

Realisierung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Messung auf bewegten spiegelnden Oberflächen

CHRISTIAN MULSOW¹

Zusammenfassung: Zur Lösung von Messaufgaben in der experimentellen Hydromechanik wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), einem potentiellen Anwender, ein Projekt zur Entwicklung eines Messsystems initiiert, welches die Bestimmung von Oberflächenprofilen auf spiegelnden Oberflächen durch eine Laserlichtschichtprojektion erlaubt. Als zusätzliche Anforderung wurde dabei die Erfassung von dynamischen Veränderungen der Objektoberfläche benannt, da das zu entwickelnde System von der BAW zur Messung von bewegten Wasseroberflächen eingesetzt werden soll.

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung auf Basis der optischen Triangulation mit Hilfe 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 können subpixelgenau in den Aufnahmen gemessen und die Werte dann durch ein am Institut entwickeltes mathematisches Modell in Oberflächenhöhen und -neigungen überführt werden. Die Integration eines Schrittmotors zur variablen Einstellung der Laserebenenneigung ermöglicht zum einem die effiziente Kalibrierung des Gesamtsystems und zum anderen die sequentielle Messung von mehreren Profilen bei gleich bleibender Position des Messsystems. Die erfassbare zeitliche Dynamik der Oberflächenänderung ist dabei nur durch die Aufnahmezeit der Kamera begrenzt.

Der Beitrag stellt das Grundprinzip der Messmethode, die geometrische Modellierung sowie einen darauf basierenden Ansatz zur strengen Kalibrierung des Systems vor.

1 Einleitung

Bei der Projektierung von flussbaulichen Maßnahmen ist die Verwendung von physikalischen Modellen zur Lösung von vielschichtigen Fragestellungen eine weit verbreitete und häufig angewandte Methode [ATV-DVWK 2003; BLOCK, 1936]. Zwar erfuhr die theoretische Analyse hydromechanischer Phänomene in mathematischen Modellen durch die Fortschritte in der Computertechnik und den großen Wissensstand einen gewaltigen Bedeutungszuwachs, jedoch ist die experimentelle Untersuchung in Modellaufbauten meist unumgänglich [GODDING et al., 2003]. Als eine wichtige Messgröße zur Erfassung von hydromechanischen Vorgängen im Modell kann die Wasserspiegellage benannt werden. Deren Bestimmung erfolgt in der Regel punktuell über Messung an Pegeln. Dabei kommen die unterschiedlichsten Methoden zum Einsatz, wie z.B. die Beobachtung der Vertikalbewegung eines Schwimmers oder die Wasserstandsmessung in mit dem eigentlichen Wasservolumen über Röhren kommunizierenden Zylindern mittels Ultraschall (Laufzeitverfahren). Diese Verfahren sind jedoch hinsichtlich ihrer zeitlichen sowie räumlichen Auflösung begrenzt und beein-

¹ Dipl. Ing. Christian Mulsow, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, e-mail: Christian.Mulsow@mailbox.tu-dresden.de

flussen zudem die hydromechanische Dynamik des Modells [siehe auch MULSOW et al., 2005]. Die Unzulänglichkeiten der derzeit etablierten Verfahren bedingen den anwenderseitigen Bedarf nach einem Messsystem, welches die flächenhafte sowie zeitlich hoch aufgelöste Bestimmung der Wasserspiegellage ermöglicht. Bei diesem zu entwickelnden System ist ein hoher Automatisierungsgrad anzustreben und zudem eine Beeinflussung des Modells auszuschließen. Aus diesen Anforderungen heraus bot sich die Photogrammetrie als Lösungsgeber für berührungslos messende Systeme geradezu an. Daher wurde im Rahmen der Kooperation des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Projekt zur Entwicklung und Verifikation eines Systems initiiert, welches den oben genannten Anforderungen weitestgehend gerecht werden soll.

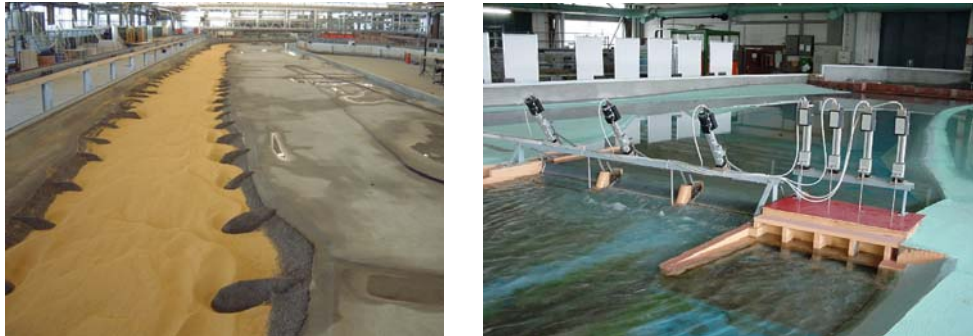


Abb. 1 Physische Modelle von Flussläufen und Bauwerken (Quelle: BAW).

2 Messprinzip

Die Bestimmung von Wasseroberflächen kann nicht mit herkömmlichen Oberflächenmessmethoden der Photogrammetrie erfolgen, da diese meist diffus reflektierende Objektoberflächen voraussetzen. Diese, im ersten Eindruck eher hinderlich erscheinenden, spiegelnden Eigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen können jedoch dahingehend genutzt werden, das Messprinzip der optischen Triangulation auf Basis einer Laserlichtschicht in geeigneter Weise zu adaptieren und damit die Lösung der Messaufgabe zu erreichen [MAAS et al., 2003]. Wie bei der herkömmlichen Formerfassung von Objektoberflächen mittels Laserlichtschicht und Kamera/s wird im vom IPF entwickelten System auf die Oberfläche der Flüssigkeit eine Laserlichtschicht projiziert. Da auf Grund der Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Flüssigkeiten keine auswertbare Laserlinie auf der Oberfläche beobachtet werden kann, wird diese Schnittlinie zwischen Objektoberfläche und Laserlichtschicht indirekt über die Reflexion und Projektion auf eine vertikal zur Oberfläche orientierten Ebene visualisiert (siehe Abb.2).

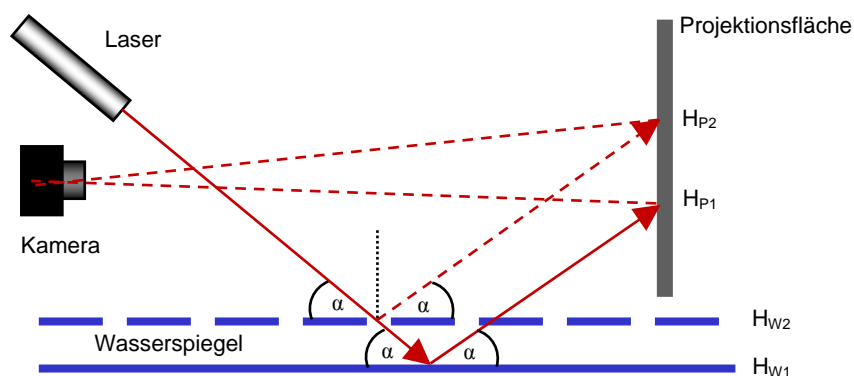


Abb. 2 Optische Triangulation mittels einer Projektionsfläche.

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.

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 Abb.3).

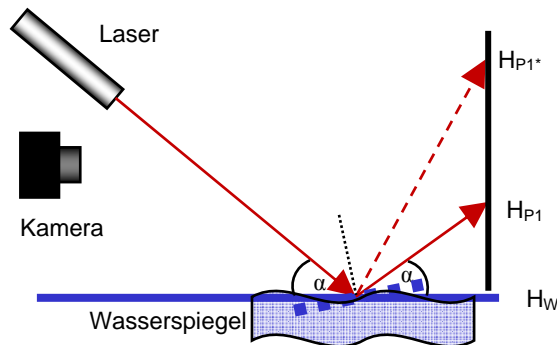


Abb. 3 Einfluss von Wellenbewegungen auf die Reflektionsrichtung einer Laserschicht.

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 (siehe Abb.4) beobachtet wird [MULSOW et al., 2005]. Dadurch konnte 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.

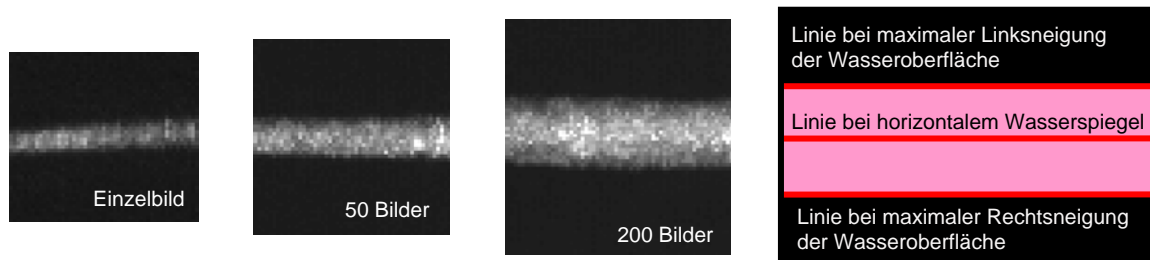


Abb. 4 Ergebnisbilder der Akkumulation über verschieden lange Bildsequenzen.

Vollständige Abhilfe der Wellenproblematik verspricht das Einfügen einer zweiten Projektionsebene in den Systemaufbau, womit eine strenge geometrische Lösung der Oberflächenbestimmung ermöglicht wird (siehe Abb.5). 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 Profilverpunkten aus den Messwerten ableiten. Elementare Voraussetzungen sind dabei das Wissen um die räumlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen untereinander (Projektionsflächen & Laserlichtschicht) und einer Referenzfläche (Flüssigkeitsspiegel in Ausgangslage).

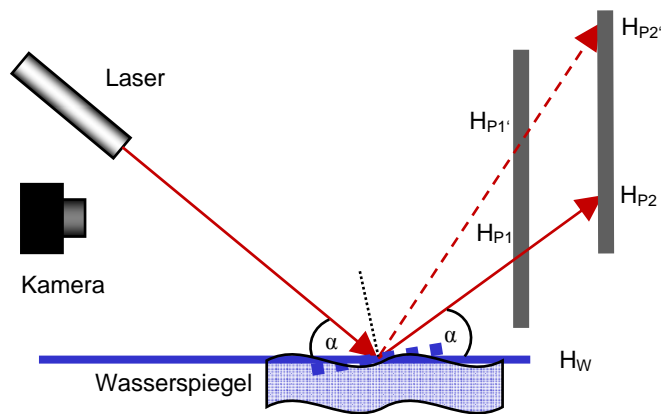


Abb. 5 Zwei-Ebenensystem (Prinzip).

3 Systemaufbau

In der Entwicklungsphase stellte sich die geeignete technische Ausführung der Projektionsfläche (gleichzeitige Abbildung der Lichtschicht ohne deren Beeinflussung) als Grundproblem dar. Die Verwendung einer semitransparenten Platte als vordere Projektionsfläche wurde verworfen, da diese mit einer Beeinflussung der Laserlichtschicht (Brechung, Beugung sowie Abschwächung) einhergeht. Daher wurde die vordere Projektionsebene nicht durchgehend, sondern als rechenförmige durchbrochene Fläche gestaltet (siehe Abb. 6). Ein Teil der Laserschicht wird durch die Ebenenteile aufgefangen, der andere Teil hingegen passiert unbeeinflusst die vordere Ebene und wird auf der hinteren Projektionsfläche abgebildet.

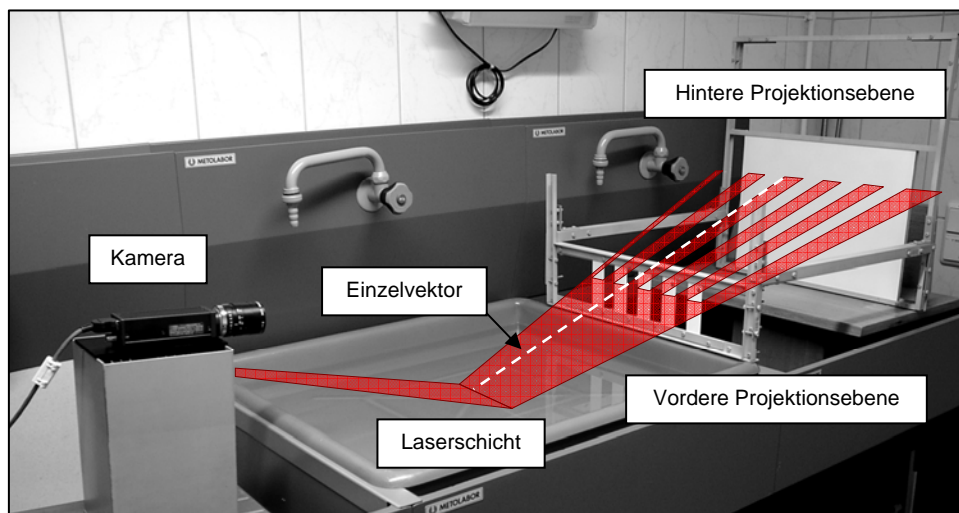


Abb. 6 Systemaufbau ohne Schrittmotor.

Auf eine vollständige Projektion der Laserschicht auf beide Ebenen wurde verzichtet und damit die komplette Bestimmung des Wasserprofils aufgegeben. Stattdessen wird das Profil durch die Schnittpunkte der Verbindungsvektoren zwischen den korrespondierenden Endpunkten der jeweiligen Laserlinien (auf der vorderen und hinteren Projektionsebene) und der projizierten Laserschicht repräsentiert.

Diese Diskretisierung löst ebenfalls Problematiken, welche bei der ausschließlich Linienhaften Auswertung entstehen würden, da hier nicht Vektoren sondern eine Fläche mit der aufprojizierten Laserebene verschnitten werden müsste. Eine mathematische Beschreibung der

durch die Reflektion an der bewegten Flüssigkeitsoberfläche deformierten Laserebene jedoch wäre sehr komplex, wenn nicht gar unmöglich, und damit die Schnittlinienberechnung der aufprojizierten mit der reflektierten Laserlichtschicht nicht ohne weiteres durchführbar.

Der Punktabstand der Diskretisierung des Flüssigkeitsprofils hängt 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 lateralen Wasserwellen ausgeschlossen ist.

Die Bildaufnahme erfolgt durch eine Firewire- Kamera vom Typ Sony XC700. Als Projektionseinheit dient ein Diodenlaser mit einer Leistung von 35mW mit einer vorgesetzten Powellinse (Öffnungswinkel 45°), welche die Erzeugung einer weitestgehend homogenen Lichtschicht ermöglicht.

Als zusätzliche Komponente wurde ein Schrittmotor in das System integriert, an welchem die Lasereinheit befestigt ist. Diese Kombination erlaubt die variable Einstellung des Anstellwinkels der Laserebene und damit die sequentielle Messung von mehreren parallelen Profilen, ohne dabei die Position der Messeinheit zu verändern (siehe Abb. 5).

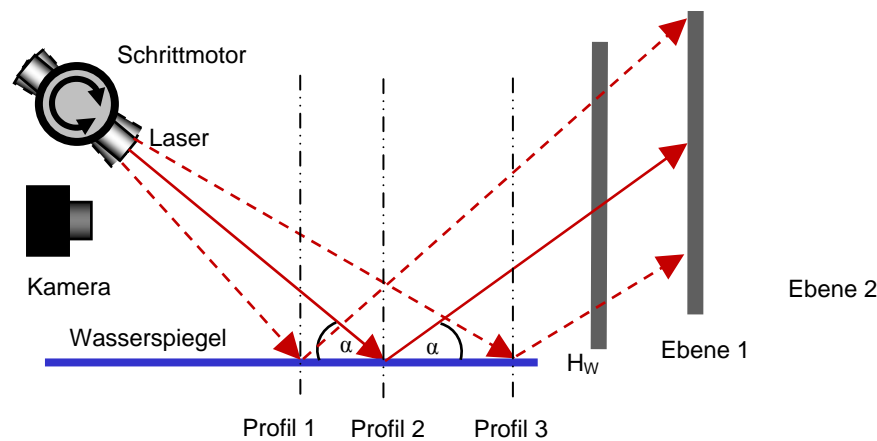


Abb. 5 Zwei-Ebenen-System mit Schrittmotor.

4 Kalibrierung

Die Kalibrierung eines derartigen Systems ist im Gegensatz zum Ein-Ebenen-System (siehe auch [MULSOW,2005]) sehr komplex und beinhaltet, wie oben bereits erwähnt, die Bestimmung einer Reihe von Parametern, wie die Laserebenenlage, die Lage der Projektionsflächen und den Bezug des Systems zur Wasseroberfläche in Ruhelage. Die mathematische Modellierung der Vorgänge ist eine Grundlage für die Entwicklung einer Kalibrierstrategie und soll im folgenden Abschnitt näher beleuchtet werden.

4.1 Modellierung

Die direkte Projektion der Laserlichtschicht auf die vertikalen Flächen kann mit der allgemeinen Gleichung für die Zentralprojektion beschrieben werden:

$$X = X_0 + \lambda \cdot R \cdot x \rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' - x'_H \\ x' - y'_H \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Das Projektionszentrum X_0 wird mit dem Ursprung der fächerförmigen Lichtebene im Lasermodul gleichgesetzt. Zusätzlich wird angenommen, dass sich der Ursprung der Laserlichtebene auf der Drehachse des Rotmotors befindet und die Ebenennormale senkrecht zur Rotationsachse orientiert ist. Das Projektionszentrum und die korrespondierenden Endpunkte der Liniensegmente auf der hinteren bzw. vorderen Vertikalebene liegen auf einer Linie und spannen in der Gesamtheit ein ebenes Strahlenbündel auf.

Die auf der hinteren Projektionsfläche gemessenen Endpunkte der Liniensegmente werden im X - Vektor angegeben. Da es sich um eine Ebene handelt und das übergeordnete Koordinatensystem terrestrisch orientiert werden soll, wird dem Y -Wert stets der Wert 0 zugewiesen. Die X -Achse verläuft waagrecht und demnach die Z -Achse senkrecht. Zusätzlich wird auf der hinteren Ebene ein Ursprung festgelegt, womit die Elemente der hinteren Ebene das übergeordnete System festlegen. Die Koordinaten des Projektionszentrums beziehen sich also auf die hintere Vertikalebene.

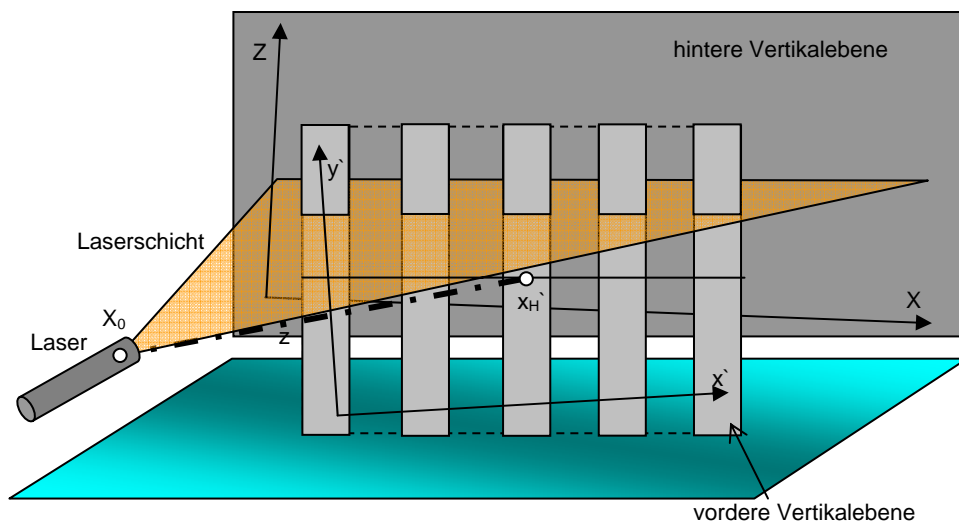


Abb. 6 Direkte Projektion; Modellbeschreibung des Zwei-Ebenensystems mit Schrittmotor.

Die auf der vorderen Ebene gemessenen Punkte werden in (1) im x -Vektor angegeben. Wie bei der Festlegung des Kamerakoordinatensystems in der Photogrammetrie werden das Ebenensystem durch die x,y -Ebene und den Durchstoßpunkt der von dem Projektionszentrum ausgehenden Lotrechten bestimmt. Der Parameter z steht hier für den Abstand zwischen Projektionszentrum und x,y -Ebene. Die Rotationsmatrix R in beschreibt die Orientierung zwischen der hinteren und vorderen Vertikalebene.

Die mathematische Darstellung der indirekten Projektion kann aus (1) wie folgt abgeleitet werden:

$$X = X_{\text{virt}} + \lambda \cdot R \cdot x \rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - 2d \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Mit den zusätzlichen Parametern in (2) wird das Rotationszentrum an der Flüssigkeitsoberfläche gespiegelt und damit ein virtuelles Rotationszentrum X_{virt} geschaffen (siehe Abb.7). Der Vektor n beschreibt dabei die Ebenennormale und der Parameter d den Abstand des Rotationszentrums X_0 von der der Flüssigkeitsoberfläche. Virtuelles Projektionszentrum und die korrespondierenden Endpunkte der Liniensegmente auf der hinteren bzw. vorderen Vertikalebene liegen hier ebenfalls auf einer Linie und spannen in der Gesamtheit das an der Flüssigkeitsoberfläche reflektierte Strahlenbündel auf.

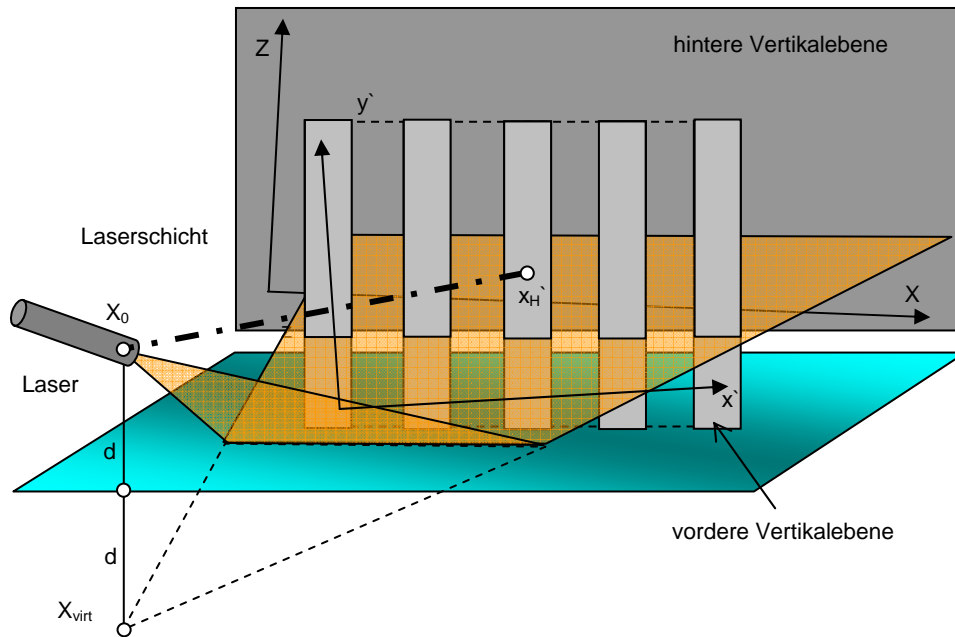


Abb. 7 Indirekte Projektion; Modellbeschreibung des Zwei-Ebenensystems mit Schrittmotor.

Die Kamera wird nicht in das mathematische Modell integriert, da diese ausschließlich die Liniensegmente an der vorderen bzw. hinteren Ebene beobachtet und die Positionen der Liniendpunkte separat in die Ebenen-Systeme überführt werden.

Die oben getroffene Annahme, dass sich der Ursprung der Laserlichtebene auf der Drehachse des Rotmotors befindet und die Ebenennormale senkrecht zur Rotationsachse steht, lässt sich sicherlich nicht hundertprozentig in die technische Realisierung überführen. Eine Modellierung etwaiger Abweichungen ist jedoch möglich und Gegenstand weiterer Arbeiten.

4.2 Datenakquisition

Die Datenakquisition besteht in der Aufnahme von Bildsequenzen bei unterschiedlichem Anstellwinkel der Laserlichtebene und ruhendem Flüssigkeitsspiegel. Die Bildaufnahmen dienen der Beobachtung der Liniensegmente auf den Vertikalflächen bei direkter und indirekter Projektion. Die Änderung des Anstellwinkels durch den Schrittmotor kann zusätzlich über einen Winkelencoder mit einer Genauigkeit von 0.001° erfasst werden. Die Zuordnung zwischen den jeweiligen Bildaufnahmen und den entsprechenden Anstellwinkeln wird über die Nummerierung der Bilder realisiert.

4.3 Parameterbestimmung

Die rechnerische Bestimmung der numerischen Werte für die Parameter kann über eine vermittelnde Ausgleichung im Gauß-Markow-Modell (GMM) erfolgen. Die Aufstellung der Beobachtungsgleichungen lässt sich aus den Modellierungen (1) und (2) ableiten. Für den Fall der direkten Projektion sind die Beobachtungsgleichungen analog zu den bekannten Kollinearitätsgleichungen der Photogrammetrie. Die Gleichungen für die indirekte Projektion kann aus den Kollinearitätsgleichungen wie folgt abgeleitet werden:

$$x' = x'_H + z \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{21} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{31} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}{r_{13} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{23} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{33} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}$$

$$y' = y'_H + z \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{22} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{32} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}{r_{13} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{23} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{33} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)} \quad (3)$$

Zusätzliche Beobachtungsgleichungen könnten für die erfassten Winkel zwischen den unterschiedlich geneigten Ebenen aufgestellt werden. Als zusätzliche Restriktion wäre ebenfalls der Ebenenzwang für beobachtete Linienpunkte gleichen Laserlichtschicht-Anstellwinkels in die Ausgleichung integrierbar.

Aus den in der Ausgleichung bestimmten Parameterwerten lassen sich alle für die eigentliche Messung notwendigen Größen ableiten, wie die Lage und die Orientierung der Laserlichtebene in Abhängigkeit eines bestimmten Einstellwinkels des Schrittmotors, sowie die Position der Vertikalflächen und damit die Grundlage für die Überführung von 2D-Beobachtungen der Linienendpunkte in 3D-Koordinaten für die Vektorrekonstruktion.

5 Fazit

Das vorgestellte Messsystem zeigt, dass das Prinzip der optischen Triangulation für die Erfassung von spiegelnden Oberflächen adaptiert werden kann. Es bedarf dazu Modifizierungen im Aufbau und in der Auswertung. Erste Untersuchungen haben den Nachweis der prinzipiellen Eignung der Methode zur Messung von Flüssigkeitsoberflächen erbracht. Jedoch wurden auch die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt, welche eine Weiterentwicklung der Auswertestrategien und des Systemaufbaus erforderten. Die vorgestellte strenge Lösung der Problematiken bei der Messung von bewegten Flüssigkeitsoberflächen ist in der Theorie entwickelt und eine geeignete Kalibrierstrategie für das konzipierte System bereits abgeleitet worden. Nun bedarf es im Weiteren der praktischen Verifikation des Kalibrierkonzepts und der Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Systems im Rahmen einer konkreten Messaufgabe.

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 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
- 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