

Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen

Christian Mulsow¹, Torsten Putze¹, Hans-Gerd Maas¹, Bernd Hentschel²,

¹ Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden

² Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Hydromechanische Phänomene in Fließgewässern werden häufig in verkleinerten physikalischen Modellen simuliert und untersucht. Eine der wichtigsten Messaufgaben ist dabei die Bestimmung der Wasserspiegellage. In der Regel erfolgt die Messung punktuell (z.B. Ultraschallpegel oder Messtaster). Daher besteht anwenderseitig der Wunsch nach einem automatischen sowie flächenhaften Messverfahren.

In Kooperation des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde ein Projekt zur Entwicklung und Verifikation eines flächenhaft, automatisch sowie berührungslos messenden Systems zur Wasserspiegelhöhenbestimmung initiiert. Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung auf Basis der optischen Triangulation mit Hilfe einer Laserlichtschicht unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen und einer Projektionsebene angewandt.

Das angeführte Prinzip wurde in einem Versuchsaufbau am IPF realisiert und praktisch untersucht. Dabei konnte die prinzipielle Eignung der Methode nachgewiesen und ein hohes Genauigkeitspotential für ruhende Oberflächen verifiziert werden. Als Hauptmangel stellte sich jedoch die Abhängigkeit von der Ebenheit der Flüssigkeitsoberfläche bzw. Regelmäßigkeit der Oberflächenbewegung heraus. Als Abhilfe wurde das System um eine zweite Projektionsebene erweitert, wodurch die simultane Bestimmung von Wasserspiegelhöhe und -neigung ermöglicht wird. Der Beitrag stellt das Grundprinzip der Messmethode, die Resultate aus einer praktischen Realisierung sowie einen darauf basierenden Ansatz zur strengen Lösung der Oberflächenmessaufgabe vor.

1 Einleitung – Motivation

Die Untersuchung von komplexen hydromechanischen Phänomenen in Fließgewässern ist derzeit, trotz großen Wissensstands, mit mathematischen Modellen nicht umfassend möglich [GODDING et al., 2003]. Die Verwendung von physikalischen Modellen zur Lösung von verschiedensten Fragestellungen ist eine weit verbreitete und häufig angewandte Methode im wasserbaulichen Versuchswesen (s. Abb. 1) [ATV-DVWK 2003; BLOCK, 1936]. Als eine der wichtigsten Messaufgaben stellt sich dabei die Bestimmung der Wasserspiegellage dar. Diese erfolgt meist mit Hilfe von Pegeln über unterschiedlichste Methoden, wie die Beobachtung eines Schwimmers oder aber die Ultraschallmessung in mit dem eigentlichen Wasservolumen über Röhren kommunizierenden Zylindern. Diese Verfahren

arbeiten in der Regel punktuell. Zudem kann bei der Schwimmermethode die eigentliche Wasserbewegung und damit die resultierende Spiegelhöhe beeinflusst und damit die Ergebnisse verfälscht werden. Bei der Ultraschall-Messmethode stellt sich die begrenzte zeitliche (Trägheit der Wasserspiegelangleichung im Messzylinder durch kommunizierende Röhren) und räumliche Auflösung (Fläche über der Sohlöffnung zum Röhrensystem) als nachteilig dar. Daher besteht anwenderseitig der Wunsch nach einem flächenhaft mit hoher zeitlicher Auflösung direkt sowie automatisch messenden System, welches zudem mit möglichst geringem Aufwand zu realisieren sein sollte. Im Rahmen der Kooperation des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde daher ein Projekt zur Entwicklung und Verifikation eines Systems initiiert, welches eben diese Anforderungen erfüllt.

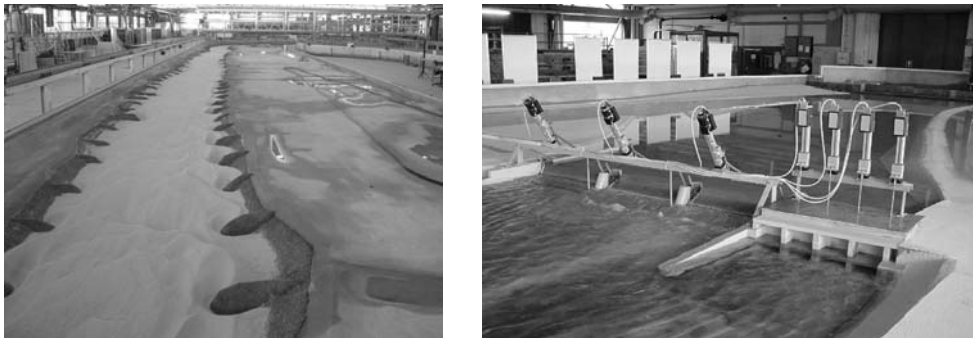


Abb. 1 Physische Modelle von Flussläufen und Bauwerken (Quelle: BAW)

2 Messprinzip

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung auf Basis der optischen Triangulation mit Hilfe einer Laserlichtschicht unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen angewandt [MAAS et al., 2003]. Dabei wird eine Laserlichtschicht auf eine Flüssigkeitsoberfläche gerichtet und nach der Reflektion an der Oberfläche auf eine senkrecht zur Oberfläche orientierte Ebene projiziert. Die Laserlinie wird durch eine Kamera beobachtet und damit eventuelle Änderungen der Höhe der Laserlichtlinie, welche primär aus einer Höhenänderung der ruhenden Flüssigkeitsoberfläche resultiert, detektiert und ausgewertet (siehe Abb.2).

Die Standardabweichung eines mit einem derart gestalteten Messsystem ermittelten Füllhöhenunterschiedes kann, unter Annahme der Verwendung einer 1300 x 1000 Pixel Kamera, einer erreichbaren Linienmessgenauigkeit via Subpixeloperatoren von 1/20 Pixel und einer aufgenommenen Profildbreite von 1.3 m, mit 0.025 mm abgeschätzt werden [MAAS et al., 2003].

Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt über die Beobachtung von Soll-Wasserspiegelunterschieden und der anschließenden Berechnung eines Maßstabsfaktors. Höhenunterschiede ergeben sich dann für eine konkrete Messaufgabe aus den ermittelten Höhendifferenzen im Bild und dem zuvor bestimmten Maßstab. Das vorgestellte Messprin-

zip ist vergleichsweise einfach und bedarf nur eines geringen Materialaufwandes (Kamera, Laserlichtschichtprojektor, Projektionsfläche und Rechentechnik). Die Echtzeitfähigkeit eines entsprechenden Systems ist aufgrund der Einfachheit der notwendigen Algorithmen gegeben und ist im Wesentlichen durch den Zeitbedarf der automatischen Linienmessung im Bild begrenzt.

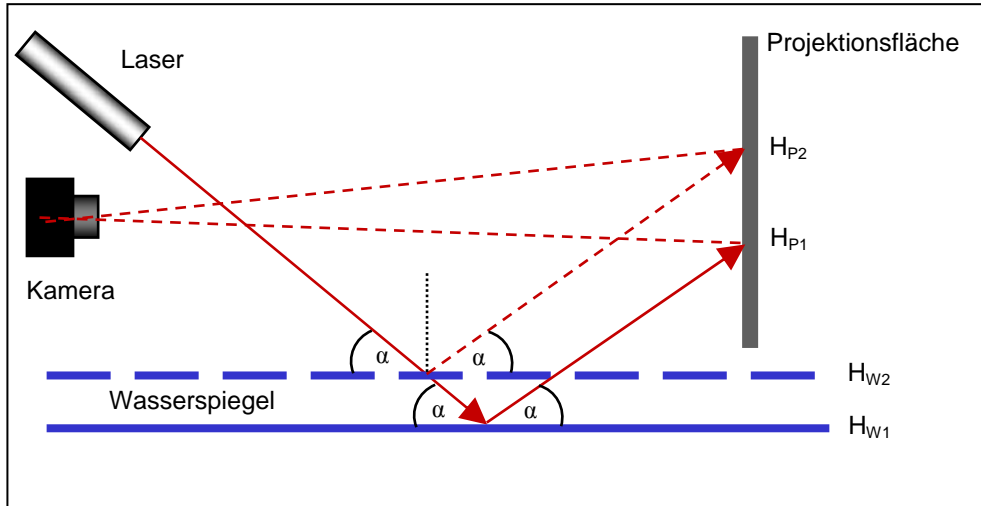


Abb. 2 Optische Triangulation mittels einer Projektionsfläche

Das erläuterte Messprinzip gilt unter der Annahme einer ebenen Wasseroberfläche. Der Einfluss einer bewegten Oberfläche auf die Reflexion und damit die Projektion einer Laserschicht führt bei Nichtbeachtung zwangsläufig zu fehlerhaft bestimmten Wasserspiegeln (siehe Abb.3). Da ein ruhender Wasserspiegel bei den allermeisten potentiellen Anwendungen nicht vorzufinden ist, war eine Modifikation der Auswertung (siehe Kapitel 3) und/oder des Systemsaufbaus (siehe Kapitel 4) notwendig.

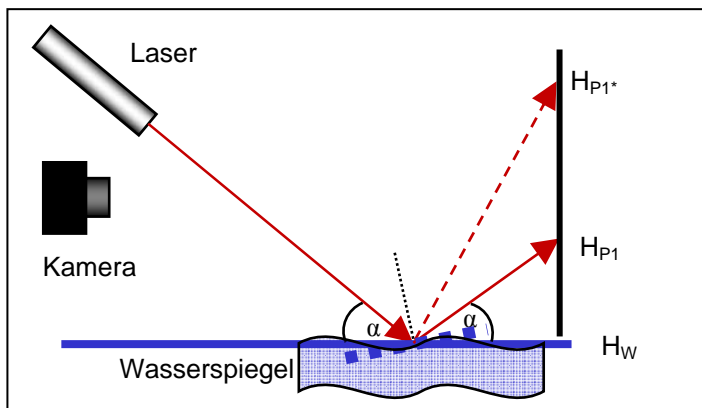


Abb. 3 Einfluss von Wellenbewegungen auf die Reflektionsrichtung einer Laserschicht

3 Akkumulation über kurze Bildsequenzen

Kleine, gleichmäßige Wellen können bei gleich bleibenden Wasserstand für die weitere Betrachtung als Sinusschwingung approximiert werden. Dem Wasserspiegel in Ruhelage entspricht die Mittellinie durch diese Sinusschwingung. Diese Annahme kann zur Kompensation kleiner Wellenbewegungen für das oben vorgestellte Messsystem genutzt werden. Betrachtet man anstatt eines Einzelbildes der Linienbewegung eine Sequenz von Bildern über einem bestimmten Zeitraum, so lässt sich über Mittelung die theoretische Höhe des ruhenden Wasserspiegels ermitteln (siehe Abb. 4).

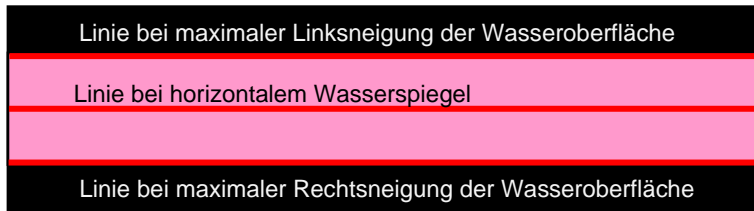


Abb. 4 Akkumulierte Bildsequenz - Ergebnisbild

Praktisch wurde der Max-Store Algorithmus zur Fusion der Einzelbilder zu einem generierten Bild implementiert und angewandt. Dabei wird zunächst das erste Bild einer Sequenz mit dem Folgebild pixelweise verglichen. Weist nun der Grauwert eines Pixel im Folgebild einen höheren Wert als das des Referenzbildes auf, so wird diesem Pixel der höhere Grauwert zugewiesen. Das so veränderte Referenzbild wird dann mit dem dritten Bild verglichen und modifiziert usw. Die Bildsequenz wird so über Akkumulation durch ein einziges synthetisches Bild repräsentiert.

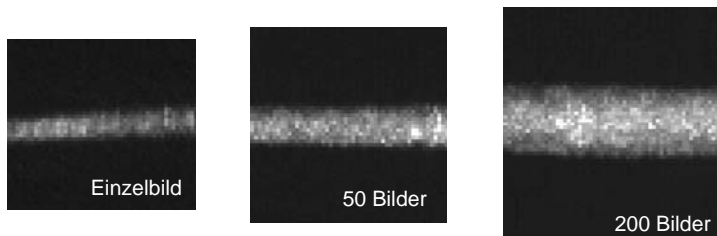


Abb. 5 Ergebnisbilder der Akkumulation über verschieden lange Bildsequenzen

Die aufgeweitete Linie im Bild spiegelt das gesamte durch die Wellenbewegung verursachte „Höhenspektrum“ der aufprojizierten Laserlinie wieder (siehe Abb. 5). Nach einer maximalneigungsabhängigen Korrektur entspricht die Mittelachslage der Höhenlage der aufprojizierten Linie bei ruhendem Wasserspiegel. Gleichzeitig lässt sich aus der Breite der Linie, welche ebenfalls subpixelgenau durch Least Squares Matching (LSM) bestimmt werden kann, auf die maximale Wasserspiegelneigung schließen [MAAS et al., 2005].

4 Praktische Untersuchungen

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für die BAW wurde das oben vorgestellte Prinzip in einem Versuchsaufbau am IPF realisiert und untersucht (siehe Abb.6). Als bildgebender Sensor wurde eine Firewire- Kamera vom Typ Sony XC700 verwendet. Als Projektions-einheit kam ein Diodenlaser mit einer Leistung von 35mW in Verbindung mit einer Powell-linse zur Erzeugung einer möglichst homogenen Lichtschicht zum Einsatz.

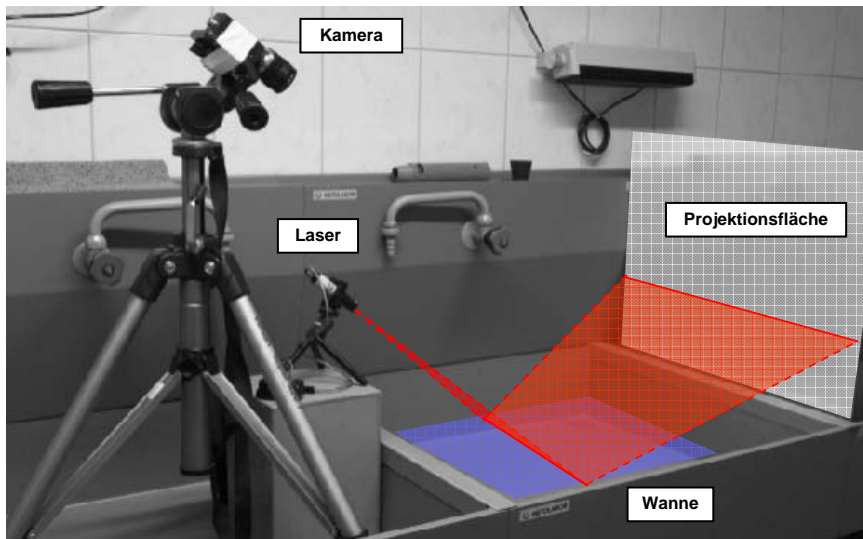


Abb. 6 Versuchsaufbau am IPF

Zur Untersuchung der erreichbaren Genauigkeiten wurde in einem Becken sequentiell der Wasserspiegel in 18 Stufen durch Zugabe von Wasser um jeweils 0.11mm erhöht. Nach jedem Befüllen wurde nach Beruhigung der Wasseroberfläche ein Bild aufgenommen. Die folgende Linienmessung in den Aufnahmen erfolgte über LSM mit einem Freiheitsgrad (vertikaler Versatz) unter Zuhilfenahme eines entsprechenden Vergleichspatches, welches aus dem ersten Bild der Aufnahmesequenz generiert wurde. Die Linienlagen wurden in den 18 Aufnahmen mit jeweils 38 Profilen bestimmt. Die Standardabweichung der Linienmessung in den Bildern erreichte einen Wert von 0.053Pixel, welche dem a priori Wert von 1/20Pixel entspricht. Das durchschnittliche Ansteigen der Laserlinie in den Bildern pro Füllschritt betrug 0.280Pixel bei einem RMS-Wert von 0.076Pixel. Übertragen in den Objektraum entspricht dies einem Wert von 0.03mm, welcher den Erwartungen aus der Vorüberlegung entspricht (bezogen auf eine Kameraauflösung von 1000 x 768 Pixel und einer Profildbreite von 70cm).

Zur Untersuchung des Einflusses von Wellenbewegungen auf die Höhenmessung und zur Prüfung der Kompensationswirkung des Akkumulations-Ansatzes wurde abermals in einem Becken sequentiell der Wasserspiegel in 18 Stufen durch Zugabe von Wasser um jeweils 0.11mm erhöht. Nach jedem Befüllen wurde bei leichter Wasseroberflächenbewegung jeweils eine Sequenz von Aufnahmen akquiriert. Zunächst wurden die Aufnahmen einzeln (zu jedem Füllschritt jeweils ein Bild) ausgewertet. Dies geschah, um zum einen den Ein-

fluss von Wellen auf die Höhenmessung quantitativ nachzuweisen zu können, und zum anderen Vergleichsdaten für die Beurteilung der Wirksamkeit des Akkumulator-Ansatzes zu erhalten. Die Linienlagen wurden in den 18 Einzelbildern mit jeweils 38 Profilen bestimmt. Das durchschnittliche Ansteigen der Laserlinie in den Bildern betrug 0.280Pixel bei einem RMS-Wert von 1.470Pixel. Übertragen in den Objektraum entspricht dies einem Wert von 0.56mm, welches eine Verschlechterung der Ergebnisse gegenüber der Messung bei ruhendem Wasserspiegel um den Faktor 20 bedeutet. Es wird der negative Einfluss der Wellenbewegung auf die Qualität der Höhenbestimmung quantitativ deutlich.

Daraufhin wurden die Bildsequenzen über jeweils 50 Aufnahmen akkumuliert und daraus ein synthetisches Bild generiert. Die Linienmessung erfolgte über LSM mit zwei Freiheitsgraden (vertikaler Versatz + Maßstab in Vertikalrichtung zur Kompensation der Unterschiedlichkeit des Grades der Linienaufweitung). Die Linienlagen wurden in den 18 synthetischen Bildern mit jeweils 38 Profilen bestimmt. Das durchschnittliche Ansteigen der Laserlinie in den Bildern betrug 0.280Pixel bei einem RMS-Wert von 0.250Pixel. Übertragen in den Objektraum entspricht dies einem Wert von 0.1mm, welches zwar ein Absinken der Güte der Höhenunterschiedsbestimmung gegenüber der Messung bei ruhendem Wasserspiegel um den Faktor 3 bedeutet, jedoch eine Verbesserung der Ergebnisse gegenüber der Auswertung der Einzelbilder um den Faktor 6 darstellt. Die erreichte Genauigkeit ist ausreichend für eine ganze Reihe von Anwendungen und zeigt die Brauchbarkeit der entwickelten Lösung zur Behebung des Wellenproblems bei der Wasserspiegelhöhenbestimmung.

5 Zwei-Ebenensystem

Eine strenge Lösung des Wellenproblems bei der Wasserspiegelhöhenbestimmung durch optische Triangulation wird durch das Einfügen einer zweiten Projektionsebene in das System ermöglicht (siehe Abb. 7).

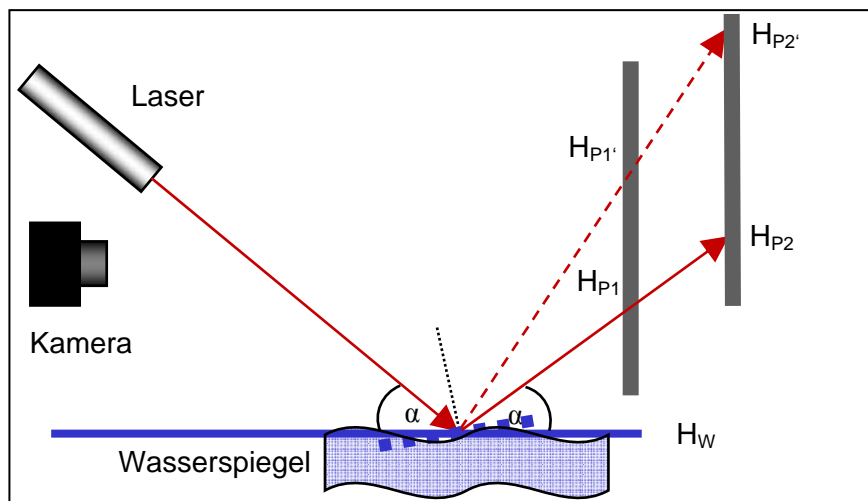


Abb. 7 Zwei-Ebenensystem

Auf der Basis der Linien-Beobachtungen beider Projektionen kann bei Kenntnis der Projektionsebenenlage nun die räumliche Ausrichtung der Ergebnisfläche der Reflexion ermittelt werden. Diese Ergebnisfläche ist nicht zwangsläufig eine Ebene (nur bei Reflexion an einer ebenen Fläche), sondern wird bei Wellenbewegung eine Freiformfläche sein. Bei Annahme einer ebenen Wasserfläche und damit ebene Reflexionsfläche kann die Ermittlung der Schnittlinie zwischen aufprojizierter Laserebene und Wasserfläche über Ebenenschnitt zwischen der räumlich bestimmten Reflexionsebene und der als bekannt vorausgesetzten aufprojizierten Laserebene erfolgen. Das Verschneiden der Flächen bei bewegtem Wasserspiegel gestaltet sich weitaus schwieriger, da eine vollständige Bestimmung und mathematische Beschreibung der reflektierten Laserfläche nicht ohne weiteres möglich ist. Eine Diskretisierung der Fläche in einzelne Vektoren kann hier Abhilfe schaffen. Das Problem wird dann zu einem Schnitt zwischen Einzelvektoren (exemplarisch Strecke P_1 , P_2 in Abb. 8) mit der aufprojizierten Laserebene reduziert. Die Diskretisierung kann durch einen entsprechenden optischen Vorsatz am Laser oder die gitterförmige Ausführung der vorderen Projektionsfläche erfolgen (siehe Abb. 8). Letzterer Ansatz wurde im Versuchsaufbau praktisch realisiert.

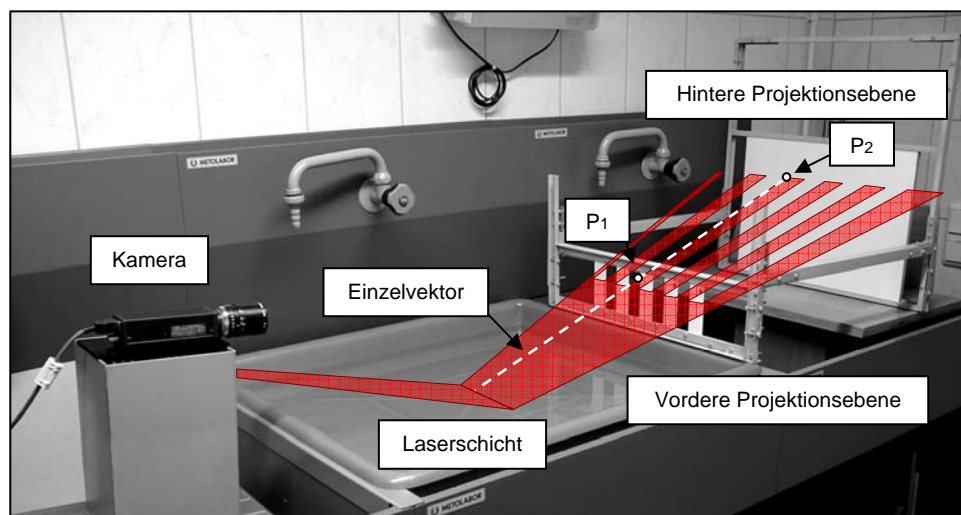


Abb. 8 Projektion auf zwei Ebenen

Das Wasserprofil wird durch die Schnittpunkte der Verbindungsvektoren zwischen den korrespondierenden Endpunkten der jeweiligen Laserlinien (auf der vorderen und hinteren Projektionsebene) und der projizierten Laserschicht repräsentiert (siehe auch Abb. 8). Der Punktabstand hängt dabei von der Breite und dem Abstand der vorderen Ebenenfelder ab. Diese Parameter sollten so gewählt werden, dass eine Überlagerung von Projektionen auf der hinteren Projektionsebene bei lateraler Wasserbewegung ausgeschlossen ist.

Der 3D-Vergleich der resultierenden Schnittpunkte ermöglicht die Ermittlung von Höhenänderungen der Wasseroberfläche. Als Nebenprodukt fällt ebenfalls die jeweilige Orientierung der Oberflächennormale (in longitudinaler und lateraler Richtung) der Wasseroberfläche

che an, aus welcher zusammen mit der Wasserhöhe, die Wellenbewegung vollständig rekonstruiert werden kann.

Die Kalibrierung eines derartigen Systems ist im Gegensatz zum Ein-Ebenensystem weit- aus komplexer und beinhaltet eine Reihe von zu bestimmenden Parametern, wie die Laser- ebenenlage, die Lage der Projektionsflächen und den Bezug zur Wasseroberfläche in Ruhe- lage. Ebenso notwendig ist die Kalibrierung der Kamera, welche theoretisch im Rahmen einer Systemkalibrierung erfolgen könnte, jedoch auf Grund der Komplexität des Gesamt- systems wahrscheinlich separat behandelt werden wird. Es wurden im Rahmen der Studie zwei Verfahren zur Kalibrierung entwickelt, welche diverse Modifizierungen des Systems erfordern. Eine praktische Umsetzung der Überlegungen ist bisher noch nicht erfolgt und ist Gegenstand für weitere Arbeiten.

6 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass auf einer Laserlichtschicht basierende optische Triangulationsmethoden für die Messung von Wasseroberflächen adaptiert werden können. Die Spiegel-Eigenschaften von Wasseroberflächen erfordern eine Erweiterung dieser Methoden, da die Schnittlinie von Wasseroberfläche und Laserlichtschicht nicht direkt beobachtet werden kann. Die Nutzung einer vertikalen Projektionsfläche ermöglicht deren indirekte Visualisierung und Messung. Bei der Messung von ruhenden Wasseroberflächen konnte das hohe Genauigkeitspotential der Methode nachgewiesen werden. Wie aus der Theorie vermutet und durch praktische Versuche bestätigt, kann dieses Potential bei der Messung von bewegten Wasseroberflächen nicht ausgeschöpft werden. Die Messung in kurzen akkumulierten Bildsequenzen kann, wie oben gezeigt, zwar diesen Güteabfall mindern, jedoch versagt diese Methode bei unregelmäßigen Wellen und hochdynamischen Wasserspiegeländerungen. Die vorgestellte strenge Lösung der Messaufgabe ermöglicht die vollständige Rekonstruktion der Wellenbewegung und lässt ein hohes Genauigkeitsniveau erwarten. Die praktische Umsetzung und Bestätigung dieser Überlegung steht noch aus und ist Gegenstand der weiteren Forschung.

Literatur

- ATV-DVWK (2003): *Feststofftransportmodelle für Fließgewässer*; ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW-2.4, März 2004
- Block, W., (1936): *Die Photogrammetrie im Dienste des Wasserbaus, des Schiffbaus und der Meereskunde*. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* 2/1936, S. 62-75
- Godding, G., Hentschel, B., Kauppert, K.,(2003): *Videometrie im Wasserbaulichen Versuchswesen*. In: *Wasserwirtschaft WAWI* 4/2003, S. 36-40
- Maas, H.-G., Hentschel, B., Schreiber, F.,(2003): *An optical triangulation method for height measurements on water surfaces*. In: *Videometrics VIII (Electronic Imaging 2003)*, Ed. S. El Hakim, SPIE Proceedings Series Vol. 5013, pp. 103-109
- Maas, H.-G., Mulsow, C., Putze, T., Hentschel, B., 2005: *An optical triangulation method for height measurements on instationary water surfaces*. Submitted to Elsevier Science Journal