genähert bekannt sind, entsprechen die dreidimensionalen Punktmengen nicht den Forderungen des Projektes WAVESCAN in Genauigkeit und Punktdichte. Sie sollen in diesem Abschnitt aber hinsichtlich Plausibilität erörtert werden.

Die berechneten dreidimensionalen Punktmengen in Ergebnis des räumlichen Vorwärtsschnittes der Stereozuordnung $C_{R_1}^{L_1}$, $C_{R_{11}}^{L_{11}}$, $C_{R_{21}}^{L_{21}}$, $C_{R_{31}}^{L_{31}}$, $C_{R_{41}}^{L_{41}}$ und $C_{R_{51}}^{L_{51}}$ verteilen sich nicht horizontal, so wie es von Wasseroberflächen zu erwarten wäre. Dies ist auf die Näherung der äußeren Orientierung zurückzuführen.

Die Höhenwerte sind daher auf eine geeignete, vorher zu bestimmende Bezugsfläche zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurde eine lineare, zweidimensionale Regression zur Bestimmung einer mittelnden Ebene der Form $z(x, y) = a + m_x \cdot x + m_y \cdot y$ bestimmt. Tabelle 7-5 zeigt die Ergebnisse dieser Regression.

Regression	berechnet	festgelegt	
mx	0.2301	0.2301	
my	-0.0902	-0.0902	
a	83.5969	80.0000	
Eckpunkte des Gebietes	x	y	Ebene z(x,y)
minx, miny	38.17	40.04	85.17
minx, maxy	38.17	129.96	77.07
maxx, miny	66.19	40.04	91.62
maxx, maxy	66.19	129.96	83.51

Tabelle 7-5: Bestimmung einer Hilfs-Bezugsfläche;

Lineare Regression durch den Datensatz $p_{R_{11}}^{L_{11}}$

Um weitestgehend negative Werte der reduzierten Höhen zu vermeiden, wurde diese mittelde Ebene entlang der z-Achse verschoben. Das absolute Additions-glied a wurde auf 80,0 m festgelegt. Zur Verdeutlichung der Lage der so festgelegten Bezugsebene bezüglich des erfassten Objektraumes wurden die durch äußeren Grenzen (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} und y_{\max}) definierten Eckpunkte des erfassten Objektraumes und die dazugehörigen Bezugsebenenhöhen ebenfalls in Tabelle 7-5 aufgelistet. Die festgelegten Ebenenparameter (vgl. Tabelle 7-5) wurden nun benutzt, um alle Höhen aller dreidimensionalen Objektpunktmengen zu reduzieren $dZ = Z - (a + m_x \cdot x + m_y \cdot y)$.

Die so reduzierten Punktwolken (x, y, dZ) wurden mit dem Programm Golden Surfer durch Triangulation mit linearer Interpolation und einer Gitterweite von 0,8 x 0,8 m² gerastert. Die entstandenen Oberflächenmodelle sind als Isolinienkarten in Abbildung 7-13, Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 dargestellt. Das jeweils linke Bild des dem Oberflächenmodell zu Grunde liegenden Stereopaars wurde der Isolinienkarte beige-stellt. Im Bild sind die homologen Punkte des Stereozuordnungsergebnisses durch kleine Punkte visualisiert.

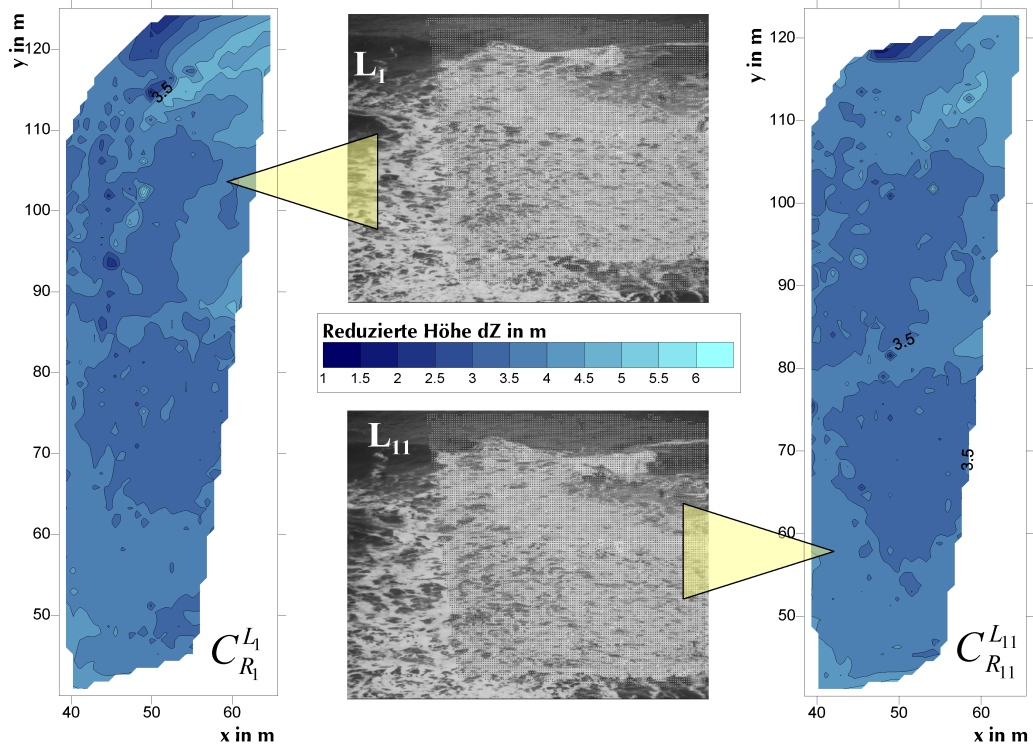


Abbildung 7-13: Oberflächenmodelle der Stereozuordnungsergebnisse $C_{R_1}^{L_1}$ und $C_{R_{11}}^{L_{11}}$

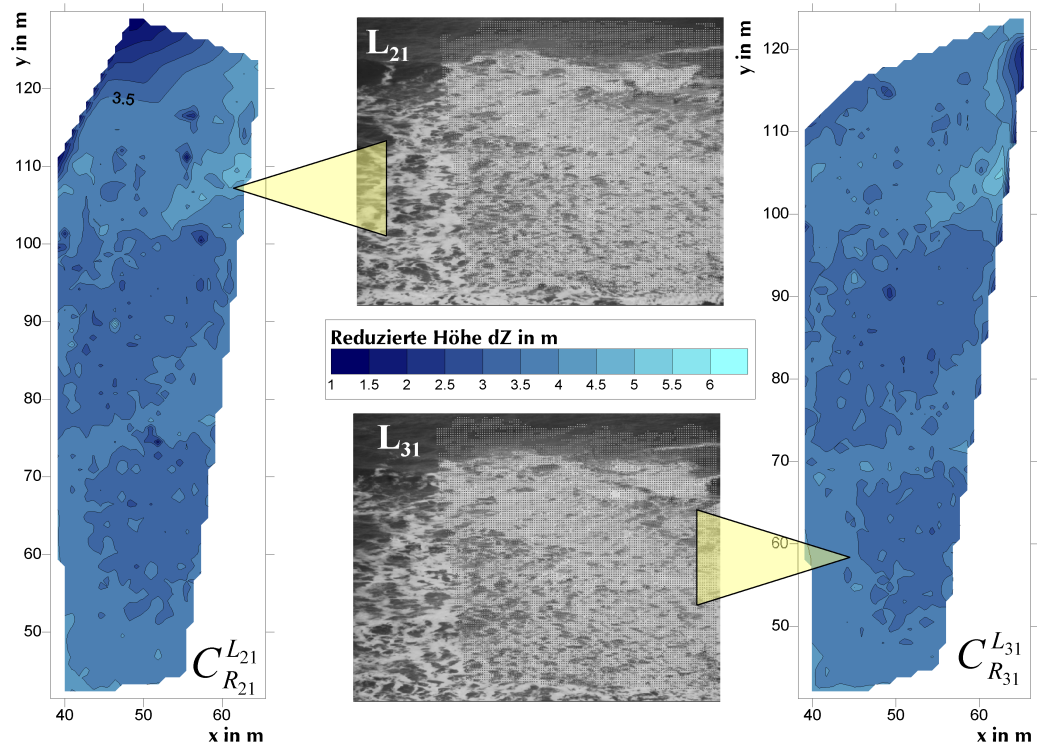


Abbildung 7-14: Oberflächenmodelle der Stereozuordnungsergebnisse $C_{R_{21}}^{L_{21}}$ und $C_{R_{31}}^{L_{31}}$

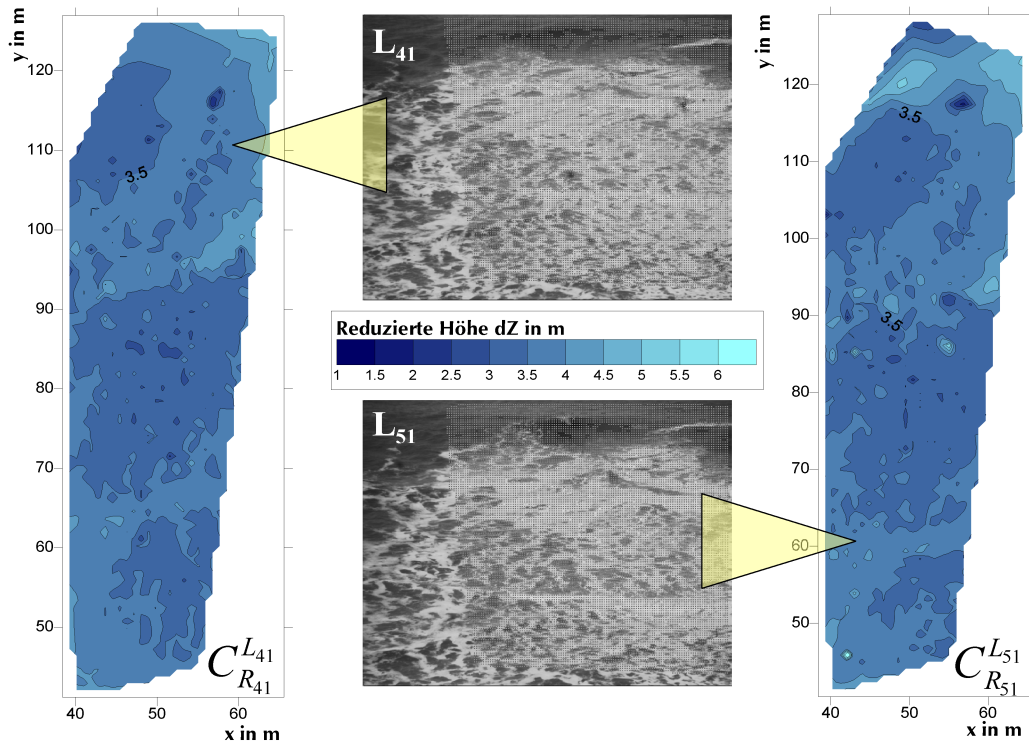


Abbildung 7-15: Oberflächenmodelle der Stereozuordnungsergebnisse $C_{R_{41}}^{L_{41}}$ und $C_{R_{51}}^{L_{51}}$

Ausgehend von dem zugrunde liegenden Bildmaterial stellen diese dreidimensionalen Oberflächenmodelle eine plausible Abbildung des realen Objektraumes dar. Es werden die Wellenkämme und ebenfalls die Bewegung dieser in Richtung Strand ($y \downarrow$) deutlich.

Das Ergebnis der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und implementierten automatischen Bildsequenzzuordnung durch dynamische Fortschreibung von Punktpositionen sind die homologen Punkte der etablierten Stereozuordnungen. Auf der Grundlage dieser homologen Punkte lassen sich die in den Bildsequenzen abgebildeten Wasseroberflächen plausibel dreidimensional modellieren. Das Verfahren der dynamischen Fortschreibung von Punktpositionen stellt somit ein geeignetes Mittel zur Analyse von Bildsequenzen zur Bestimmung von Wasseroberflächen dar.

7.5 Ausblick

7.5.1 Verbesserte Bewegungsmodellierung im Bildraum

Die Punktbewegungen innerhalb der linken Bildsequenz wurden nochmals untersucht. Dazu wurde jedes unregelmäßige Bewegungsmodell (UBM) der linken Bildsequenz, das die ermittelten Punktbewegungen darstellt, vollständig in 32 x 32 Pixel große Segmente unterteilt. Jedem Segment wurde für jedes UBM der gesamten ersten Anwendung des Algorithmus eine mittlere Bewegung zugeordnet. Gleiche Segmente verschiedener UBM bilden nun eine Messreihe der Punktbewegung über die Zeit.

Eine vollständige Analyse ist aufgrund der Datenfülle im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Deshalb sei exemplarisch auf die Messreihe eines zentral im Bild gelegenen Segmentes verwiesen⁴⁴. Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 verdeutlichen die Entwicklung der mittlere Punktbewegung des Segmentes der Stelle (656, 496).

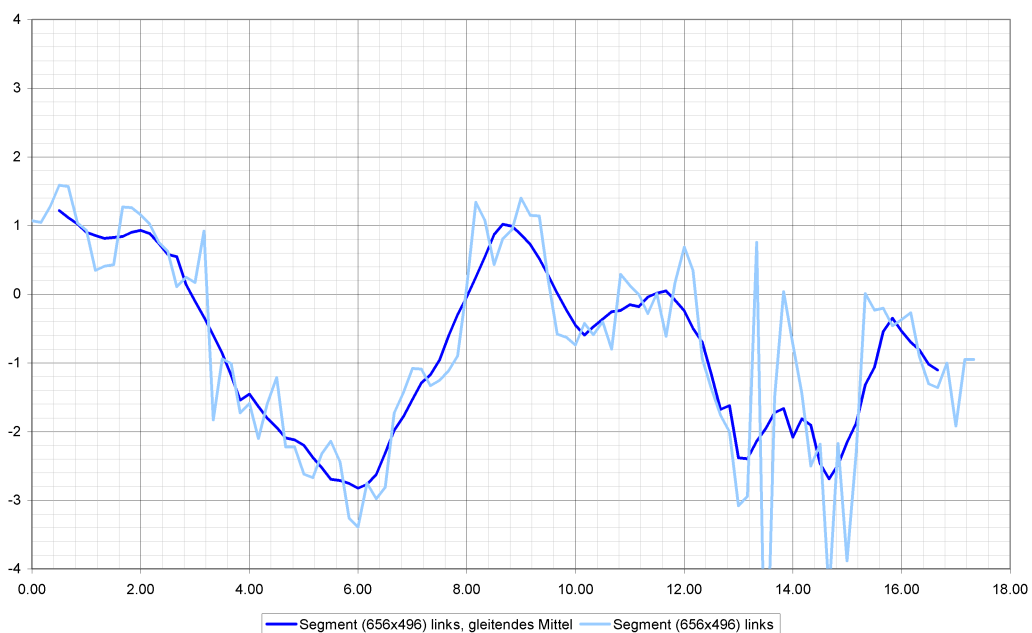


Abbildung 7-16: Mittlere Punktbewegung in x-Richtung (in Pixel) des Segmentes⁴⁵ (656, 496)

⁴⁴ Für eine Segmentgröße von 16 x 16 Pixel sind Messreihen aller Segmente des Bildraumes über alle 104 Bewegungszuordnungen links und rechts in left.delta.16.txt und left.delta.16.txt auf den beiliegenden CD-ROMs abgespeichert.

⁴⁵ Die Segmentgröße ist 32 x 32 Pixel.

Es ist erkennbar, dass eine lineare Extrapolation von je zwei Messdaten zur Prädiktion der dritten bei starken Bewegungsschwankungen ungeeignet ist. Ein gleitendes Mittel, wie es auch in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 dargestellt ist, glättet starke Schwankungen in der Punktbewegung und verhindert so grobe Fehlschätzung. Ob jedoch eine Glättung die Qualität der Prädiktion insgesamt verschlechtern würde, ist zu analysieren.

Auch wäre statt einer Mittelung der zuletzt gemessenen Daten eine funktionale Analyse möglich. So könnte man zum Beispiel aus je drei aufeinander folgenden Punktbewegungen eines Abschnittes eine quadratische Funktion für diesen kurzen Zeitabschnitt ableiten und eine vierte Punktbewegung mit Hilfe der Funktion berechnen.

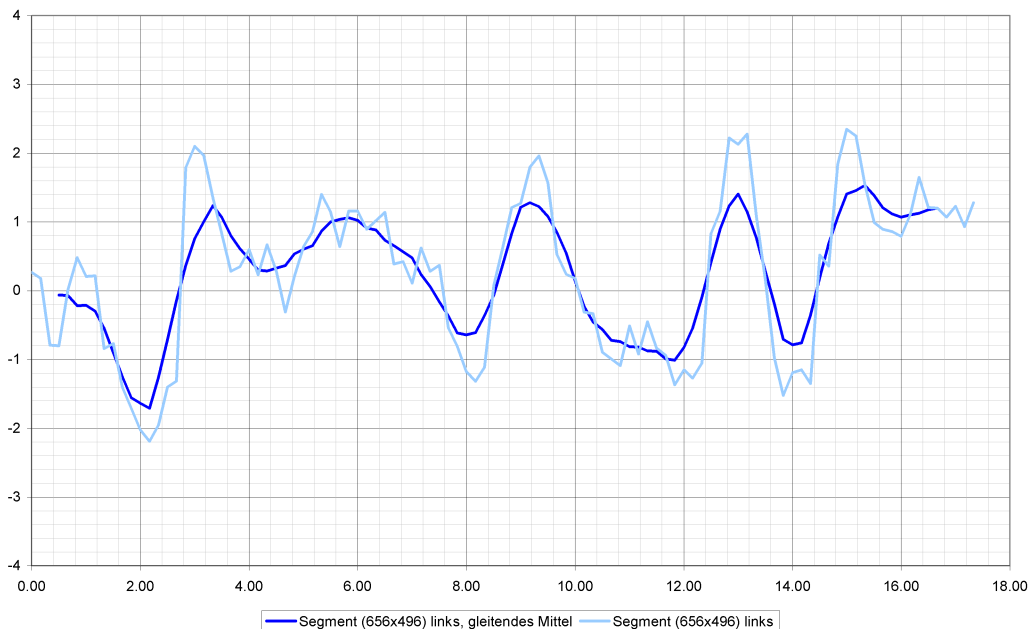


Abbildung 7-17: Mittlere Punktbewegung in y-Richtung (in Pixel) des Segmentes⁴⁵ (656, 496)

7.5.2 Modellierung der Punktbewegung im Objektraum

Bei genau bekannter äußerer und innerer Orientierung ist ein direkter Übergang von einem Stereozuordnungsergebnis in den Objektraum möglich. Zwei aufeinander folgende Stereozuordnungen der Zeitpunkte T_i und T_{i+1} liefern dabei zwei zeitlich aufeinander folgende Oberflächenmodelle des Objektraumes. Wenn sich funktionale Zusammenhänge zwischen Punkten dieser beiden Oberflächenmodellen der Zeitpunkte T_i und T_{i+1} etablieren lassen, so kann man auch mit Hilfe dieser Zusammenhänge die

dreidimensionalen Punktpositionen für den Zeitpunkt T_{i+2} präzisieren. Durch den räumlichen Rückwärtsschnitt [vgl. Luhmann 2000, S.228] ließen sich diese präzisierten, dreidimensionalen Objektpunkte wieder in den zweidimensionalen Bildraum übertragen. Das Ergebnis wären homologe Punkte des Zeitpunktes T_{i+2} , die wiederum als Startpunkte für eine erneute Stereozuordnung nutzbar sind.

Ein solcher, zu etablierender, funktionaler Zusammenhang könnte wiederum auf der Annahme von zeitlich begrenzter, geradlinig gleichförmiger Bewegung beruhen. Es wäre auch ein einfaches hydrographisches Modell der Wassermassen denkbar. So ein hydrographisches Modell könnte zum Beispiel für den Flachwasserbereich den funktionalen Zusammenhang zwischen Bewegungsgeschwindigkeit eines Wasseroberflächenpunktes und seiner Höhe über der Meeresgrundtopographie sein.

7.5.3 Alternative Aufnahmesituation zur Steigerung der zeitlichen Auflösung

Eine der Hauptforderungen an die Messung der Wasseroberflächen ist die zeitliche Auflösung. Die Steigerung der zeitlichen Auflösung ohne Verlust von geometrischer Auflösung ist durch den Stand der digitalen Aufnahmetechnik begrenzt.

Bei entsprechender Kombination von vier Kameras zu unabhängigen Stereopaaren ist eine Verdopplung der zeitlichen Auflösung der Oberflächenmodelle möglich. Der aufgenommene Objektraum beider Stereopaare muss identisch sein. Steuert man jeweils die Kameras eines Stereopaars synchron, die Stereopaare aber immer im Wechsel durch einen dieser Forderung angepassten Trigger an, so wird die zeitliche Auflösung verdoppelt. Die Bildzuordnung zwischen den Aufnahmen je eines synchronen Stereokamerapaars ist möglich. Es lassen sich also zwei asynchrone Sequenzen von Oberflächenmodellen des gleichen Objektraumes ableiten.

Da jedoch, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, die neben dem Stereopaar zusätzlichen zwei Kameras zur Genauigkeitssteigerung genutzt werden sollen, stehen sie zur Steigerung der zeitlichen Auflösung nicht zur Verfügung. Um diesem Konflikt aus dem Weg zu gehen, wäre es denkbar, einerseits Aufnahmen optimiert hinsichtlich zeitlicher Auflösung und andererseits Aufnahmen optimiert hinsichtlich Genauigkeit zu erstellen.

7.5.4 Optimierungsansätze bezüglich Algorithmus und Implementierung

Isolierung des Bewegungsschwellwert-Filters

Wie in Abschnitt 5.3.6 dargestellt, wird der Bewegungsschwellwert-Filter ausschließlich innerhalb der Stereozuordnungen angewendet, da er fester Bestandteil der Prädiktion durch Interpolation ist.

Würde man die aus den Bewegungszuordnungen berechneten unregelmäßigen Bewegungsmodelle ebenfalls einem solchen Schwellwertfilter unterziehen, dann könnten mögliche Ausreißer die regelmäßigen Bewegungsmodelle nicht verfälschen. Die Qualität der Bewegungsmodelle wäre verbessert.

Die Realisierung eines Schwellwertfilters wird als einfach umsetzbar eingeschätzt. Somit kann eine Implementierung eines Bewegungsschwellwert-Filters als unabhängige Programmfunktion kurzfristig realisiert werden. Ein von der Prädiktion durch Interpolation isolierter Filter ließe ebenfalls eine Anwendung auf die unregelmäßigen Bewegungsmodelle zu.

Gewichtung und Reihenfolge der Filterverfahren

Die verschiedenen angewendeten Filter dienen primär der Steigerung der Zuverlässigkeit der Bildzuordnungsergebnisse. In der vorliegenden Realisierung des Algorithmus (vgl. Abschnitt 5.3) bildet der Segmentfilter den Abschluss in der Reihe der Filter zur Selektion von geeigneten Startpunkten für folgende Bildzuordnungen.

Der Segmentfilter selektiert Punkte mit maximalem Korrelationskoeffizient aus einer auf ein Segment begrenzten Punktmenge (vgl. Abschnitt 5.3.8). Der Korrelationskoeffizient wird aber bereits in der Bildzuordnung mit DPCOR selbst überprüft, so dass nur Punkte zugelassen werden, deren Koeffizient einen Mindestwert überschreitet (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Für eine folgende Bildzuordnung, deren Voraussetzung die gefilterten Punktmenge sind, ist deshalb der lokale Kontrast als Maß der Filterung gegenüber dem Korrelationskoeffizient vorzuziehen. Somit wäre es sinnvoll, den Segment- und den Kontrastfilter der Art zu einem verbesserten Segmentfilter zu kombinieren, sodass statt eines maximalen Korrelationskoeffizienten ein maximaler lokaler Kontrast das Maß der Filterung wird.

Plausibilitätstest im Objektraum

Zur Realisierung eines zusätzlichen Filters bietet sich ein Plausibilitätstest im Objektraum an. Zu diesem Zweck müssten die Ergebnispunktmengen der Stereozuordnungen direkt nach der Zuordnung mittels räumlichen Vorwärtsschnittes in den dreidimensionalen Objektraum überführt werden. Die Ergebnisse wäre dreidimensionale Positionen der Punkte im Objektraum. Dreidimensionale Punktpositionen, die nicht in einem festzulegenden Bereich des Objektraumes liegen, sind als Ausreißer zu verwerfen.

Aus den dreidimensionalen Punktpositionen im Objektraum lassen sich Oberflächenmodelle ableiten. Durch einen Test auf Stetigkeit dieser Oberflächen können weitere Ausreißer identifiziert und eliminiert werden.

Der räumliche Vorwärtsschnitt und der darauf basierende Plausibilitätstest sind auf Parameter der inneren und äußeren Orientierung angewiesen. Da diese Parameter im Rahmen dieser Diplomarbeit für die verwendeten Bildsequenzen nur genähert zur Verfügung standen, konnte ein Plausibilitätstest im Objektraum nicht erfolgen. Der Plausibilitätstest wurde deshalb auch nicht implementiert. Die Implementierung stellt somit eine mögliche Aufgabe für künftige Arbeiten dar.

Auswahl der Methode zur Rasterung der Bewegungsmodelle

Die Voruntersuchungen hinsichtlich der Wahl eines für die Bewegungsmodelle geeigneten Rasterverfahrens beruhen auf der Analyse eines Datensatzes. Eine umfassendere Untersuchung mit mehreren Datensätzen könnte die getroffene Auswahl überprüfen. In jedem Fall würde eine Optimierung der Gitterweite und anderer Parameter der Rasterung ermöglicht.

Direkte, dynamische Fortschreibung von Punktpositionen

Im Rahmen einer Konsultation mit den Betreuern dieser Diplomarbeit [Heipke, Santel 2002] wurde eine Modifikation des in Abschnitt 5 vorgestellten Algorithmus erörtert. Bei diesem Ansatz kann durch Umstellen der Reihenfolge der Bewegungs- und Stereozuordnungen die auf der Prädiktion durch Interpolation basierende Punktfortschreibung durch eine direkte Fortschreibung ersetzt werden.

Die Prädiktion durch Interpolation und die zuvor notwendige Rasterung der unregelmäßigen Bewegungsmodelle stellen Rechenschritte dar, die die Zuverlässigkeiten und Genauigkeiten der Stereozuordnungsergebnisse beeinflussen könnten. Dieser Fragestellung wurde in Abschnitt 7.3 nachgegangen. Es wurde belegt, dass keine negative Beeinträchtigungen der Zuverlässigkeiten und Genauigkeiten der Stereozuordnungsergebnisse durch das Verfahren der Prädiktion durch Interpolation in gerasterte Bewegungsmodelle vorliegen.

Zum Zwecke weiterer vergleichender Analysen beider Ansätze scheint eine Umsetzung der direkten, dynamischen Punktfortschreibung geboten. Auch können Anpassungen an die Veränderung des bisher implementierten Algorithmus (vgl. Abschnitt 5) leicht realisiert werden, da die Implementierung modular erfolgte.

Steigerung der Bedienbarkeit

Die vorliegende Implementierung des Algorithmus wird durch im Quelltext der Programmmodule oder in Projektdateien festzulegende Parameter gesteuert. Dies erschwert die Anpassung der Parameter auf andere Datensätze und verschlechtert somit die Bedienbarkeit des Programms.

Als erste, dem entgegengesetzte Maßnahme würde eine Integration aller Parameter in eine zentrale Projektdatei genügen. Ein nächster Schritt zu mehr Anwenderfreundlichkeit wäre dann die Entwicklung einer graphischen Benutzeroberfläche (GUI) oder die Integration des Programms VMATCH in die bereits bestehende Benutzeroberfläche des Programms DPLX.

Steigerung der Rechengeschwindigkeit

Zum Datenfluss zwischen Programmmodulen und zu externen Programmen wie Golden Surfer und DPCOR werden oft große Datenmengen auf die Festplatte geschrieben und sofort wieder gelesen. Dies benötigt zusätzliche Rechenzeit, da die Daten sowohl vor als auch nach dem Schreiben und Lesen in nahezu gleicher Form sich im Arbeitsspeicher befinden. Auch das Aufrufen der externen Programme selbst ist mit enormem Zeitaufwand verbunden, da jedes Mal das komplette Programm geladen wird. Eine Möglichkeit der Geschwindigkeitssteigerung wäre die Programmierung eines eigenständigen Rastermoduls ohne Abhängigkeiten von externen Programmen.

Darüber hinaus könnten durch entsprechende Konfiguration des Arbeits-PCs (z.B. mit Hilfe einer Ramdisk⁴⁶) die Ladezeiten der externen Programme, der Module und der Daten ohne erneuten Programmieraufwand verkürzt werden.

⁴⁶ Eine Ramdisk ist ein Teil des Arbeitsspeichers, der dazu dient, einen externen Datenträger wie etwa eine Festplatte nachzubilden. Der Zugriff auf den Arbeitsspeicher ist in der Regel deutlich schneller und effizienter als der Zugriff auf externe Datenträger. Durch die Verwendung einer Ramdisk kann daher die Geschwindigkeit von Arbeitsabläufen, die oft von externen Datenträgern lesen und auf sie schreiben, gesteigert werden.

8 Zusammenfassung

Zur notwendigen Optimierung der Bauten des Küstenschutzes ist es erforderlich, die Wasseroberfläche dreidimensional zu erfassen. Die Bestimmung dieser Wasseroberfläche aufgrund der Analyse von digitalen Bildsequenzen ist Thema dieser Diplomarbeit.

Vorliegende Bildsequenzen, die Untersuchungsbedingungen auf Norderney und die theoretischen Grundlagen der digitalen Bildzuordnung wurden analysiert. Darüber hinaus wurde die Soft- und Hardware in Verbindung mit der Entwicklung eines Ansatzes zur automatischen Zuordnung von digitalen Bildsequenzen untersucht.

Zur Bestimmung der Wasseroberfläche wurde ein Lösungsansatz zur automatischen Bildsequenzzuordnung entwickelt. Diese Bildsequenzzuordnung basiert auf der digitalen Bildzuordnung nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate. Zur digitalen Bildzuordnung T_{i+1} sind hinreichende Näherungswerte notwendig. Diese konnten anhand der Ergebnissen der digitalen Bildzuordnung T_i und der im Bildraum modellierten Wellenbewegung durch geeignete Prädiktionen abgeleitet werden. Darüber hinaus wurde der entwickelte Lösungsansatz als Algorithmus formuliert und implementiert. Eine erste Anwendung wurde mit Erfolg durchgeführt.

Die zur Ableitung der Näherungswerte der Bildzuordnung T_{i+1} notwendigen Prädiktionen wurden hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Genauigkeit geprüft und konnten als geeignet eingeschätzt werden. Aus den Ergebnissen der automatischen Bildsequenzzuordnungen konnten erste dreidimensionale Modelle der Wasseroberflächen abgeleitet werden. Diese Wasseroberflächenmodelle belegen die Plausibilität der ermittelten Bildsequenzzuordnungen.

Mit Hilfe des als Algorithmus ausformulierten und implementierten Lösungsansatzes ist es gelungen, die Verwendbarkeit von Bildsequenzen zur automatischen Bestimmung von Wasseroberflächen nachzuweisen.

Abschließend wurden kurz- und mittelfristige, weiterführende Ansätze erörtert. Dazu wurde unter anderem auf Möglichkeiten erweiterter Bewegungsmodelle im Bild- und Objektraum eingegangen. Weitere Optimierungsansätze im Hinblick auf den Algorithmus und auf die Implementierung wurden herausgearbeitet.

9 Literaturverzeichnis

- Block, W., 1936:** *Die Photogrammetrie im Dienste des Wasserbaus, des Schiffbaus und der Meereskunde*. Mitteilungen des Lehrstuhls für Photogrammetrie an der Technischen Hochschule Berlin 7 (2): 62-76.
- BMVEL - Bundesministerium für Verbraucherschutz und Ernährung, 2002:** *Rahmenplan der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes"*, 2002 bis 2005.
- Connolly, D., 1999:** *CGI - Common Gateway Interface*, <http://www.w3.org/CGI/> (Stand: 08/2002).
- D'Apuzzo, N. und Plänkner, R., 1999:** *Human Body Modeling from Video Sequences*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (5-3W12): 133-40.
- D'Apuzzo, N., Plänkner, R. und Fua, P., 2000:** *Least Squares Matching Tracking Algorithm for Human Body Modeling*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII (B5): 164-71.
- Golden Software Inc., 2002a:** *Golden Software: Surfer Product Description*, <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml> (Stand: 08/2002).
- Golden Software Inc., 2002b:** *Surfer Help - Golden Surfer Online Help*, Golden Software Inc., Golden, Colorado.
- Groß de Wente, K., 2001:** *Bestimmung digitaler Höhenmodelle mit MOMS-Daten*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover, Hannover.
- Grundgesetz, 2001:** *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*, Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn.
- Hake, G. und Grünreich, D., 1994:** *Kartographie*, 7. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin.
- Heipke, C., 1990:** *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, München.

- Heipke, C. und Kornus, W., 1993:** *Nicht-semantische photogrammetrische Auswertung digitaler Bilddaten - praktische Durchführung am Beispiel einer SPOT Stereoszene*. ZPF - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 3: 122-130.
- Heipke, C., 1995:** *Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen*, Habilitationsschrift der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, München.
- Heipke, C. und Santel, F., 2002:** *Konsultation 30. Mai 2002*, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover, Hannover.
- Ikegami Electronics (Europe) GmbH, 2002:** *Ikegami broadcast video cctv cameras monitors*, <http://www.ikegami.de/frames26.htm> (Stand: 08/2002).
- IPI, 2000:** *DPCOR Image Matching, Manual*, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, University of Hannover, Hannover.
- Jacobsen, K. und Lueken, C., 1996:** *Program System BLUH - bundle block adjustment*, <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/service/bluh/BLUH.HTM> (Stand: 08/2002).
- Jacobsen, C., 2000:** *DPLX - Computer Supported Digital Photogrammetric Determination of Image Coordinates*, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, University of Hannover, Hannover.
- Jähne, B., 1997:** *Digitale Bildverarbeitung*, 4. Aufl., Springer, Berlin.
- Jasc Software Inc, 2002:** *www.Jasc.de - Paint Shop Pro & Co.*, <http://www.jasc.de/Produkte/psp.asp> (Stand 08/2002).
- Johnson, A. L., 2001:** *Perl - Der Einstieg*, Galileo Press GmbH, Bonn.
- Kahmen, H., 1997:** *Vermessungskunde*, 19. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin.
- Kraus, K., 1986:** *Photogrammetrie - Grundlagen und Standardverfahren*, Band1, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.

- Lee, Y., 1993:** *Introduction to Geographic Information Systems - Supplementary Course Notes*, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Fredericton.
- Luhmann, T., 2000:** *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Meyer, H., 1999:** *Wissensbasierte Konfiguration von Klassifikationsaufgaben (Diplomarbeit)*, <http://www.tnt.uni-hannover.de/plain/project/kbs/solution/> (Stand: 07/2002).
- NCSA HTTPd Development Team, 1998:** *The Common Gateway Interface*, <http://hoohoo.ncsa.uiuc.edu/cgi/> (Stand: 08/2002).
- Neuffer, M., 2002:** *High Performance SCSI & RAID: What is RAID ?*, http://www.uni-mainz.de/~neuffer/scsi/what_is RAID.html (Stand: 08/2002).
- Otto, G. und Chau, T., 1989:** *"Region Growing" algorithm for matching of terrain images*. Image and Vision Computing 7 (2): 83-94.
- Owen, S., 1993:** *Subsurface Characterization with Three-Dimensional Natural Neighbor Interpolation*, <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/natneigh/> (Stand: 08/2002).
- Pelzer, H. 1985:** *Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung*, In: H. Pelzer (Hg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II - Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985 in Hannover, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Petter, E., 1998:** *perl - Einführung für Programmierer*, bhv Verlags GmbH, Kaarst.
- Rase, W., 1996:** *Interpolation von stetigen Oberflächen aus flächenbezogenen Informationen*, <http://www.sbg.ac.at/geo/agit/papers96/rase.htm> (Stand: 08/2002).
- Redweik, G., 1993:** *Untersuchung zur Eignung der digitalen Bildzuordnung für die Ableitung von Seegangparametern*, Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover.
- Santel, F., 2001:** *Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover, Hannover.

- Santel, F., Heipke, C., Könnecke, S. und Wegmann, H., 2002:** *Image Sequence Matching for the Determination of Three-Dimensional Wave Surface*, Institute for Photogrammetry and GeoInformation, University of Hannover, ISPRS, Corfu.
- Schenk, T., 1999:** *Digital Photogrammetry - Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures*, Band1, TerraScience, Laurelville, Ohio .
- Schwartz, R. und Christiansen, T., 1998:** *Einführung in Perl*, 2. Aufl., O'Reilly, Köln.
- Strybny, J. und Wegmann, H., 2000:** *Projektantrag für ein geplantes Forschungsprojekt unter dem Titel: Automatisierte Erfassung und Modellierung von Brandungszonen auf Basis digitaler Bildsequenzen*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover, Hannover.
- Strybny, J. und Wegmann, H., 2001a:** *Konzept und Ansätze für das Wavescan-Verfahren*, Forschungszentrum Küste der Universität Hannover, Hannover.
- Strybny, J., Wegmann, H. und Santel, F., 2001b:** *Combining Phase-Resolving Wave Models with Photogrammetric Measurement Techniques*, American Society of Civil Engineering, San Francisco.
- Sun Microsystems, I., 2002a:** *The Source for Java(TM) Technology*, <http://java.sun.com/> (Stand: 08/2002).
- Sun Microsystems, I., 2002b:** *Java(TM) Advanced Imaging API Home Page*, <http://java.sun.com/products/java-media/jai/index.html> (Stand: 08/2002).
- Vennegeerts, H., 2001:** *Bestimmung von Meeresbodenoberflächen mittels digitaler Bildzuordnung*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover, Hannover.
- W3C, 2002:** *W3C HTML Home Page*, <http://www.w3.org/MarkUp/> (Stand: 08/2002).
- WaveScan, 2001:** *WaveScan - Automatic Recording and Modelling of Surf Zones based on Digital Image Sequences*, <http://www.wavescan.de/> (Stand: 08/2002).

Xu, X., 1994: *Digitale Stereokorrelation mit Hilfe lokaler Zustandsvektoren*, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz, Graz.

Zeitler, W., 1995: *PROGRESS Manual*, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München, München.

Zilken, H. R., 1998: *Konstruktion von Oberflächen mit aktiven Konturmodellen*, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen.

10 Abbildungsverzeichnis

-	ABBILDUNG 2-1 AUFBAU DES AUFNAHME SYSTEMS	10
-	ABBILDUNG 2-2 LAGE DES AUFNAHMEGEBIETES AUF NORDERNEY	11
-	ABBILDUNG 2-3 AUFNAHMESITUATION [VGL. SANTEL 2000, S.2]	12
	ABBILDUNG 3-1: PRINZIP SIGNALBASIERTER BILDZUORDNUNG	16
	ABBILDUNG 3-2: UNTERSCHIEDLICHE ABBILDUNG EINES EBENEN OBJEKTES DURCH ZWEI ZUEINANDER IN JEWELS EINER ACHSE VERSCHWENKTE KAMERAS [NACH SCHENK 1999, S.239]	18
	ABBILDUNG 3-3: VERÄNDERTER MAßSTAB IN DER ABBILDUNG EINES EBENEN OBJEKTES DURCH UNTERSCHIEDLICHEN ABSTAND VOM OBJEKT ODER UNTERSCHIEDLICHE KAMMERKONSTANTE [NACH SCHENK 1999, S.238].....	18
	ABBILDUNG 3-4: ABBILDUNG EINER GENEIGTEN EBENE DURCH ZWEI KAMERAS [NACH SCHENK 1999, S.240].....	19
	ABBILDUNG 4-1: VERSCHIEBEN DER MUSTER- UND SUCHMATRIX BEIM <i>REGION GROWING</i>	27
	ABBILDUNG 4-2: PRINZIP DES <i>REGION GROWING</i> IN DPCOR [NACH VENNEGEERTS 2001, S.53].....	28
	ABBILDUNG 5-1: ZWEIDIMENSIONALE PUNKTBEWEGUNGEN IM BILDRAUM.....	37
	ABBILDUNG 5-2: VERSCHIEBUNGSVEKTOREN FÜR STEREOMODELLPUNKTE DURCH INTERPOLATION DER PUNKTPosition IN DEN BEWEGUNGSMODELLEN	40
	ABBILDUNG 5-3: ABLAUFDIAGRAMM DES HAUPTPROGRAMMS VMATCH - INITIALISIERUNG	44
	ABBILDUNG 5-4: ABLAUFDIAGRAMM DES HAUPTPROGRAMMS VMATCH - HAUPTSCHLEIFE $i=2..(n-1)$...	46
	ABBILDUNG 5-5: BEISPIELE FÜR DAS UMBENENNEN DER BILDDATEIEN.....	48
	ABBILDUNG 6-1: VERSUCHSAUFBAU ZUM NACHWEIS DES SYNCHRONISMUS DER KAMERAS.....	62
	ABBILDUNG 6-2: AUFNAHMEN ZUM NACHWEIS DES SYNCHRONISMUS DER KAMERAS	63
	ABBILDUNG 6-3: RASTERMETHODEN DER SOFTWARE GOLDEN SURFER ANGEWENDET AUF DIE d_x KOMPONENTE DES BEWEGUNGSMODELLS $UBM_{(1)}^L$ - TEIL 1	67
	ABBILDUNG 6-4: RASTERMETHODEN DER SOFTWARE GOLDEN SURFER ANGEWENDET AUF DIE d_x KOMPONENTE DES BEWEGUNGSMODELLS $UBM_{(1)}^L$ - TEIL 2	68
	ABBILDUNG 6-5: VERSAGEN DER BILDZUORDNUNG MIT DPCOR	70
	ABBILDUNG 7-1: DARSTELLUNG DER GEGENÜBERSTELLUNG (TABELLE 7-1)	75

ABBILDUNG 7-2: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_x DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	77
ABBILDUNG 7-3: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_y DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	78
ABBILDUNG 7-4: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_x DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	78
ABBILDUNG 7-5: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_y DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	79
ABBILDUNG 7-6: KONFIDENZZELLEN DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	82
ABBILDUNG 7-7: DARSTELLUNG DER GEGENÜBERSTELLUNG (TABELLE 7-1).....	84
ABBILDUNG 7-8: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_x DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION.....	85
ABBILDUNG 7-9: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_y DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION.....	86
ABBILDUNG 7-10: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_x DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION.....	86
ABBILDUNG 7-11: HISTOGRAMM DES ABWEICHUNGSVEKTORS \vec{d}_y DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION.....	87
ABBILDUNG 7-12: KONFIDENZZELLEN DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION.....	88
ABBILDUNG 7-13: OBERFLÄCHENMODELLE DER STEREOZUORDNERGEBNISSE $C_{R_1}^{L_1}$ UND $C_{R_{11}}^{L_{11}}$	91
ABBILDUNG 7-14: OBERFLÄCHENMODELLE DER STEREOZUORDNERGEBNISSE $C_{R_{21}}^{L_{21}}$ UND $C_{R_{31}}^{L_{31}}$	91
ABBILDUNG 7-15: OBERFLÄCHENMODELLE DER STEREOZUORDNERGEBNISSE $C_{R_{41}}^{L_{41}}$ UND $C_{R_{51}}^{L_{51}}$	92
ABBILDUNG 7-16: MITTLERE PUNKTBEWEGUNG IN X-RICHTUNG (IN PIXEL) DES SEGMENTES (656, 496) .	93
ABBILDUNG 7-17: MITTLERE PUNKTBEWEGUNG IN Y-RICHTUNG (IN PIXEL) DES SEGMENTES ⁴⁵ (656, 496)	94

11 Tabellenverzeichnis

TABELLE 5-1: BEGRIFFE UND SYMBOLE DER ALGORITHMUSBESCHREIBUNG	34
TABELLE 5-2: DATEIEN EINER STEREOBILDZUORDNUNG.....	55
TABELLE 5-3: DATEIEN EINER BEWEGUNGSBILDZUORDNUNG.....	58
TABELLE 5-4: DATEIEN EINER STEREOBILDZUORDNUNG.....	59
TABELLE 6-1: KLASSIFIZIERUNG DER RASTERMETHODEN	65
TABELLE 6-2: MANUELLE AUSWERTUNG DER RASTERVERFAHREN; 1: HÄUFIGKEIT VON ARTEFAKTEN, 2: VERHALTEN AM RAND, 3: GEWICHT ZWISCHEN DETAILTREUE UND GLÄTTUNG, X: MANGELHAFT	69
TABELLE 7-1: GEGENÜBERSTELLUNG DER ANZAHL ERFOLGREICH (REGULÄR) ZUGEORDNETER STARTPUNKTE ZU AUSREIßERN UND NICHT ZUGEORDNETEN STARTPUNKTEN	75
TABELLE 7-2: BERECHNETE KONFIDENZELLIPSENPARAMETER DER PRÄDIKTION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	81
TABELLE 7-3: GEGENÜBERSTELLUNG ANZAHL ERFOLGREICH (REGULÄR) ZUGEORDNETER STARTPUNKTE ZU AUSREIßERN UND NICHT ZUGEORDNETEN STARTPUNKTEN	84
TABELLE 7-4: BERECHNETE KONFIDENZELLIPSENPARAMETER DER PRÄDIKTION DURCH INTERPOLATION	88
TABELLE 7-5: BESTIMMUNG EINER HILFS-BEZUGSFLÄCHE; LINEARE REGRESSION DURCH DEN DATENSATZ $p_{R_{11}}^{L_{11}}$	90

12 Formelverzeichnis

FORMEL 2-1: ABSCHÄTZUNG DER OBJEKTGENAUIGKEITEN [VGL. LUHMANN 2000, S.107F].....	13
FORMEL 3-1: NORMIERTER KREUZKORRELATIONSKOEFFIZIENT [NACH LUHMANN 2000, S.401; HEIPKE 1995, S.30].....	17
FORMEL 3-2: AFFINTRANSFORMATION MUSTERMATRIX $F \rightarrow$ SUCHMATRIX G [NACH LUHMANN 2000, S.31]	19
FORMEL 3-3: LINEARE RADIOMETRISCHE ANPASSUNG [NACH HEIPKE 1990, S.12F; LUHMANN 2000, S.404]	20
FORMEL 3-4: VERBESSERUNGSGLEICHUNGEN DER KLEINSTEN QUADRATE METHODE [NACH HEIPKE 1990, S.13]	21
FORMEL 5-1 BEWEGUNGSVEKTOR v EINES PUNKTES	36
FORMEL 5-2: PRÄDIKTION EINER PUNKTPOSITION DURCH LINEARE EXTRAPOLATION.....	38
FORMEL 5-3: PRÄDIKTION EINER PUNKTPOSITION.....	41
FORMEL 5-4: STATISTISCHE KENNGRÖßEN EINES BILDAUSSCHNITTES UM (x,y) [NACH SCHENK 1999, S.45]	52
FORMEL 5-5: ZU WÄHLENDE SEGMENTGRÖßE ZUR SEGMENTFILTERUNG AUF EINE FESTGELEGTE MAXIMALE PUNKTZAHL N	53
FORMEL 7-1 ABWEICHUNG DER PRÄDIKTION (ANTE) VOM ZUORDNERGEBNIS (POST)	76
FORMEL 7-2 ABWEICHUNGSVEKTOREN FÜR ALLE STARTPUNKTE 1 BIS N EINER BILDZUORDNUNG.....	76
FORMEL 7-3 KOVARIANZMATRIX DER PRÄDIKTION [NACH PELZER 1985, S.47; KAHMEN 1997, S.16]	80
FORMEL 7-4 BERECHNUNG VON KONFIDENZELLIPSEN [NACH PELZER 1985, S.52]	81