

Weiterentwicklung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Bestimmung von bewegten spiegelnden Oberflächen

CHRISTIAN MULSOW¹, HANS-GERD MAAS¹ & BERND HENSTCHEL²

Zusammenfassung: Folgender Artikel beschreibt ein bildbasiertes Messsystem zur Bestimmung von Wasserspiegelhöhen in physikalischen Flussmodellen, welches im Rahmen eines Projektes mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden (IPF) entwickelt wurde.

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung der optischen Triangulation mit einer Laserlichtschicht unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen angewandt. Dabei wird eine Laserlichtschicht auf eine Flüssigkeitsoberfläche gerichtet und nach der Reflektion an der Oberfläche auf zwei hinter einander angeordnete senkrechte Ebenen projiziert. Die projizierten Laserlinien werden durch eine Kamera beobachtet und anschließend detektiert. Die erkannten Linien werden subpixelgenau in den Aufnahmen gemessen und die Werte dann durch ein am Institut entwickeltes mathematisches Modell in Oberflächenhöhen und -neigungen überführt.

Das angeführte Prinzip wurde in mehreren Versuchsaufbauten am IPF realisiert und praktisch untersucht. Dabei konnte die prinzipielle Eignung und das hohe Genauigkeitspotential der Methode nachgewiesen werden. Die rasante Entwicklung in der Rechen- und Kamertechnik in den letzten Jahren ermöglicht signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Oberflächenbestimmung. Zudem erlauben neue Projektionssysteme eine Verkleinerung des Gesamtsystems und eröffnen damit dem Anwender neue Möglichkeiten des Einsatzes. Der Beitrag stellt diese Optimierungen im Detail vor und präsentiert erste Ergebnisse

1 Einleitung

Im Rahmen von Projektierungen von flussbaulichen Maßnahmen ist die Verwendung von verkleinerten physikalischen Modellen zur Lösung von vielschichtigen Fragestellungen seit jeher eine weit verbreitete und häufig angewandte Methode [ATV-DVWK 2003; BLOCK, 1936]. Obwohl die Entwicklung mathematischer Formulierungen und Methoden verbunden mit immer leistungsfähigerer Rechentechnik große Fortschritte gemacht hat, bleiben Untersuchungen in Modellaufbauten auch in Zukunft unerlässlich [GODDING et al., 2003].

Eine wichtige Messgröße zur Erfassung von hydromechanischen Vorgängen im Modell ist die Wasserspiegellage. Deren Bestimmung erfolgt in der Regel punktuell über Messung an Pegeln. Neben klassischen Pegellatten und Schwimmerlösungen kommen hier vor allem Ultraschallsensoren als berührungslose Messeinrichtungen zum Einsatz. Erstere Verfahren beeinflussen jedoch die hydromechanische Dynamik des Messobjekts und sind daher nur in speziellen Fällen einsetzbar. Ultraschallsensoren können nur auf relativ ruhigen Wasseroberflächen direkt eingesetzt werden und sind hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit begrenzt [siehe auch MULSOW et al., 2005]

1) Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU-Dresden...

2) Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe,

Angelehnt an die Schwimmerlösung kann die Wasseroberfläche mit eingebrachten Tracern (z.B. Partikel oder Plättchen) sichtbar und damit messbar gemacht werden (PTV, Particle-Tracking-Velocimetrie, s. Abb. 1) [HENNING et al., 2007]. Werden diese dann durch mehrere Kameras simultan beobachtet, können dann über die Vorwärtsschnitt für diese Tracer Koordinaten berechnet werden, welche wiederum mit der Wasseroberfläche korrespondieren. Wesentliche Nachteile sind hier jedoch die Verunreinigung des Wassers mit Markern, das keine wandnahen Messungen möglich sind und dass die Marker bei räumlichen Stömungsvorgängen nicht an jede Stelle der Wasseroberfläche positioniert werden können..

Eine weitere Methode ist die Beobachtung der Grenzlinie zwischen Wasser und anderen Stoffen durch Flächen hindurch. Voraussetzung ist hierbei, die Ausführung des Modellkanals aus transparentem Material, wie z.B. Plexiglas. Dies wiederum schränkt die Anwendbarkeit ein.

Ein auf zwei Kameras mit jeweils koaxialer farbiger Beleuchtung basierendes System wurde von [KIEFERHABER et al. 2011] als weiterentwickelter reflectivestereoscope (RSSG)-Ansatz realisiert. Jede Kamera beobachtet dabei die an der anderen Kamera koaxial angebrachten Beleuchtungsquelle indirekt über die Reflexion an der Wasseroberfläche. Wird das Licht direkt zur jeweils anderen Kamera reflektiert, so erscheinen die Pixel in der jeweiligen Farbe (Rot bzw. Grün – siehe Abb.2). Bei Kenntnis der äußeren Orientierung beider Kameras und damit zugleich der der Beleuchtungsquellen kann dann eine Oberflächenkoordinate sowie der zugehörige Normalenvektor des Wasseroberflächenpunktes bestimmt werden. Da eine Messung nur möglich ist, wenn das entsprechend Oberflächenteilstück derart orientiert ist, dass Licht von einer Kameraposition auf den Sensor der zweiten Kamera reflektiert wird, ist eine kontinuierliche Messung in jedem Teil der Wasseroberfläche nicht möglich. Dies schränkt neben dem Aufwand an Hardware den Einsatz ein.

Kapazitive Messmethoden über eine Sonde sind zwar in der Füllstandsmessung geläufig, jedoch bewirken bewegte Wasseroberflächen eine Benetzung der Sonde oberhalb des eigentlichen Flüssigkeitsspiegels und resultieren in Fehlmessungen. Die Daten aus PIV- (Particle Image Velocimetry) könnten evtl. ebenfalls für eine Oberflächenbestimmung genutzt werden, wenn Partikel nahe oder an der Oberfläche vorhanden sind.

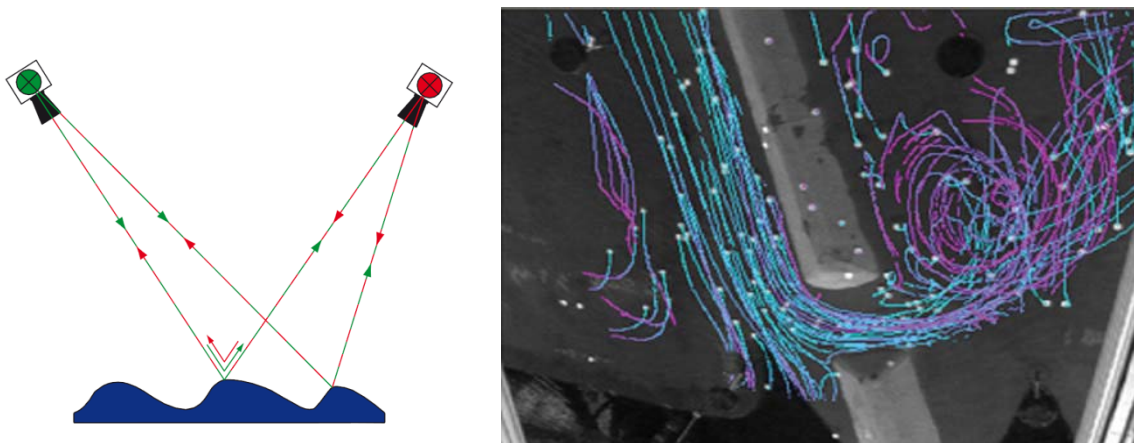


Abb. 1: Prinzip Reflective Stereo Slope Gauge (Jähne), Particle Tracking Velocimetry in Flussmodellen(BAW).

Die Unzulänglichkeiten der derzeit etablierten Verfahren hinsichtlich Abdeckung des Messobjekts und zeitlicher Auflösung wurden auch von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erkannt. Daher entschied man sich, ein entsprechendes Projekt mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden zu initiieren. In einer ersten Projektphase sollte ein geeignetes photogrammetrisches Verfahren gefunden und verifiziert werden. Die zweite Phase bestand in der Entwicklung eines operationellen Systems, welches berührungslos arbeiten und einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen sollte.

2 Messprinzip

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung der optischen Triangulation unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen angewandt. Dabei wird eine Laserlichtschicht auf eine Flüssigkeitsoberfläche gerichtet und nach der Reflektion an der Oberfläche auf eine senkrechte Ebene projiziert (Abb.2a). Die resultierende Laserlinie kann durch eine Kamera beobachtet und damit Änderungen der Flüssigkeitsspiegelhöhe gemessen werden. Praktische Untersuchungen haben die grundsätzliche Eignung der Methode bestätigt und zeugen von einem hohen Genauigkeitspotential [MAAS et al., 2003]. Es wurden unter Verwendung einer 1000 x 768 Pixelkamera und einer aufgenommenen Profilbreite von 70cm Genauigkeiten von 0.03 mm bei der Bestimmung von Füllhöhenunterschieden erreicht.

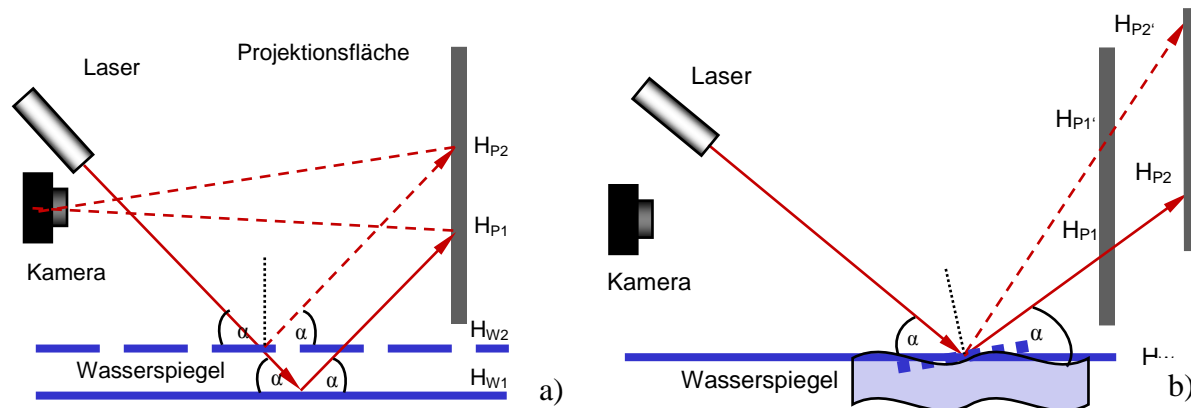


Abb. 2: a) Optische Triangulation mittels einer Projektionsfläche (MULSOW, 2005). b) Zwei-Ebenen-System (Prinzip) (MULSOW, 2005).

Das Verfahren bedingt jedoch eine ruhende Wasseroberfläche, da ansonsten die Höhenänderungen der aufprojizierten Laserlinie nicht direkt mit den Flüssigkeitsspiegelhöhen korrelieren, sondern zusätzlich die Oberflächenneigung die Ergebnisse beeinflusst (siehe auch [MULSOW et al., 2005]).

Diese Bedingung ist in den seltensten Fällen in experimentellen Untersuchungen gegeben, so dass eine Modifizierung der Auswertung und des Systemaufbaus unumgänglich ist. Zur Kompensation kleiner, gleichmäßiger Wellen kann die Auswertung dahingehend geändert werden, dass die aufprojizierte Laserlinie nicht in Einzelbildern sondern in akkumulierten Bildsequenzen analysiert wird [MULSOW et al., 2005]. Dadurch kann zwar eine signifikante Genauigkeitssteigerung (Faktor 6) gegenüber der Einzelbildauswertung bewirkt werden, jedoch ist die Güte der Höhenbestimmung gegenüber der Messung auf ruhenden Oberflächen noch immer um den Faktor 3 niedriger.

Vollständige Abhilfe der Wellenproblematik verspricht das Einfügen einer zweiten Projektionsebene in den Systemaufbau, womit eine strenge geometrische Lösung der Oberflächenbestimmung ermöglicht wird (siehe Abb.2b). Die reflektierte Laserschicht kann nun vollständig rekonstruiert und diese dann zur Ermittlung des Flüssigkeitsprofils mit der aufprojizierten Laserschicht verschnitten werden. Neben den Höhenwerten lassen sich ebenfalls die Ebenennormalen der Flüssigkeitsoberfläche in den jeweiligen Profilpunkten aus den Messwerten ableiten. Elementare Voraussetzungen sind dabei das Wissen um die räumlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen untereinander (Projektionsflächen & Laserlichtschicht) und einer Referenzfläche (z.B. Flüssigkeitsspiegel in Ausgangslage).

Die Ausführung der vorderen Ebene als Gatter ermöglicht die Projektion auch auf der hinteren Ebene. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, korrespondieren hier die jeweiligen Endpunkte der Liniensegmente auf der vorderen und hinteren Projektionsebene miteinander. Diese können zu einem den Vektor verbunden und mit der aufprojizierten Laserebene geschnitten werden. Der Schnittpunkt steht dann für den gemessenen Wasseroberflächenpunkt. Unter Berücksichtigung des Reflexionsgesetzes lässt sich zudem die Ebenennormale im Schnittpunkt berechnen, welche als zusätzliche Information für eine Oberflächenmodellierung genutzt werden kann.

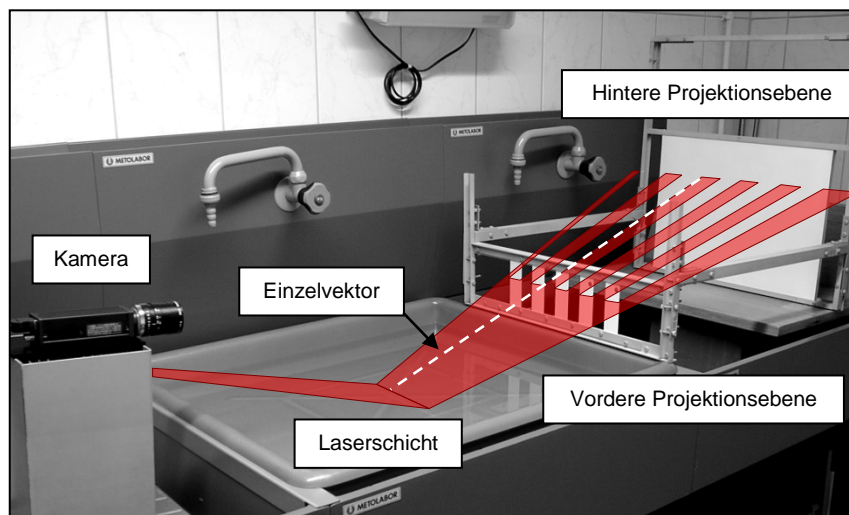


Abb. 3: Systemaufbau mit zwei Projektionsebenen(MULSOW, 2005).

Ein weiterer Prototyp wurde mit einem Schrittmotor realisiert. Dies geschah aus der Forderung des Auftraggebers heraus, unterschiedliche Profillagen auf dem Wasser messen zu können. Daher wurde der Linienlaser an einen Schrittmotor mit hoher Winkelgenauigkeit montiert und damit die Verstellung des Anstellwinkels der Laserebene ermöglicht. Mit dieser Maßnahme lassen sich unterschiedliche Profillagen sequentiell auf dem Wasser messen (siehe Abb.4).Die Option, den Laser komplett rotieren zu lassen, erlaubt eine effektive Systemkalibrierung [MULSOW et. al, 2006].

Die erreichbaren Genauigkeiten für eine Punktmessung mit dieser Systemkombination wurden experimentell mit 0.2 mm in der Höhe für ein 30 cm breites Profil nachgewiesen [MULSOW et. al, 2008]. Damit liegt die Güte der Messungen unter dem des Ein-Ebenensystems. Jedoch ist dieses auf den Einsatz bei ruhigem Wasserspiegel beschränkt. In [MULSOW et. al, 2008] werden die Vor- und Nachteile beider Systemkonfigurationen eingehend beleuchtet.

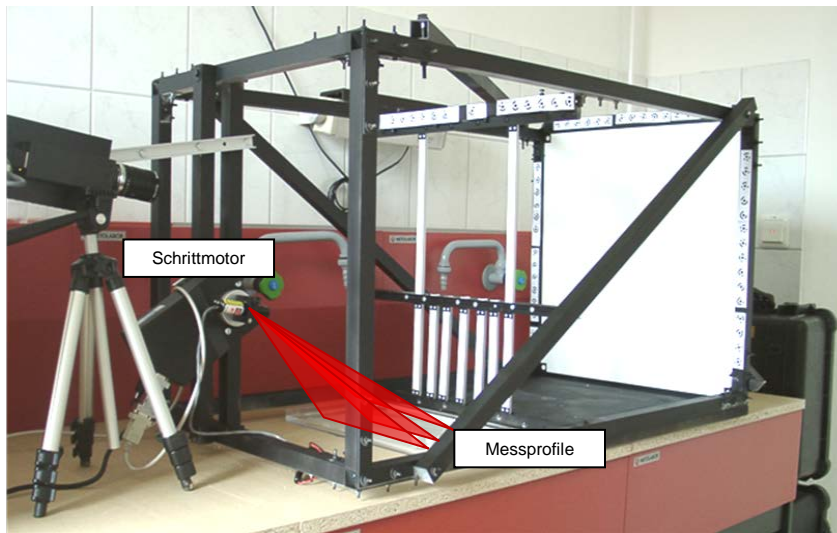


Abb. 4: Systemaufbau mit zwei Projektionsebenen und Schrittmotor zum Verstellen des Anstellwinkels der Laserlichtschicht.

3 Genauigkeitsbetrachtung

Die theoretische Genauigkeit des Ein-Ebenensystems kann direkt aus den geometrischen Verhältnissen abgeleitet werden. Ausgehend von einem Einfallswinkel des Laser von 45° , welcher ein Optimum hinsichtlich Schnittgeometrie und Abbildungsqualität darstellt [Maas et al., 2003], ist die Güte der gemessenen relativen Wasserspiegelunterschiede proportional zur halben in den Objektraum transformierten Bildmessgenauigkeit für die Laserlinie. Eine Bildmessgenauigkeit von $1/20$ Pixel würde für eine Kamera mit 1000×1000 Pixel Auflösung bei einem 1m breiten Profil in $1/40\text{mm}$ relativer Höhenmessgenauigkeit resultieren. Diese theoretische Genauigkeit wird naturgemäß experimentell nicht erreicht werden, da selbst kleine Wellenbewegungen das Ergebnis um eine Größenordnung verfälschen können [Maas et al., 2003]. Abhilfe kann die Auswertung von Bildsequenzen statt Einzelbilder schaffen, vorausgesetzt, dass die Wellenbewegungen klein und gleichförmig sind [Maas et al., 2005].

Im Zwei-Ebenensystem kann der Fehler bei Messung ruhender Wasseroberflächen in der Höhe ähnlich dem des Ein-Ebenensystems präzisiert werden. Die Abschätzung bei bewegter Oberfläche ist um einiges komplexer und erfolgt daher hinsichtlich des Fehlerhaushalts nur für die Hauptkomponenten. Die Bildmessgenauigkeit sinkt aufgrund der Aufweitung des Lasers im Bild (Bewegungsunschärfe) erfahrungsgemäß auf $\sim 0.1\text{-}0.2$ Pixel. Die Güte der Übertragung der Bildkoordinaten der Laserlinienprojektionen auf der vorderen bzw. hinteren Fläche in jeweils eine 3D-Koordinate hängt von der Stabilität der Kalibrierung der räumlichen Lage der Flächen sowie von dem jeweiligen Bildmaßstab ab. Die Genauigkeit dieser Koordinaten beeinflusst die Qualität der Bestimmung des Raumvektors zwischen den korrespondierenden Linienendpunkten. Eine weitere gewichtige Einflussgröße ist hier der Abstand der Projektionsflächen. Je größer dieser Abstand, desto genauer die Bestimmung der Raumrichtung. Die Qualität des Schnittpunktes zwischen Raumvektor und aufprojizierter Laserlichtschicht ist zusätzlich von der Güte der Laserebenenparameter abhängig. Im Falle des Systems mit variabler Laserebene spielen hier etwaige Positionierungsfehler des Schrittmotors mit hinein.

4 Systemoptimierungen

Die Demonstratoren der beiden Zwei-Ebenensysteme haben rasch eine Schwäche des Prinzips aufgezeigt - die Aufweitung der Laserlichtschicht (Linienlänge vergrößert sich mit wachsendem Abstand von der Diode) bedingt eine entsprechend große Dimensionierung der hinteren Projektionsfläche. Dies wiederum führt dazu, dass das Gesamtsystem schwerer, weniger handhabbar und mechanisch instabiler wird. Um wenigstens die Breite des Systems zu reduzieren, wurde die Verwendung eines telezentrischen Linienlasers erwogen. Serienmäßig sind diese jedoch nur in einer Breite von >70 mm erhältlich. Daher wurde die Verwendung einer einfachen Zylinderlinse zur Parallelisierung des Laserlichtes angedacht. Zur Überprüfung der Machbarkeit erfolgte die Integration einer plankonvexen Linse mit 50mm Breite in das System (siehe Abb. 5).

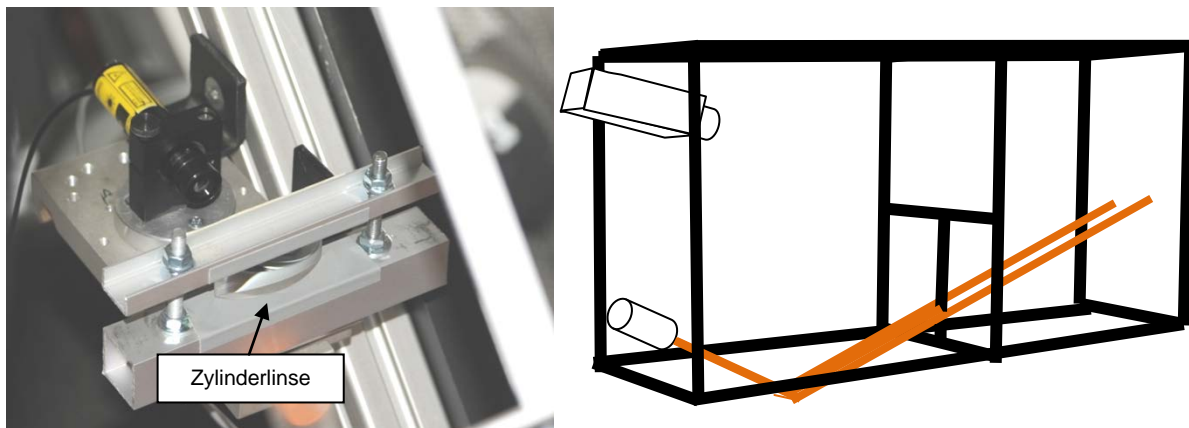


Abb. 5: Systemaufbau mit Zylinderlinse im Strahlengang des Lasers. Abbildung der Laserlinie im System.

Diese konstruktive Maßnahme erlaubt die Reduzierung der Rahmenbreite auf Linienlänge. Zudem wird die Energie des Lasers auf eine kleinere Fläche verteilt und sorgt damit für eine bessere Abbildung auf den Ebenen. Zukünftig ist geplant, eine Linse von 20cm Breite fertigen zu lassen. Prinzipiell ließen sich damit entsprechend breite Profile messen. Für größere Messvolumen müsste das System traversiert werden. Dieser Teilaspekt ist bis dato ungelöst.

Die angedachte Traversierung befreit das System von der Forderung, mehrere Profile von einem Standort messen zu können. Daher kann der Schrittmotor weggelassen und insgesamt die Zuverlässigkeit und Genauigkeit gesteigert werden (keine bewegten Teile).

Während der ersten beiden Projektphasen war die Verfügbarkeit von Kameras höherer Auflösung (>2 Megapixel) mit entsprechender Bildrate nicht gegeben. Infolge des rasanten Fortschritts in der Kameratechnik über die letzten Jahre sind Kameras mit deutlicher höherer zeitlicher und bildlicher Auflösung erhältlich. Bei gleich bleibenden Genauigkeitsanforderungen kann daher der Abstand der beiden Ebenen reduziert werden. Würde dieser beibehalten, wäre eine Genauigkeitssteigerung proportional zur Steigerung der Kameraauflösung zu erwarten.

Eine weitere Verbesserung betrifft die Berechnung der Höhenunterschiede für die Wasserspiegelpunkte aus den Bildmessungen. Wie in Abschnitt 3 gezeigt, ist die Genauigkeit für Messungen auf ruhigem Wasser besser. Neben den der höheren Abbildungsgüte ist hier auch der Umstand bedeutend, dass die Messung unter ähnlichen geometrischen Bedingungen wie die Kalibrierung erfolgt. Demzufolge ist der Einfluss von Fehlern der Laserebenenparameter

reduziert. Bei Messung auf horizontale Flächentücke müsste sich die Genauigkeit daher dem des Ein-Ebenensystem nähern – bei Nichtbeachtung der geringeren Abbildungsgüte des Lasers. Es gilt daher, diese Oberflächenneigungen zu identifizieren und für diese Fälle vom Vektor-Ebenenschnitt auf einen einfachen Interpolationsmodus umzuschalten. Schon bei einer einfachen Kalibrierung analog zum Ein-Ebenensystem (Messung auf mindestens zwei definierten Wasserspiegeln unterschiedlicher Höhe) wären die Voraussetzungen dazu gegeben. Abweichungen der Flächennormale (von der Lotrechten) quer zur Aufnahme richtung lassen sich durch die Analyse der Liniensegmente auf der hinteren Projektionsfläche detektieren. Diese sollten auf der Linie zwischen den Endpunkten der entsprechenden Linien aus der Kalibrierung liegen (siehe Abb. 6a). Abweichungen der Lotrechten in Aufnahme richtung lassen sich aus dem Verhältnis aus den korrespondierenden Messungen auf der vorderen und hinteren Ebene detektieren. Diese sollte den Verhältnissen aus der Kalibrierung entsprechen (siehe auch MULSOW et al., 2008). Im Regelfall werden bei bewegter Oberfläche nur wenige bis keine Messungen (zufällig) auf einem Flächenstück mit lotrechter Normale liegen. Unter der Annahme, dass trotzdem in jedem Flächenstück im Lauf der Messung waagrecht orientiert ist, kann innerhalb der diskreten Daten interpoliert werden und etwaige außerhalb der Belichtungszeit aufgetretene Events (lotrechte Flächennormale) rekonstruiert werden. Abbildung 6b zeigt entsprechend graphisch die Interpolation der Höhenwerte. Aus der Messung der Höhenwerte auf der vorderen Ebene und den in der Kalibrierung bestimmten Verhältnissen lassen sich Soll-Werte für die hintere Ebene bestimmen. Diese werden mit den gemessenen Werten verglichen. Bei Überführung der diskreten Werte in Funktionen können die entsprechenden Kurven geschnitten und somit zum berechneten Zeitpunkt t ein Höhenwert für das in t horizontale Flächenstück berechnet werden. Als Modellfunktion für die jeweiligen Kurven hat sich in ersten Test die gleichmäßig beschleunigte Bewegung bewährt. Diese wurde lokal über mindestens 6 Messpunkte angepasst. Mithilfe des vorgestellten Ansatzes lassen sich einfach und schnell die Bildmessungen in Höhen entsprechender Genauigkeit überführen.

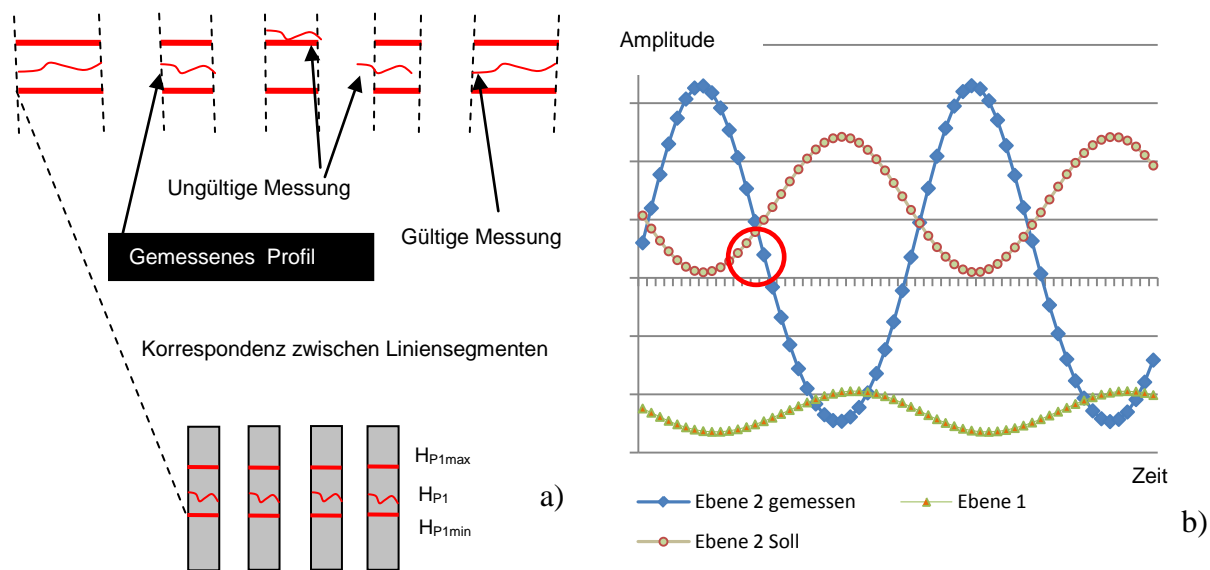


Abb. 6: a) Detektion von Messungen bei horizontaler Flächennormale eines angemessenen Wasserpunktes (MULSOW, 2008). b) Interpolation zur Bestimmung der Punkthöhe (Beispiel Sinusschwingung der Wasseroberfläche in Aufnahme richtung).

5 Fazit und Ausblick

Der Nachweis der Eignung der Adaption der optischen Triangulation für die Erfassung von spiegelnden Oberflächen konnte erbracht werden. Experimentell konnte das hohe Genauigkeitspotential des Verfahrens nachgewiesen werden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Systemkonfiguration sind Genauigkeiten von wenigen 1/100 mm (Ein-Ebenensystem) erreichbar.

Für die Überführung in ein operationelles System wurden Vorschläge zur Optimierung angeführt. Teilweise wurden diese bereits umgesetzt. Nun bedarf es im Weiteren der praktischen Realisierung eines Demonstrators und einer entsprechenden Steuer- bzw. Berechnungssoftware sowie der Integration einer 200 mm Linse.

6 Literaturverzeichnis

- ATV-DVWK, 2003: Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. In: 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 Wasserbaulichem Versuchswesen. In: Wasserwirtschaft WAWI 4/2003, S. 36-40
- HENNING, M., SAHARHAGE, V., HENTSCHEL, B., 2007: 3D-PTV – Ein System zur optischen Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 90 (2007)
- KIEFHABER, D., ROCHOLZ, R., JÄHNE, B., 2011: Improved optical instrument for the measurement of water wave statistics in the field In: Gas Transfer at Water Surfaces 2010. ed. by Kommori, S., McGillis, W. and Kurose, R. Kyoto Univ. Pr., Kyoto, Japan, S. 524-534
- 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. Elsevier Science Journal
- MULSOW, C., PUTZE, T., MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen. In: Proceedings Oldenburger 3D-Tage 2005, S. 30-37
- MULSOW, C., SCHULZE, M., WESTFELD, P., 2006: An optical triangulation method for height measurements on non-stationary water surfaces, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36:5 (2006), 213–217.
- MULSOW, C., MAAS, H.-G., WESTFELD, P., SCHULZE, M., 2008: Triangulation methods for height profile measurements on instationary water surfaces, Journal of Applied Geodesy 01/2008