

# Verfahren der optischen Triangulation zur räumlich-zeitlich aufgelösten Bestimmung von Wasserspiegelhöhen in hydraulischen Modellen

PROF. DR. HABIL. HANS-GERD MAAS; DIPL.-ING. CHRISTIAN MULSOW; DIPL.-ING. TORSTEN PUTZE; INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG, TU DRESDEN

## Kurzfassung

Verfahren der optischen Triangulation auf der Basis einer Kamera und einer Laserlichtschichtprojektion stellen ein vielseitiges Messverfahren zur Bestimmung von Oberflächenmodellen dar. Sie bieten bei einer relativ einfachen Hard- und Softwarekonfiguration ein gutes Genauigkeitspotenzial bei der Bestimmung von Oberflächenprofilen und sind außerdem besonders für die Messung an bewegten Objekten geeignet.

Auf Grund der spiegelnden Reflektion sind Triangulationsverfahren zunächst nicht für die Messung auf Wasseroberflächen geeignet. Daher wird das Verfahren so erweitert, dass die spiegelnde Reflektion einer Laserlichtschicht von der Wasseroberfläche auf eine Vertikalebene projiziert und dort von einer orthogonal dazu angeordneten Kamera aufgenommen wird. Die Position der Linie auf der Projektionsebene wird dabei durch die Wasserspiegelhöhe sowie durch wellenbedingte Neigungen bestimmt. Zur Trennung der beiden Effekte und korrekten Wasserspiegelhöhenbestimmung werden zwei Verfahren vorgeschlagen: Durch die Aufnahme kurzer Bildsequenzen und einfache Verfahren der Bildsequenzverarbeitung entstehen Akkumulatorbilder, welche eine weitgehend wellengangsunabhängige Wasserspiegelbestimmung erlauben. Eine strenge Lösung auf der Basis einer Doppelprojektion der reflektierten Laserlichtschicht auf zwei parallele vertikale Projektionsflächen erlaubt darüber hinaus die simultane Bestimmung von Wasserspiegelhöhe und Oberflächennormale.

Praktische Tests des Verfahrens beweisen seine Anwendbarkeit und sein Genauigkeitspotenzial. Bezogen auf ein Gesichtsfeld einer Breite von 70 cm wurde in Versuchsmodellen eine Höhengenaugkeit deutlich unter 0,1 mm verifiziert.

## 1 Einleitung

Die Bestimmung von Wasserspiegellagen in hydraulischen Modellen stellt eine häufige Messaufgabe im hydromechanischen Versuchswesen dar. Als etablierte Messwerkzeuge werden hier beispielsweise Stechpegel oder Ultraschallsensoren eingesetzt. Diese Werkzeuge liefern zunächst punktförmige Messungen; zur Generierung von Höhenprofilen müssen entweder mehrere Sensoren simultan eingesetzt werden oder Messsysteme müssen traversiert werden. Dagegen erlaubt der Einsatz optischer Messverfahren auf der Ba-

sis bildgebender Sensoren simultane Messungen an einer großen Anzahl von Messpunkten.

Auf Grund der optischen Eigenschaften von Wasseroberflächen scheiden klassische stereo-photogrammetrische Techniken der Generierung von Oberflächenmodellen zunächst aus. Durch eine Markierung der Wasseroberfläche, beispielsweise mit Partikeln oder Farbstoffen, kann die für eine stereoskopische Auswertung benötigte Textur zwar generiert werden, doch wird die damit verbundene Kontamination von Versuchsanlagen in vielen Anwendungen eine unakzeptable Beeinträchtigung darstellen. Eine Alternative zur physikalischen Markierung von Wasseroberflächen ergibt sich durch eine optische Markierung durch die Projektion von Lichtmustern. Als einfachstes Verfahren hat sich hier in industriellen Messsystemen die optische Triangulation im Laserlichtschnittverfahren etabliert. Das Grundprinzip des Verfahrens beruht auf der Projektion einer durch eine Laserdiode und eine Zylinderlinse erzeugten Laserlichtschicht auf eine Objektoberfläche. Bei Verwendung einer Powell-Linse wird diese ein rechteckförmiges Intensitätsprofil aufweisen. Die projizierte Linie wird durch eine Kamera unter einer Parallaxe aufgenommen (Bild 1). Bei kontrolliertem Umgebunglicht und Ausrüstung der Kamera mit einem auf die Wellenlänge des Lasers abgestimmten Interferenzfilter wird im Bild der Kamera nur das beleuchtete Oberflächenprofil sichtbar sein. Dieses kann durch Methoden der Bildanalyse automatisch extrahiert und über die Kalibrierung des Gesamtsystems metrisch ausge-

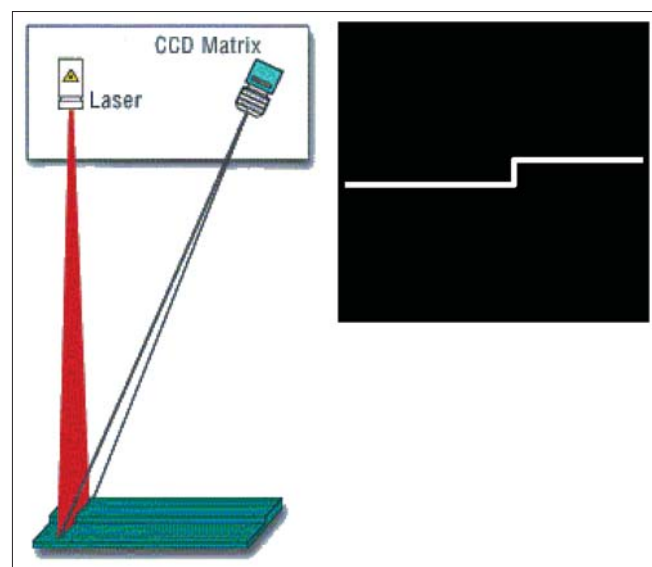


Bild 1: Grundprinzip der Laserlichtschichttriangulation

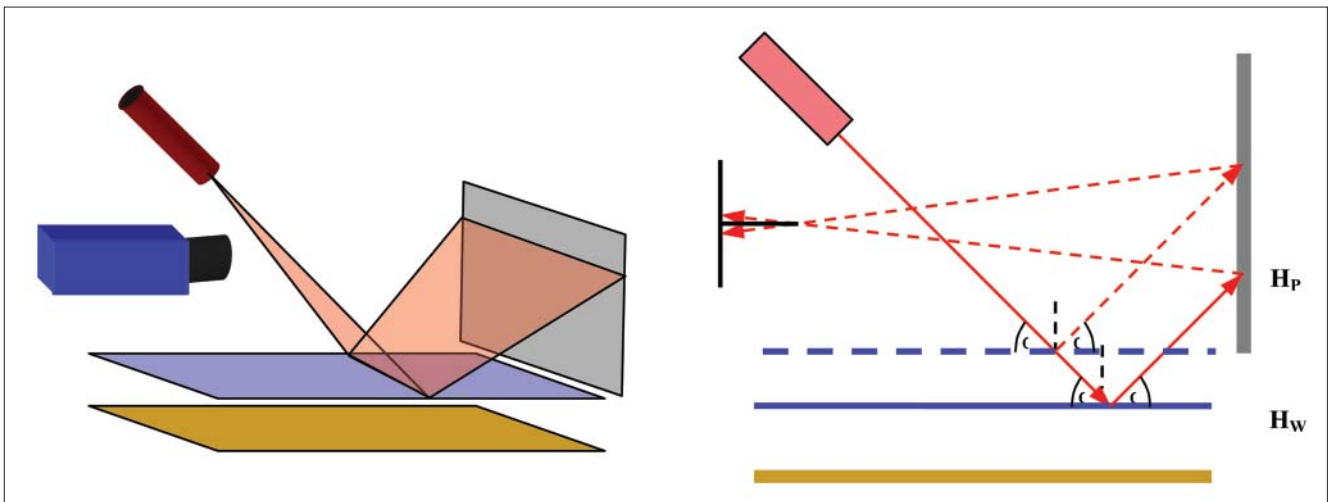


Bild 2: Laserlichtschichttriangulation mit vertikaler Projektionsfläche

wertet werden. Die maximale räumliche Auflösung ergibt sich durch die Anzahl der Bildspalten der Kamera. Durch Mittelung über mehrere Spalten kann eine Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Bei einer Objektdimension von einem Meter sind dabei Höhengenaugkeiten von deutlich unter 0,1 mm möglich.

Eine Grundbedingung für den Einsatz der Laserlichtschichttriangulation ist jedoch die Annahme einer diffusen Reflektion an der Objektoberfläche. Diese ist bei Wasseroberflächen nicht gegeben. Vielmehr wird die Laserlichtschicht an einer ungetrübten Wasseroberfläche teilweise gespiegelt und teilweise nach Snellius gebrochen. Im Folgenden wird daher eine Erweiterung der Laserlichtschichttriangulation für den Einsatz auf spiegelnden Oberflächen vorgestellt.

## 2 Laserlichtschichttriangulation auf spiegelnden Oberflächen

Zur Visualisierung der spiegelnden Reflektion von der Wasseroberfläche wird das Konzept der Laserlichtschichttriangulation um eine vertikale ebene Projektionsfläche erweitert (Bild 2). Die an der Wasseroberfläche gespiegelte Laserlichtschicht wird auf die Projektionsebene projiziert und dort durch eine senkrecht dazu angeordnete Kamera aufgenommen.

Wie aus Bild 2 ersichtlich, hängt die Höhe der Projektion ( $H_P$ ) von der Wasserspiegelhöhe ( $H_W$ ) ab. Nach [Maas et al., 2003] ergibt sich dabei eine Sensitivitätsverdoppelung mit

$$\partial H_P / \partial H_W = 2$$

Weiter kann gezeigt werden, dass dieses Verhältnis unabhängig vom Einfallswinkel der Laserlichtschicht auf die Wasseroberfläche ist. Der optimale Einfallswinkel liegt somit bei  $45^\circ$ , da sich hier die minimale Breite der Linie auf dem Projektionsschirm ergibt.

Bei Verwendung einer Kamera mit einem Bildformat von  $1300 \times 1000$  Pixel und Auswertung mit Subpixel-

operatoren ergibt sich bei einer angenommenen Bildmessgenauigkeit von  $1/20$  Pixel eine Relativgenauigkeit von  $1 : 20.000$  des vertikalen Gesichtsfeldes. Bei einer Profillbreite von 1,30 m übersetzt sich dies in eine Höhengmessgenauigkeit von 0,025 mm. Kameras dieses Bildformats bieten üblicherweise Bildraten von 25 - 100 Bildern pro Sekunde, wodurch räumlich-zeitlich aufgelöste Messungen ermöglicht werden. Das System erzeugt damit, wenn es quer zur Fließrichtung eines hydraulischen Modells angeordnet wird, zeitaufgelöste Messungen von Querprofilen des Wasserspiegels. Durch Traversierung des Messsystems sind auch flächenhaft aufgelöste Messungen möglich.

Ein offensichtliches Defizit des gezeigten Ansatzes liegt in der Tatsache, dass die Höhe der Projektion der spiegelnden Reflektion auf der Projektionsebene nicht nur von der Wasserspiegelhöhe, sondern auch von der lokalen Wasserspiegelneigung beeinflusst wird (Bild 3). Selbst leichter Wellengang auf der Wasseroberfläche führt somit je nach Hebelarm zu einer beträchtlichen Verfälschung der Messung.

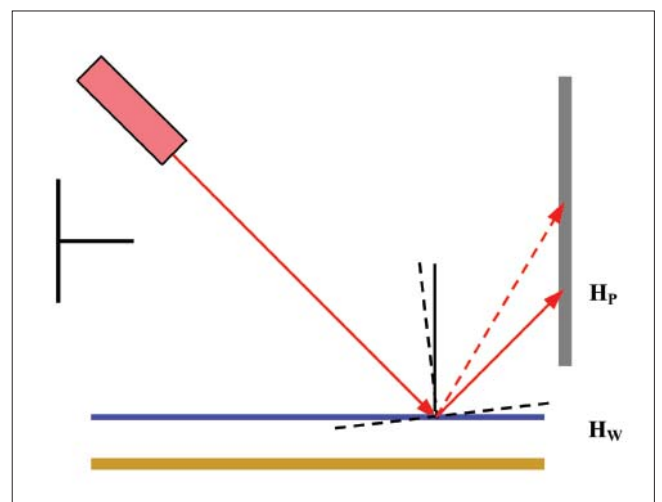


Bild 3: Einfluss von Wasserspiegelneigungen

Eine mögliche Lösung dieses Defizits ergibt sich durch die Aufnahme kurzer Bildsequenzen statt einzelner Bilder: In einer Bildsequenz mit einer Länge von mindestens einem Wellenzyklus wird sich die projizierte Linie im Bildraum je nach maximaler Wellenneigung über einen bestimmten Bereich auf und ab bewegen. Unter Annahme von Symmetrieeigenschaften eines primär in Fließrichtung ausgeprägten Wellenmusters kann die Mitte zwischen den oberen und unteren Extremwerten der Linienprojektion als Maß für die Wasserspiegelhöhe angenommen werden. Der Abstand zwischen den Extremwerten ist gleichzeitig ein Maß für die maximale Wellenneigung in Fließrichtung.

Eine sehr effiziente Methode der Ermittlung der für die Höhenbestimmung relevanten mittleren Linienposition ergibt sich durch die Anwendung eines Maxstore-Algorithmus. Dieser speichert in Echtzeit während der Aufnahme in einem Akkumulatorbild für jedes Bildpixel den höchsten Intensitätswert über die Länge der Bildsequenz. Dadurch erweitert sich im Akkumulatorbild die projizierte Linie zu einem horizontalen Band (Bild 4), aus dem bildspaltenweise durch Mittelung der oberen und unteren Kante die mittlere Lage der Projektion und damit die wellengangsunabhängige Höhenlage des Wasserspiegels ermittelt werden kann.

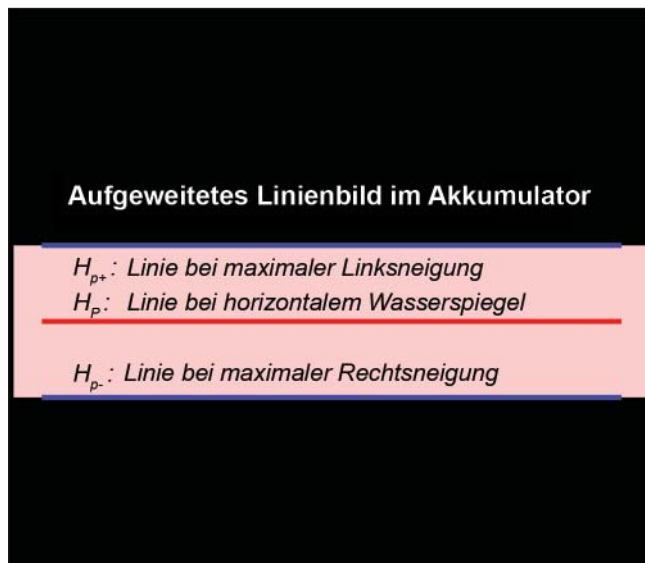


Bild 4: Bandförmige Abbildung im Akkumulatorbild

Die geometrische Modellierung des Ansatzes und die Ermittlung der Wasserspiegelhöhe aus der Bestimmung der mittleren Lage der erweiterten Linie im Akkumulatorbild wird in [Maas et al., 2003] beschrieben. Praktische Versuche ergaben Genauigkeiten von besser als 0,1 mm, bezogen auf ein Gesichtsfeld von 70 cm Breite; bei ruhigem Wasserspiegel wurde sogar eine Genauigkeit von 0,03 mm erreicht. Es ist jedoch festzuhalten, dass das Verfahren auf Grund der Annahme eines symmetrischen Wellenmusters lediglich eine Näherungslösung darstellt, welche nur bei leichtem Wellengang anwendbar sein wird.

### 3 Laserlichtschichttriangulation mit doppelter Projektionsfläche

Eine strenge Lösung, welche nicht an Annahmen zur Symmetrie des Wellenmusters gebunden ist, ergibt sich durch die Verwendung zweier paralleler Projektionsflächen, wobei ein an der Wasseroberfläche gespiegelter Laserstrahl durch eine erste semi-transparente Projektionsebene auf eine parallel dazu angeordnete zweite Ebene abgebildet wird (Bild 5). Wird nun statt der über eine Zylinderlinse erzeugten Laserlinie eine über eine Diffraktionsoptik erzeugte Reihe von diskreten Laserpunkten projiziert, so lässt sich für jeden Punkt durch den Schnitt des sich aus den beiden Projektionen  $H_{p1}$  und  $H_{p2}$  ergebenden Vektors mit dem zugehörigen Projektionsstrahl des Lasers die Wasserspiegelhöhe unabhängig von der wellenbedingten Neigung bestimmen. Gleichzeitig ergibt sich aus der Richtung des Vektors  $H_{p1}$ - $H_{p2}$  die lokale Wasserspiegelnormale, aus der man die beiden Komponenten der Wasserspiegelneigung erhält.

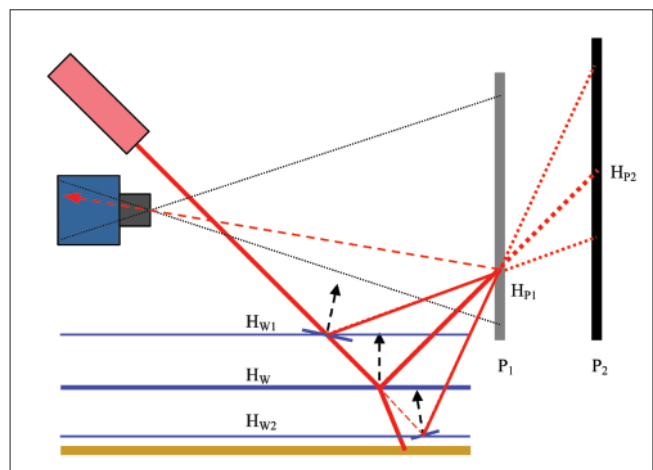


Bild 5: Laserlichtschichttriangulation mit doppelter Projektionsfläche

Eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes findet sich in [Mulsow et al. 2006].

Dieser Ansatz auf der Basis zweier paralleler Projektionsebenen bietet den Vorteil einer strengen Lösung. Als Nachteil steht dem ein höherer instrumenteller Aufwand und eine sehr aufwändige geometrische Modellierung und Kalibrierung gegenüber.

#### Literatur

MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B., SCHREIBER, F., 2003: An optical triangulation method for height measurements on water surfaces. Videometrics VIII (Electronic Imaging 2003), Ed. S. El Hakim, SPIE Proceedings Series Vol. 5

MULSOW, C., SCHULZE, M., WESTFELD, P., 2006: An optical triangulation method for height measurements on

instationary water surfaces. International Archives of  
Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36 Part 5