

# Ein Multiskalenansatz zur automatischen Ablesung von Wellenhöhen in Videobildern

BERND-MICHAEL STRAUB<sup>1</sup>, MANFRED WIGGENHAGEN<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: In dem Beitrag wird ein im Rahmen eines Pilotprojektes für die Bundesanstalt für Wasserbau entwickeltes Verfahren zur automatischen Bestimmung von Wellenhöhen in Videobildern vorgestellt. Es soll eingesetzt werden, um die von Schiffen während der Durchfahrt von Schifffahrtsstrassen verursachten Wellenhöhen zu bestimmen. Aus den Ergebnissen der Messung der Wellenhöhe können Rückschlüsse auf die, durch das jeweilige Schiff verursachte, Erosion an den Ufern der Schifffahrtsstrasse gezogen werden. Für die Vermessung werden ins Wasser eingebrachte Messlatten (vergleichbar mit Nivellierlatten) benutzt, die während der Schiffsdurchfahrt mit einer Videokamera aufgenommen werden. Aufgabe der Bildanalyse ist es, den Wasserstand an der Messlatte zu verfolgen bzw. abzulesen. Die Strategie für die Ablesung des Wasserstandes ist in drei Phasen aufgeteilt. In einem ersten Schritt wird mithilfe eines Mustervergleichs die Position des Wasserstandes an der Messlatte grob bestimmt. Das Resultat der Grobmessung an der Latte wird genutzt, um den Suchbereich für die folgende Feinablesung einzuschränken. Die Feinmessung erfolgt durch die Analyse der zweiten Ableitung der Bildfunktion, die in verschiedenen Auflösungen untersucht wird. Nach einer kurzen Einleitung werden zunächst die Systemkomponenten, im wesentlichen die Messlatte und das Auswerteverfahren, beschrieben. Der Hauptteil des Beitrages behandelt die Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe in den Bildern der Videosequenz.*

## 1 Einleitung

Photogrammetrische Methoden werden schon seit längerem für die Bestimmung von Wellenoberflächen eingesetzt, in der Regel mit dem Ziel, die Wasseroberfläche in einem größeren Bereich zu erfassen (z.B. REDWEIK, 1993; TODD ET AL. 1997; SANTEL ET AL. 2004). In diesem Artikel wird ein System zur automatischen Ablesung der Wellenhöhe an einer Messlatte mit Methoden der digitalen Bildanalyse dargestellt. Die Ablesung der Wellenhöhe erfolgt durch die Analyse von Videobildern einer im Wasser stehenden Messlatte. Das für den mobilen Einsatz konzipierte Messsystem soll eingesetzt werden, um den Verlauf des Wellenganges während der Durchfahrt eines Schiffes mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu bestimmen.

Die wichtigsten Komponenten des Messsystems sind die Messlatten und die Algorithmen für die automatische Ablesung. Die Messlatten tragen die metrische Information, eine Kalibrierung der jeweils verwendeten Videokamera ist deswegen nicht notwendig. Die Strategie für die automatische Ablesung der Wellenhöhe an der Messlatte ist in drei Phasen eingeteilt:

Die erste Phase basiert auf einem Mustervergleich und hat das Ziel den Bereich für die Feinmessung grob festzulegen, hierzu werden Farbwechsel auf der rechten Hälfte der Messlatte verwendet (vgl. Abb. 2).

Die zweite Phase der Feinmessung erfolgt in einem Fenster auf der einfarbigen Seite der Messlatte durch eine Analyse der Grauwertoberfläche in mehreren Auflösungen, die durch Tiefpassfilterung des Originalsignals erzeugt werden.

---

<sup>1</sup> Bernd-Michael Straub, SOLVing3D, Husarenstraße 31, 30163 Hannover, E-mail: bernd-m.straub@solving3d.de

<sup>2</sup> Manfred Wiggenhagen, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30163 Hannover, E-Mail: wigge@ipi.uni-hannover.de

In der dritten Phase erfolgt die eigentliche Ablesung des Wasserstandes durch Interpolation zwischen zwei Farbwechslern. Im Rahmen der angestrebten Messgenauigkeit der Wellenhöhe an der Messlatte von 2-3 Zentimetern erübrigt sich damit eine nähere Betrachtung der Sensorgeometrie des Aufnahmesensors. Da die Ablesung direkt an der Teilung der Messlatte erfolgt, ist eine Kalibrierung des Sensors nicht notwendig.

Als Aufnahmesensor kann eine beliebige Videokamera eingesetzt werden, die mindestens VGA Auflösung liefert (640\*480 Pixel). Zur besseren Ausnutzung des Bildformats wird die Kamera um 90° um ihre optische Achse rotiert. Das begrenzende Element ist dabei im wesentlichen die Länge der Messlatte (also der Messbereich) im Verhältnis zur Anzahl der vorhandenen Spalten. Die Länge der Messlatten beträgt 2.25 m, wobei die ersten 0.35 m nicht für die Auswertung herangezogen werden können. Daraus ergibt sich im praktischen Fall eine Auflösung von etwa 2-3 Pixel pro Zentimeter im Objektraum. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 1 ein Ausschnitt eines Videobildes dargestellt. Das Bild zeigt im unteren Bereich eine für die ersten Versuche genutzte Messlatte während der Durchfahrt eines Schiffes. Über der „echten“ Latte ist eine für die automatische Auswertung modifizierte Messlatte in das Bild einmontiert, die zukünftig eingesetzt werden soll.

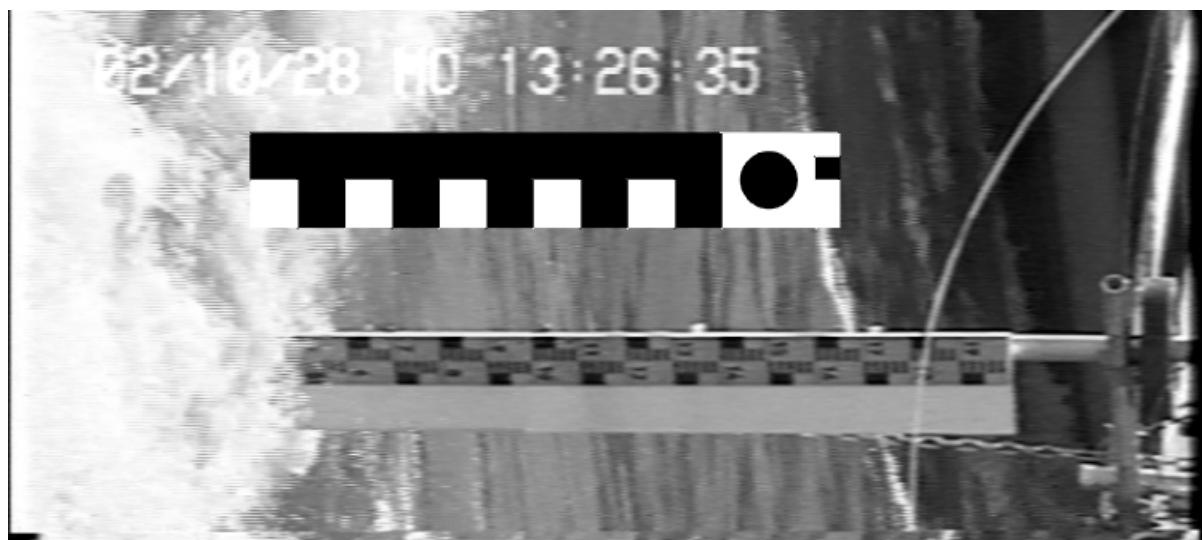


Abb. 1: Ausschnitt aus einem Vorversuch. Die untere Messlatte wurde wirklich aufgenommen, die obere wurde zu Testzwecken einmontiert.

## 2 Systemkomponenten

Die wichtigsten Komponenten des Systems, die Messlatten und die Strategie für die automatische Ablesung der Wellenhöhe, werden in diesem Abschnitt beschrieben.

### 2.1 Messlatten

Die von der Bundesanstalt für Wasserbau angefertigten Messlatten sind in drei Bereiche aufgeteilt (vgl. Abb. 2). Die Lattenköpfe sind jeweils mit kreisförmigen Marken zur Festlegung des Nullpunkts und einer einfachen 4bit Kodierung für die Identifikation der Messlatten ausgestattet. Die Latte ist 0.2 m breit, auf der rechten Hälfte ist eine Teilung in Form eines regelmäßigen Musters angebracht. Ein Element der Teilung besteht aus einem hellen und dem benachbarten dunklen Quadrat mit einer Seitenlänge von je 0.1 m. Die linke Hälfte der Latte ist einfarbig. Die in Abb. 2 erkennbaren dünnen schwarzen Linien dienen lediglich der Verdeutlichung in der Graphik. Auf den realen Messlatten werden diese Linien nicht aufgebracht.

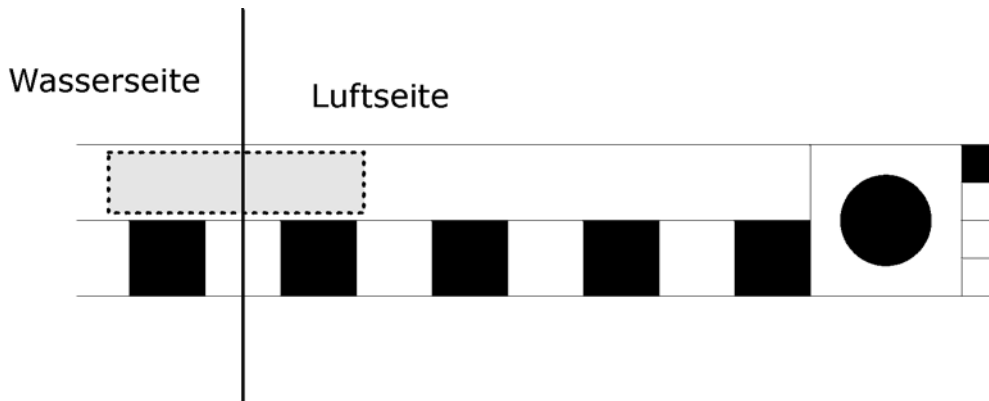


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messlatte für die automatische Ablesung des Wasserstandes, aus Platzgründen ist die Messlatte „liegend“ abgebildet. Die Luftseite mit dem Lattenkopf ist rechts dargestellt, die Wasserseite (links von der vertikalen Linie) ist in den Aufnahmen nicht zu sehen. In Grau ist das (virtuelle) Fenster R für die Ablesung des Wasserstandes abgebildet, dieses Fenster ist kein Bestandteil der Messlatte, es markiert den Bereich in dem die Feinmessung durchgeführt wird.

Die rechte Seite der Latten ist auf der Vorderseite hell und auf der Rückseite dunkel. Die dunkle Seite wird genutzt, wenn die Latte während der Aufnahme von der Sonne beschienen wird, die dunkle entsprechend im Schatten. Abb. 2 zeigt die Vorderseite einer Messlatte, in Abb. 1 ist die Rückseite zu sehen.

## 2.2 Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe

Die Kamera und die Messlatte bewegen sich während der Messung nicht bzw. nur so geringfügig, dass eine Nachführung (Tracking der Latte) im Rahmen der Bildanalyse nicht notwendig ist. Die Probleme bei der Ablesung des Wasserstandes bestehen vor allem darin, dass die Lichtverhältnisse während der Messung sehr stark variieren, und dass die Farbe der Wasseroberfläche nicht konstant ist. Beides wird vor allem durch das durchfahrende Schiff verursacht. Das Schiff verursacht Schatten und Reflexionen auf der Wasseroberfläche, dadurch ändern sich die Lichtverhältnisse. Bricht die Welle, dann wechselt die Farbe der Wasseroberfläche – wegen der Gischt – nach Weiß (vgl. auch Abb. 1).

Einen Überblick über den Ablauf der Messung gibt Abb. 22. Die einzelnen Phasen der Initialisierung, Grobmessung, Feinmessung und Interpolation werden in diesem Abschnitt detailliert beschrieben.



Abb. 3: Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe

Die Initialisierung wird im ersten Bild der auszuwertenden Sequenz vom Operateur durchgeführt und dient dazu, Position, Größe und Orientierung der Messlatte in der Bildsequenz festzulegen. Die Grobmessung erfolgt mithilfe eines Mustervergleichs. Ziel dieses Schrittes ist es, möglichst zuverlässig festzulegen, wo das letzte vollständige Element der Teilung im aktuellen Bild zu sehen ist. Sie dient damit vor allem der Festlegung der ungefähren Position des Wasserstandes. Nachdem die ungefähre Position des Wasserstandes

aus der Grobmessung bekannt ist, wird die Feinmessung zur genauen Bestimmung des Wasserstandes an der Messlatte durchgeführt. Die endgültige Ablesung auf der Teilung erfolgt durch Interpolation des Dreiecks, das von zwei Teilungspositionen und einem Punkt auf der einfarbigen Seite der Messlatte, dem Ergebnis der Feinmessung, aufgespannt wird.

## 2.2.1 Initialisierung

Jeweils zu Beginn einer auszuwertenden Sequenz muss jede abgebildete Messlatte von einem Operateur für die Messung initialisiert werden. Hierzu wird zunächst derjenige Bereich auf der einfarbigen Seite der Messlatte, durch den die Wasserlinie geht, mit einem Rechteck markiert. Als nächstes markiert der Operateur grob die runde Marke (Nullpunktmarkierung) am Lattenkopf. Die Messung von Zentrum und Radius der Marke erfolgen automatisch mit einem Schwerpunktoperator, der Radius wird aus der Fläche der Marke abgeleitet. Die weiteren Schritte der Initialisierung erfolgen, ebenso wie die gesamte weitere Messung, automatisch. Die rechte untere Ecke des Rechtecks und der Mittelpunkt der Nullpunktmarkierung dienen der Festlegung der ungefähren Orientierung der Messlatte im Bild. Der erste Farbwechsel unterhalb des Lattenkopfes wird im weiteren Verlauf der Prozessierung als Muster  $T$  nutzt. Die Anzahl der im ersten Bild der Sequenz sichtbaren Teilungsabschnitte wird für die Initialisierung vom Operateur abgefragt.

## 2.2.2 Grobmessung

Die Grobmessung besteht darin, das Muster  $T$   $n$ -mal mit den entsprechenden Lattenabschnitten zu vergleichen. Durch die Initialisierung (Abschnitt 2.2.1) können die  $n$  Suchbereiche näherungsweise berechnet und positioniert werden, mit  $n = 10$  bei einer 2 m langen Latte. Für jede Position wird das kleinste Ähnlichkeitsmaß  $d_{r,c}$  (siehe Gleichung 1)



$$d_{r,c} = \frac{1}{uv} \sum_{u,v} |I_{r-u,c-v} - T_{u,v}| \quad (1)$$

Abb. 4: Schematische Darstellung des Mustervergleichs zur Grobmessung des Indexes auf der rechten Seite der Latte. Die linke Abbildung zeigt das Muster  $T$  (weiß-schwarz im Vordergrund) einen Ausschnitt des Bildes  $I$  (weiß-grau im Hintergrund). Der Suchbereich ist mit einer gestrichelten schwarzen Linie markiert.

innerhalb des Suchbereiches (vgl. Abb. 4) zwischen dem Bild  $I$  und dem Muster  $T$  berechnet und gespeichert. Aus dem Abstand zwischen der Wasserlinie und dem Lattenkopf aus der Initialisierung ergibt sich die Anzahl der nicht verdeckten Muster auf der Latte am Anfang der Messung. Da sowohl ablaufende, als auch auflaufende Wellen erfasst werden sollen, ist es vernünftig zu erwarten, dass die Messlatte zu Beginn der Messung etwa zur Hälfte sichtbar ist. Mittelwert  $\overline{d_{r,c}}$  und Standardabweichung  $s_{\overline{d_{r,c}}}$ , der zu Beginn der Messung sichtbaren Teilungsabschnitte, werden für das erste Bild der Sequenz berechnet, und dienen im weiteren Verlauf der Messung als Schwellwert für die Grobmessung.

Für die Grobmessung wird, ausgehend vom Lattenkopf, das Muster  $T$ , solange nach unten verschoben, bis der aktuelle Wert für  $d_{r,c}$  signifikant größer ist als  $\overline{d_{r,c}}$  aus der Initialisierung. Über das Signifikanzniveau kann gesteuert werden, wie zuverlässig die Ergebnisse der Grobmessung sein sollen. Die Position  $P_{T,i}$  des Zentrums von  $T$ , bei der  $d_{r,c}$  am kleinsten ist,

wird als Messergebnis der Grobmessung gespeichert (vgl. auch Abb. 6). Im zeitlichen Verlauf der Messung wird dadurch die Teilung der Latte im Bildkoordinatensystem sukzessive bestimmt.

Als Ergebnis dieser Messung erhält man für jedes Bild der Sequenz die Position des letzten vollständig sichtbaren Segments auf der Luftseite. Diese Information wird genutzt, um das Fenster für die Feinmessung so zu positionieren, dass die Wasserlinie innerhalb des Fensters  $R$  liegt, vgl. Abb. 2. Die Teilung übernimmt damit zum einen die Aufgabe, den Bereich für die Feinmessung möglichst zuverlässig einzugrenzen, und zum anderen dienen die gemessenen Positionen während der Ablesung (siehe Abschnitt 2.2.4) der Interpolation des Ergebnisses der Feinmessung in den Lattenmaßstab im Objektraum.

### 2.2.3 Feinmessung

Die Feinmessung erfolgt innerhalb eines Fensters  $R$ , das mit Hilfe der Grobmessung an der ungefähren Position des Wasserstandes an der Messlatte positioniert wurde. Dieses Fenster  $R$  ist in der schematischen Darstellung der Messlatte in Abb. 2 mit dargestellt, ein typisches Bild des Übergangs zwischen Wasser und Luft zeigt Abb. 1. Der Verlauf der Extraktion des Wasserstandes innerhalb des Fensters ist der folgenden Abb. 5 für drei Beispiele aus einer Testsequenz dargestellt. In der oberen Reihe ist jeweils der Inhalt des Fensters  $R$  zu sehen, darunter jeweils die zweiten Ableitungen in unterschiedlichen Auflösungen im Linearen Maßstabsraum (LINDEBERG 1994) in Richtung der längeren Seite des Fensters. Die größte Auflösung ist in der zweiten Reihe von Abb. 5 dargestellt, darunter eine mittlere Auflösung, in der unteren Reihe die feinste Auflösung. Die unterschiedlichen Auflösungen des Originalsignals werden durch Faltung mit Gaußfunktionen mit jeweils halbierten  $\sigma$  erzeugt. Die größte Auflösung in Abb. 5 dargestellte Auflösung wurde mit einem  $\sigma$  von 5 pix erzeugt, die mittlere mit  $\sigma=2$  pix. Je größer das  $\sigma$ , desto größer ist die Auflösung. Die punktierte Linie stellt dabei die endgültige Position des Wasserstandes dar, die sich durch Auswertung der feinsten Auflösung ( $\sigma=1$  pix) ergab.

Dem Verfahren liegen zwei grundlegende Gedanken zugrunde. Zum einen, dass ein relevantes Merkmal sich in mehreren unterschiedlichen Auflösungen ausprägt, dies kann man in Abb. 5 gut bei den beiden links und mittig dargestellten Beispielen erkennen. Zum

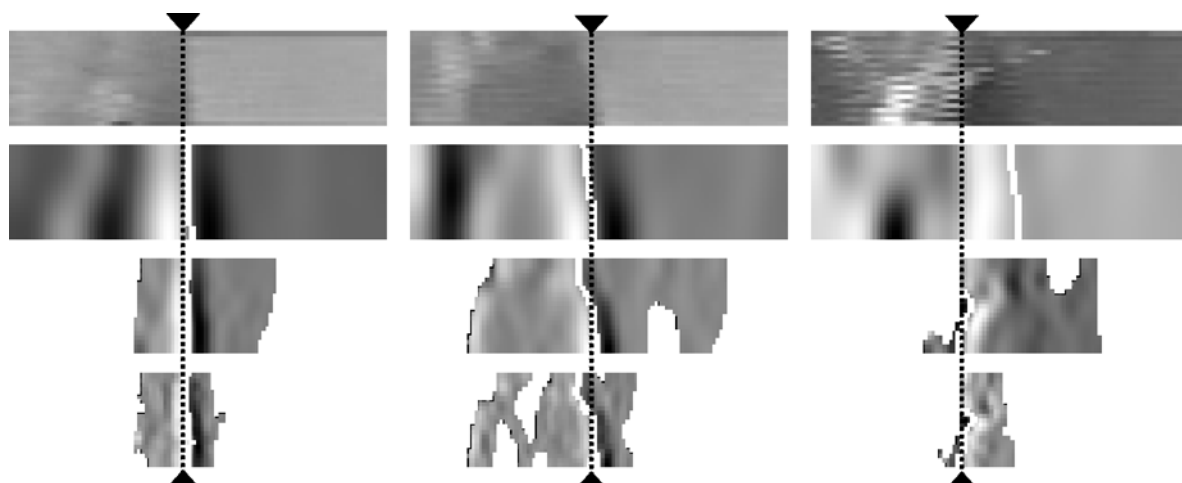


Abb. 5: Darstellung der einzelnen Schritte der Feinmessung innerhalb des Fensters.

anderen wird davon ausgegangen, dass der Wasserstand sich an derjenigen Stelle innerhalb des Fensters mit dem größten Kontrast befindet. Hierzu wird zunächst die zweite Ableitung in jeder verwendeten Auflösung berechnet. Anschließend wird das Bild in Regionen mit

positiven und Regionen mit negativen Werten segmentiert. Die beiden Regionen mit dem betragsmäßig höchsten Mittelwert werden ausgewählt und daraufhin untersucht, ob sie benachbart sind. Wenn sie benachbart sind, werden sie zu einer Region zusammengefasst, die wiederum den Suchbereich für die nächstfeinere Auflösung darstellt. Sind sie nicht benachbart, dann wird das Ergebnis als ungültig angesehen und zum nächsten Bild der Sequenz übergegangen. Die Linie zwischen den beiden benachbarten Regionen entspricht dem Wechsel zwischen Wasser und Luft. Hier wird die Linie durch eine Dilatation der Regionen und anschließender Bildung der Schnittmenge der beiden Regionen berechnet. Der Schwerpunkt  $S_F$  dieser Schnittmenge stellt das Ergebnis der Feinmessung dar (vgl. auch Abb. 6).

Mithilfe dieses Ansatzes, der außer einem Startwert für das  $\sigma$  der Gaußfunktion keine Schwellwerte benötigt, lässt sich der Wasserstand innerhalb des Fensters in den meisten Fällen bestimmen (vgl. auch die Beispiele in Abb. 5). Es soll noch erwähnt werden, dass der Parameter  $\sigma$  theoretisch keinerlei Auswirkung auf das Endergebnis hat, wenn er groß genug gewählt wurde. Lediglich die Rechenzeit steigt mit der Vergrößerung von  $\sigma$ . Der hier vorgestellte Ansatz wurde entwickelt, weil sich im Experiment zeigte, dass ansonsten sehr leistungsfähige Kantenextraktionsverfahren wie beispielsweise das in (DERICHE 1990) beschriebene, sich in den schwierigeren Fällen (vgl. Abb. 5 rechte Spalte) als recht schwer handhabbar herausstellten. Konkret heißt das, dass für gute Ergebnisse eine Anpassung der Parameter notwendig wurde. Allerdings führt auch der hier vorgeschlagene Ansatz nicht zwangsläufig zum Ziel, jedoch sind die Ergebnisse in den meisten Fällen – auch unter recht schwierigen Bedingungen – zufriedenstellend.

## 2.2.4 Ablesung

Die Ablesung des Wasserstandes auf der Messlatte erfolgt durch Interpolation zwischen den beiden Positionen des Musters  $T$ , die sich aus der Grobmessung ergeben haben. Da der jeweils untere der beiden Punkte  $P_{T,i}$  und  $P_{T,i+1}$  zum Zeitpunkt der Feinmessung nicht zu sehen ist, und die Ablesung des Wasserstandes möglichst durch eine Interpolation realisiert werden sollte, erfolgt die Ablesung erst, nachdem Grobmessung und Feinmessung für die gesamte Sequenz einmal vollständig durchgeführt wurden.

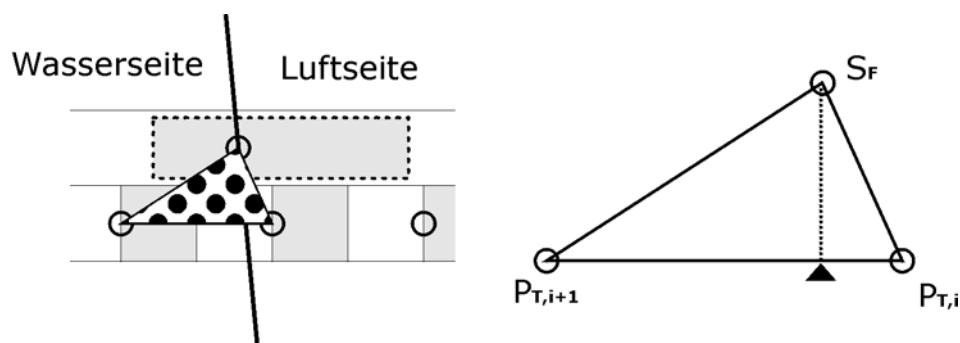


Abb. 6: Ablesung auf der Latte durch Interpolation in einem Dreieck, das durch zwei Positionen  $P_{T,i}$  und  $P_{T,i+1}$  aus der Messung des Grobmaßstabes und der Position der Feinmessung  $S_F$  aufgespannt wird.

Die Ablesung erfolgt durch die Berechnung des Lotfußpunktes von  $S_F$  (Ergebnis der Feinmessung) und den beiden nächstgelegenen Punkten  $P_{T,i}$  und  $P_{T,i+1}$  (Ergebnisse der Grobmessung) in dem von diesen drei Punkten aufgespannten Dreieck. Dieses Dreieck ist zur Verdeutlichung des Beschriebenen in Abb. 6 punktiert dargestellt. Die Abstände im Objektraum zwischen den Punkten  $P_{T,i}$  und  $P_{T,i+1}$  sind bekannt, die Distanz zwischen der

Nullpunktmarkierung und dem Ergebnis der Feinmessung (entsprechend dem schwarzen Dreieck in Abb. 6) kann damit berechnet werden.

### **3 Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurde ein System zur automatischen Messung von Wellenhöhe vorgestellt. Das System besteht aus einer nicht kalibrierten Videokamera, Messlatten und der Software zur Auswertung. Die Messlatten werden in einen Fluss oder eine Schleuse eingebracht und während der Vorbeifahrt eines Schiffes oder Bootes mit der Videokamera aufgenommen. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt nach der Digitalisierung der Videosequenz auf einem mobilen Rechner. Die Messlatte ist in diesem Konzept alleiniger Träger der metrischen Information. Das hat den praktischen Vorteil, dass jede beliebige Videokamera benutzt werden kann und vor Ort keine Einschränkungen bezüglich der zu verwendenden Brennweite und Fokusposition der Kamera gemacht werden müssen.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt nach einer manuell durchgeführten Initialisierungsphase im ersten Bild der auszuwertenden Sequenz in drei Phasen. Zunächst wird für die Grobmessung ein Mustervergleich durchgeführt. Als Mustermatrix wird das erste Element der Teilung der Messlatte verwendet. Ziel dieses Schrittes ist es, möglichst zuverlässig die ungefähre Position des Wasserstandes zu bestimmen. Im zweiten Schritt wird eine Feinmessung durch eine multiskalige Analyse der zweiten Ableitungen der Bildfunktion durchgeführt. Die endgültige Ablesung erfolgt durch Interpolation in dem Dreieck, das von zwei Teilungspositionen und einem Punkt auf der einfarbigen Seite der Messlatte, dem Ergebnis der Feinmessung gebildet wird.

## Dank

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich der Bundesanstalt für Wasserbau für die wertvollen Anregungen und die gute Zusammenarbeit im Rahmen dieses Pilotprojektes bedanken. Dank an Prof. Bernhard Söhngen für die intensive Diskussion bezüglich der Strategie und an Andreas Orlovius für die vielen guten Hinweise bei der Konzeption der Messlatten.

## 4 Literatur

- REDWEIK, G., (1993): Untersuchungen zur Eignung der digitalen Bildzuordnung für die Ableitung von Seegangsparemtern, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 194, ISSN 0174-1454.
- SANTEL, F., LINDER, W., HEIPKE, C. (2004): Stereoscopic 3D-image Sequence Analysis of Sea Surfaces, XXth Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul (im Druck).
- HOLLAND, K. T.; HOLMAN, R.; LIPPMANN, T. C. (1997): Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 81-92.
- DERICHE, R. (1990): Fast Algorithms For Low-Level Vision. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* , 1 (12), pp. 78-87.
- LINDBERG, T. (1994). *Scale-Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 423 p.