

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Hentschel, Bernd

Messungen des Wasserspiegels in gegenständlichen Modellen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103367>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hentschel, Bernd (2015): Messungen des Wasserspiegels in gegenständlichen Modellen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 69-78.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Messungen des Wasserspiegels in gegenständlichen Modellen

Bernd Hentschel

Auch wenn die Messung von Wasserständen seit dem Beginn der physikalischen Modellierung von Strömungsvorgängen zu den Hauptaufgaben des Versuchswesens gehört, so sind viele Aufgabenstellungen zur Erfassung dieser Messgröße nach wie vor nur mit einem erheblichen Aufwand oder nicht zufriedenstellend erfüllbar. In den letzten Jahren sind sehr unterschiedliche Methoden entwickelt worden, um in den Modellen mit der jeweils erforderlichen räumlichen oder zeitlichen Auflösung und Genauigkeit Wasserspiegel zu messen. Neben der mittleren Höhe kann mit einigen Methoden auch die zeitliche Veränderung oder die genaue Form der Oberfläche in größeren Bereichen berührungslos gemessen werden.

In dem Vortrag werden unterschiedliche Methoden wie Spitzentaster, Ultraschallsensoren und optische Verfahren sowohl für quasi stationäre Wasserstandsmessungen als auch für zeitlich und räumlich aufgelöste Messaufgaben vorgestellt.

Stichworte: Wasserbaulicher Modellversuch, Wasserstand, Wasserspiegel, Messtechnik

1 Wasserspiegel im Labor

1.1 Anwendungen und Begriffsdefinitionen

Die Kenntnis der Form und Lage der freien Oberfläche des Wassers ist bei hydraulischen Labor- und Modellversuchen eine wesentliche Grundlage für den Betrieb und viele Analysen Auswertungen. Während es für viele Untersuchungen bei stationären Abflusszuständen ausreicht, die über die Zeit gemittelten Wasserstände an einzelnen diskreten Orten zu kennen, ist es bei anderen Versuchen wichtig, die Dynamik der gekrümmten Wasseroberfläche über größere Bereiche zu ermitteln (Variabilität der Wasserstände). Für diese sehr unterschiedlichen Anwendungen sind geeignete Messverfahren, welche sich auch in Aufwand und Kosten erheblich unterscheiden, sorgfältig auszuwählen.

Der Wasserstand h ist nach DIN 4049-3 (1994) der lotrechte Abstand eines Punktes des Wasserspiegels über oder unter einem Bezugshorizont, z. B. durch einen Pegelnullpunkt festgelegt. Als Wasserspiegel wird die ausgeglichene

Form einer freien, weitgehend ausgeglichenen Wasseroberfläche bezeichnet, wie sie sich unter dem Einfluss der Schwerkraft einstellt.

In Laborversuchen ist der Wasserspiegel infolge einer Strömung in der Regel nicht ruhend, so dass Wellen oder Blasen auftreten. Die Störungen gegenüber einer ausgeglichenen Oberfläche sind – ohne die Rahmenbedingungen der jeweiligen Fragestellung zu verfälschen – durch ein geeignetes Versuchsdesign zu minimieren (u. a. Beruhigung der Strömung am Modelleinlauf). Sie ergeben sich auch durch die Grenzflächenspannung, wodurch sich an einer Glasscheibe ein konkaver Meniskus der Wasseroberfläche ausbildet. Bei instationären Randbedingungen überlagern solche Störungen den sich über die Zeit ändernden Wasserspiegel. Je nach Aufgabe ist der zeitliche Mittelwert einer ausgeglichenen Wasseroberfläche lotrecht über dem Bezugshorizont oder die zeitlich und räumlich aufgelöste Höhe und Neigung des Wasserspiegels zu bestimmen (z. B. Messung von Wellenamplituden und Frequenzen). Die erforderliche räumliche und zeitliche Auflösung ist ebenso entscheidend für die Wahl des passenden Equipments, wie Randbedingungen des zu untersuchenden Phänomens (maximales Wasserstandsdifferenz, Einzelmessung oder automatische Aufzeichnung der Daten etc.). Ein Ausschlusskriterium für die Anwendung der meisten Messsysteme sind Schaum und Wasser-/Luftgemische mit einem hohen Blasenanteil.

1.2 Räumliche Auflösung

Der Wasserstand soll in der Regel an einem konkreten Ort gemessen werden. Die Ausdehnung dieses Messbereiches ist je nach Messsystem unterschiedlich. Bei Ultraschall-Messgeräten ist der Messbereich zum Beispiel vom Abstrahlwinkel und dem Abstand des Messensors vom Wasserspiegel abhängig (s. Abbildung 1). Dieses Areal, von dem das Ultraschallsignal zurückgestrahlt wird, ist darüber hinaus nicht scharf abgegrenzt und kann sich bei gewellter Oberfläche ständig in der Ausdehnung verändern. Bei der optischen Lagebestimmung mit Hilfe von Partikeln auf der Wasseroberfläche ist der Messbereich durch die Größe der Partikel vorgegeben (und die zeitliche Auflösung durch deren Folgeverhalten).

Viele Einzelgeräte in einer Versuchsanlage (z.B. automatisch arbeitenden Ultraschall-Messgeräte) ermöglichen eine der häufigsten Messaufgaben zu lösen indem sie den Verlauf und das Gefälle der Wasserstände an ausgewählten Stationen entlang des Fließweges zu

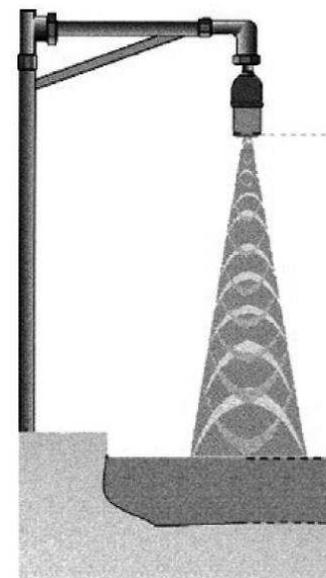


Abbildung 1: Ausbreitung eines Ultraschallsignals

bestimmen. Eine engmaschige, flächige Vermessung des Wasserspiegels ist so in der Regel nicht möglich.

Flächige Messungen, um zum Beispiel die Lage und Form eines gekrümmten Wasserspiegels zu ermitteln, werden aus der flächigen Interpolation vieler Einzelwerte ermittelt. Während es bei stationären Zuständen möglich ist, diese Einzelwerte nacheinander zu vermessen, muss bei instationären Zuständen die Messwerterfassung zeitgleich an allen Messpunkten erfolgen. Die zeitgleiche Messung ist zum Beispiel durch photogrammetrische Messung (3D-PTV, s. Kap. 2.6) oder durch einen aufgefächerten Laser (s. Kap. 2.7) möglich.

1.3 Zeitliche Auflösung

Der ideale Zustand eines streng stationären Wasserstandes spielt im wasserbaulichen Versuchswesen keine Rolle. In der Regel treten quasi-stationäre oder instationäre Druckhöhenverläufe auf (s. Abbildung 2).

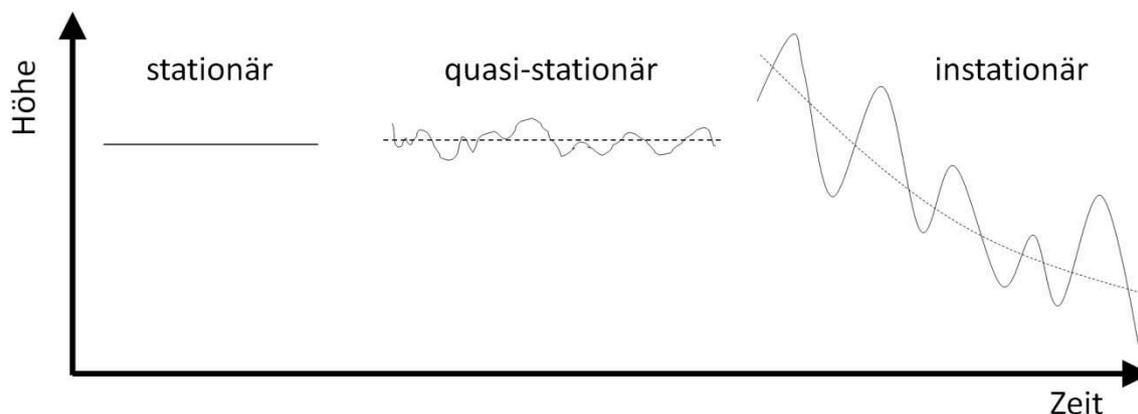


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf eines Wasserspiegels

Bei den quasi-stationären Wasserstandsänderungen ist für die weiteren Auswertungen oft der zeitliche Mittelwert und nicht das Schwankungsverhalten von Interesse. Deshalb werden die Schwankungen entweder direkt beim Versuch gedämpft (z. B. durch die Messung außerhalb des Modells mittels kommunizierender Röhren, s. Kap. 1.4) oder der Mittelwert wird über einen hinreichend langen Messzeitraum gebildet. Die ausreichende Messdauer und die Trendfreiheit sind dann vorab zu prüfen.

Soll hingegen die Variabilität des Wasserstands quantifiziert werden, ist in Abhängigkeit von der Messaufgabe die Wahl der zeitlichen Auflösung des Messgerätes von hoher Bedeutung. Jedes Messsystem für den Wasserstand hat eine diskrete Auflösung (Abtastintervall, Videotakt) und häufig werden die Messwerte bereits innerhalb des Gerätes über einen Zeitraum gemittelt (z.B. bei Ultraschall-Messgeräten). Hinzu kommt, dass viele Messsysteme eine Eigenträgheit haben (z. B. Schwimmer).

1.4 Messungen mit kommunizierenden Röhren

Eine effiziente und häufig verwendete zeitliche Mittelung des Wasserstandes wird erreicht, wenn die Messungen außerhalb des Modells nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren erfolgen. Die Messgeräte können dabei sowohl an einzelnen Messstellen (s. Abbildung 3) aufgestellt oder mit langen Schläuchen an einer Stelle gebündelt werden (Messharfe, Pegelharfe).

Es sind Verbindungsschläuche mit einem geeigneten Durchmesser zu wählen, um einerseits keine zu starke Dämpfung/Trägheit des Systems (reagiert erst sehr spät auf Änderungen) zu erreichen und um andererseits schädliche Luftpinschlüsse, die den Messwert verfälschen, beseitigen zu können.

Selbst bei kurzen und relativ dicken Verbindungsschläuchen kommt oft zu einer starken Glättung und Verzögerung der Wasserstandsänderungen, sodass diese Anordnung für instationärer Prozesse ungeeignet ist.

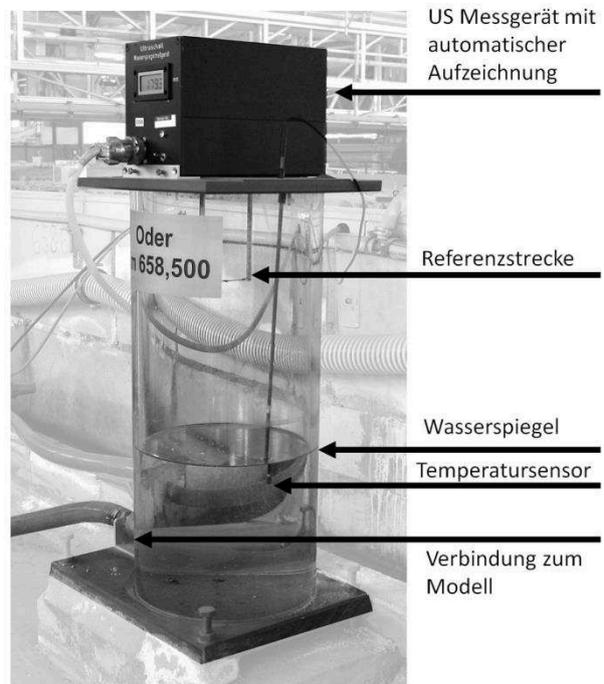


Abbildung 3: Ultraschall (US) Wasserstandsmessgerät am Modell (kommunizierende Röhren)

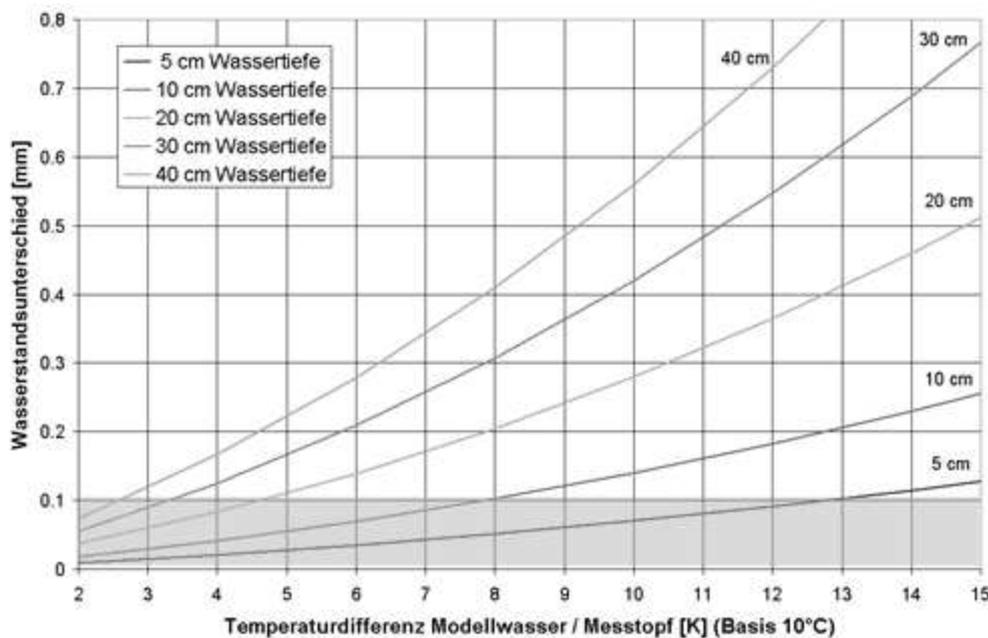


Abbildung 4: Wasserstandsunterschied durch temperaturbedingte Dichteunterschiede

Da das Prinzip der kommunizierenden Röhren darauf beruht, dass die Dichte des Fluides an beiden Seiten der Verbindung gleich ist, ist es wichtig darauf zu achten, dass keine größeren Temperaturunterschiede zwischen dem Modell und dem Messzylinder auftreten. Abbildung 4 zeigt den Fehler, der sich durch Temperaturunterschiede zwischen dem Wasser im Modell und im Messzylinder ergibt (*Hentschel 2007*). Bei einem Wasserstand von 20 cm beträgt der Fehler im Temperaturbereich von 10 °C bei einer Temperaturdifferenz von 5 K etwa 0,1 mm. Wenn das Modellwasser aus einem Tiefbehälter zugeführt wird und der Messzylinder der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, können leicht noch größere Temperaturunterschiede auftreten. Bei einer zu großen Temperaturdifferenz ist daher das Wasser im Messzylinder durch Wasser aus dem Modell zu ersetzen.

2 Messsysteme

2.1 Messgeräte für Naturmessungen

Für Naturuntersuchungen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Messsysteme, die aufgrund der hohen Fertigungszahlen auch recht preiswert und robust sind. (*Morgenschweis, 2010*) Leider sind diese Geräte entweder wegen ihrer Größe oder wegen der erreichbaren Genauigkeiten nur bedingt für Laboruntersuchungen nutzbar. In der Natur wird in der Regel für den Wasserstand eine Genauigkeit von 1 bis 10 cm gefordert, im Labor hingegen zwischen 0,1 und 1 mm. Folgende Systeme können aber im Einzelfall für Laborzwecke sinnvoll einsetzbar sein, insbesondere wenn im Labor sehr große Wasserstandsunterschiede zu messen sind:

- Industrielle Drucksonden zur Füllstandsmessung (FS) in Behältern:
Delta h: z.B. 0,05% vom FS, d.h. 2 mm bei 4 m Füllstand
- Radar, Delta h: +/- 1 cm
- „Geführte Mikrowellen“ (Funktion ähnlich Radar an einem Seil)
Delta h: +/- 5 mm
- Pneumatik / Einperl-Sensoren: Delta h: +/- 5 mm

2.2 Pegel

Die einfachste Möglichkeit den Wasserstand zu messen ist ein Pegel, an dem die Höhe direkt optisch abgelesen werden kann. An einer Laborrinne kann dafür ein Maßband auf die Scheibe geklebt werden (s. Abbildung 5). Diese Methode ist sehr anschaulich und für Kontrollzwecke in jedem Fall gut nutzbar. Eine automatisierte optische Beobachtung des Pegels (Wasserstand an einer definierten Berandung) mit Videokameras ermöglicht die automatische Bestimmung des der Höhe auch bei instationären Versuchen (z. B. für Wellen-Messungen). Industrielle

Messkameras (hier im Idealfall Zeilenkameras) ermöglichen bei einer sehr hohen Auflösung Abtastfrequenzen $\gg 100$ Hz. Fehler durch Bild-, Perspektivfehler, Lichteffekte, aufgelöste Wasser-/Luftgrenzen, Meniskus an der Wand einer Laborrinne etc. sind durch eine gute Systemkalibrierung und Bildverarbeitung zu beseitigen.

2.3 Spitzentaster oder Stechpegel

Spitzentaster sind das klassische Instrument in den Wasserbaulaboratorien überhaupt. Sie arbeiten sehr einfach, zuverlässig und bei richtiger Bedienung auch sehr genau. Bei diesem Messgerät wird eine Metallspitze über eine Zahnstange mit einem Nonius von oben oder unten

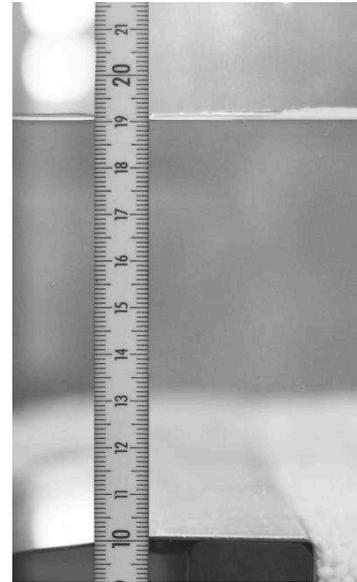


Abbildung 5: Maßband an einer Laborrinne

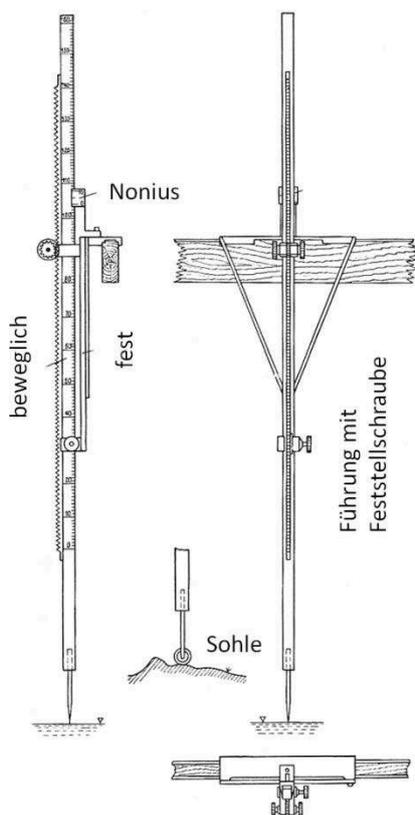


Abbildung 6: Spitzentaster (Eisner 1932)

an den Wasserspiegel herangeführt.

Mit diesem Gerät sind Genauigkeiten bei ruhenden Wasseroberflächen $< 0,05$ bis $0,1$ mm erreichbar. Für die Spitze der Nadel haben sich Winkel zwischen 50° und 80° bewährt (Eisner 1932). Flachere oder steilere Winkel verringern die Ablesegenauigkeit, ebenso ist bei einer Annäherung von unten nur etwa die halbe Genauigkeit erreichbar.

Die Systemgenauigkeit eines Spitzentasters liegt bei leicht bewegtem Wasser bei etwa $\pm 0,2$ bis $0,3$ mm. Wenn als Spitze ein kleines Rad verwendet wird, kann mit dem gleichen Gerät auch eine Sohlgeometrie abgetastet werden (s. Abbildung 6).

Bei einer einfachen elektrischen Variante des Spitzentasters werden zwei Drähte statt der Metallspitze in das Wasser getaucht.

Nach dem gleichen Prinzip arbeitet ein vibrierender Spitzentaster. Hier werden die Drähte leicht vibrierend über einen Schrittmotor periodisch in das Wasser eingetaucht. Die Vibration soll dabei das Anhaften der Wasseroberfläche durch die Grenzflächenspannung verhindern.

Ein kapazitiver Stechpegel arbeitet ähnlich. Hier wird ein kapazitiver Sensor mit Hilfe eines Schrittmotors konstant ein paar Millimeter über der mittleren

Wasseroberfläche positioniert. Beide elektrischen Abtastsysteme erreichen Genauigkeiten bis 0,1 mm.

2.4 Ultraschallsensoren / Echolot

Bei Ultraschallsensoren wird ein Ultraschallsignal auf die Wasseroberfläche gesendet und der Abstand zwischen Sensor und Wasseroberfläche über die Laufzeit des reflektierten Signals gemessen. Die Laufzeit ist von der Schallgeschwindigkeit (ca. 340 m/s in Luft) und damit von der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck abhängig. Eine Lufttemperaturänderung von 1°K bewirkt zum Beispiel eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit um 0,18 %. Viele kommerzielle Sensoren haben daher in den Messköpfen Temperatursensoren und erreichen so Genauigkeiten zwischen 0,15 und 0,2 mm.

In der Bundesanstalt für Wasserbau wird eine Eigenentwicklung verwendet (s. Abbildung 3), bei der sich in einem definierten Abstand unterhalb des Sensors eine Referenzfläche befindet. Durch dieses zweite reflektierte Signal ist das System selbstkalibrierend bei unterschiedlichen Umwelteinflüssen und gewährleistet eine Genauigkeit von etwa 0,05 mm. Um Messfehler durch Temperaturunterschiede zwischen dem Modellwasser und dem Wasser im Messzylinder zu beseitigen, wird die Temperatur des Modellwassers und in einigen ausgewählten Messzylindern permanent gemessen und ausgewertet.

Die Sensoren können sowohl direkt in den Modellen als auch in außerhalb positionierten Messzylindern eingesetzt werden. Bei einer Anwendung direkt im Modell sind die Systeme empfindlich gegen Luftzug und Rückstreuverluste bei welliger oder turbulenter Oberfläche. Dort sind sie in der Lage, Wasserstandsänderungen mit hohen Frequenzen zu messen.

Ultraschallsensoren sind sehr robust und zuverlässig. Bei gelegentlicher Überprüfung bzw. Eichung für einen dauerhaften Einsatz geeignet und werden in der BAW auch zur Qualitätssicherung eingesetzt, indem mit ihnen an relevanten Stellen in den Modellen und Rinnen die Wasserstände dauerhaft zur langfristigen Archivierung gemessen werden.

2.5 Magnetostriktive Schwimmer

Magnetostriktive Wegaufnehmer (s. Abbildung 6) bestehen aus einer fixen Basis, einem Wellenleiter, einem beweglichen Permanentmagneten sowie einem Wandler, der eine mechanische Schwingung in ein elektrisches Signal umsetzt. Der Wandler sitzt bei in einem



Abbildung 6: Magnetostriktiver Schwimmer (Produktfoto Fafnir, 2015)

Schwimmer und folgt den Wasserstandsänderungen. Das Prinzip ist weitgehend robust gegen Umwelteinflüsse wie Temperatur, Erschütterung, Schock, Vibrationen. Es ist lediglich darauf zu achten, dass keine erhöhte Reibung durch Verschmutzungen an dem Wellenleiter erzeugt wird.

Magnetostruktive Schwimmer sind für Messungen in Messzylindern sehr gut geeignet. Sie erreichen Messgenauigkeiten von bis zu $\pm 0,3$ mm. Die Geräte können Höhenunterschiede von bis zu 10 m messen und sind daher auch gut für Modelle mit einer sehr hohen Vertikaldynamik geeignet.

2.6 3D-PTV (Partikel-Tracking-Velocimetrie)

Bei der Partikel-Tracking-Velocimetrie handelt es sich um ein photogrammetrisches Verfahren, bei dem die Lage auf dem Wasserspiegel schwimmender Tracerteilchen zeitgleich mit drei Videokameras bestimmt wird. Es wird somit zeitgleich der Wasserstand und die Oberflächengeschwindigkeit (*Henning et al. 2007*) erfasst. Das System arbeitet bei einer guten internen und äußeren Orientierung sehr genau und ermöglicht über lokale Passpunkte großflächige Aufnahmen mit Genauigkeiten bei 0,1 mm. In der Bundesanstalt für Wasserbau sind diese Systeme an mobilen Messbrücken mit einer

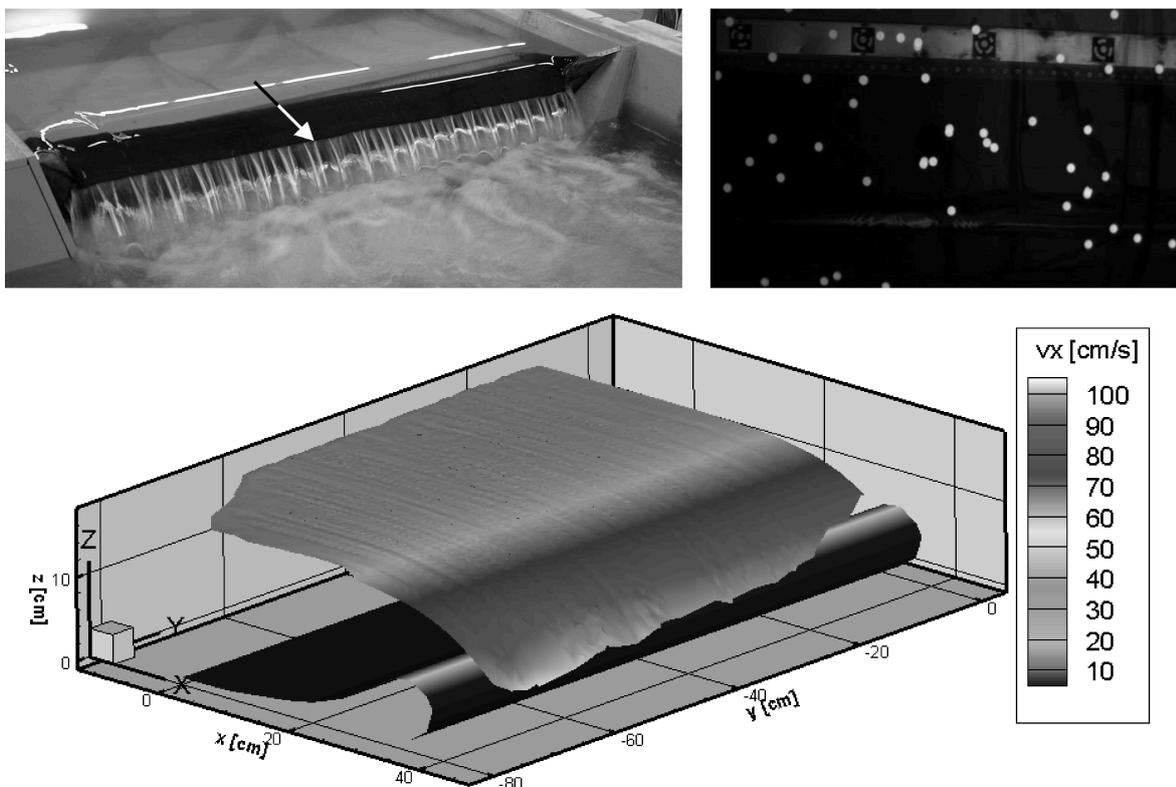


Abbildung 7: 3D-PTV eines Wehrüberfalls; überströmtes Schlauchwehr (oben links); Tracerteilchen (oben rechts); Wasserspiegel und Oberflächengeschwindigkeiten (unten)

Überdeckung von bis zu 2500 m² montiert. Jedes Einzelfeld deckt etwa 5 bis 10 m² ab.

Abbildung 7 zeigt den Abfluss über einem Schlauchwehr. Als Tracerteilchen werden hier Scheiben aus Polypropylen verwendet (Durchmesser = 20 mm, Dicke = 0,5 mm, Dichte = 0,9 g/cm³). Dieses Material weist ein sehr gutes Schwimm- und Folgeverhalten auf, ohne durch elektro-chemische Bindungskräfte zur Haufenbildung zu neigen. Nachteilig ist, dass die Messung nur dort erfolgen kann, wo auch Teilchen auf dem Wasser schwimmen. Durch räumliche Strömungsvorgänge kann es geben, an die kein Tracerteilchen gelangt. Auch Messungen in Berandungsnähe sind nicht möglich.

2.7 Laser-Lichtschnitt (RSSG Reflective stereo slope gauge)

Keines der bis hier vorgestellten Systeme ermöglicht es, an diskreten Punkten auch in Wand- oder Ufernähe instationäre Wasserstände mit einer hohen Abtastfrequenz genau und in einem sehr kleinen Messbereich zu erfassen. Daher wird derzeit vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der BAW ein neues Messsystem entwickelt (RSSG Reflective stereo slope gauge), mit dem diese Messungen möglich werden (*Mulsow et al., 2014*).

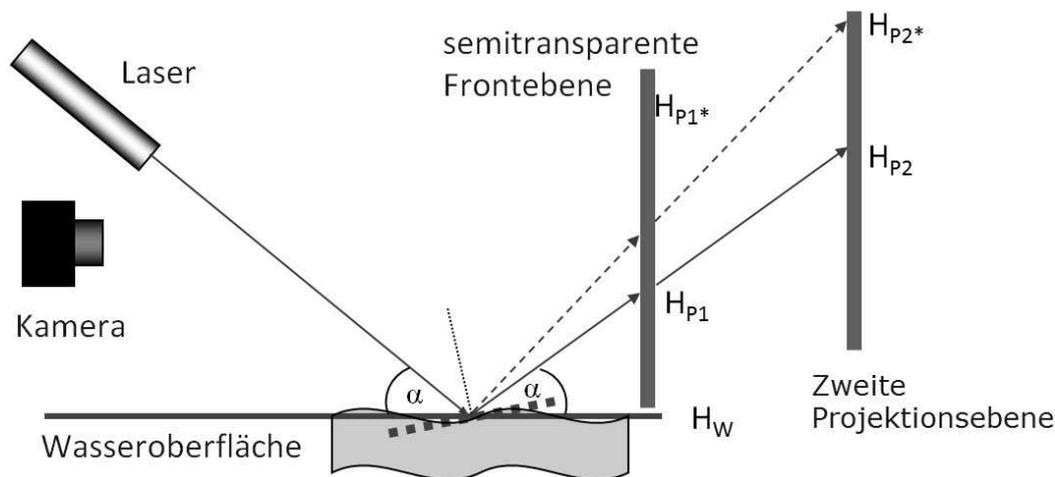


Abbildung 7: Prinzipskizze einer Laser-Lichtschnitt-Wasserstandsmessung (RSSG)

Bei dem System wird ein mit einer Zylinderlinse aufgefächerter Laserstrahl auf eine Wasseroberfläche projiziert. Die Reflexion des Laser-Lichtschnittes wird an einer semitransparenten Frontebene und an einer dahinter montierten zweiten Projektionsebene mit einer Videokamera aufgenommen. Dadurch ist die eindeutige Bestimmung des Wasserstandes und seiner Winkelformung (Eindeutige Rückverfolgung zu einem Punkt, s. Abbildung 7) an diskreten Punkten möglich. Die Bestimmung der Höhe erfolgt mit einer Genauigkeit von weniger als 0,05 mm.

3 Resümee und Ausblick

Nicht für jede Fragestellung ist jede Methode zur Messung des Wasserstandes in einem wasserbaulichen Labor gleichermaßen geeignet. Das Wissen im Detail über die Möglichkeiten und Grenzen der verfügbaren Methoden ist daher von großer Bedeutung.

Die Entwicklungen der Messtechnik und die modernen Möglichkeiten der Bildverarbeitung haben auch im wasserbaulichen Versuchswesen zu erheblichen Fortschritten in der Qualität und Quantität der erhobenen Daten geführt. Andererseits sind aber auch die Ansprüche und die Wünsche an neue Anwendungsgebiete, insbesondere bei dynamischen Vorgängen mindestens in gleichem Maß gewachsen. Auch der Wunsch nach hochwertigen Modelldaten für die Validierung und Weiterentwicklung numerischen Methoden stellt die Labortechnik vor immer neue Herausforderungen.

4 Literatur

- Eisner, F. (1932): Offene Gerinne; Handbuch der Experimentalphysik, Band IV;
DIN 4049-3 (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie
Henning, M. Sahrhage, V. Hentschel, B. (2007): 3D-PTV – Ein System zur optischen Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen, in Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr 90
Hentschel, B. (2007): Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle, in Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr 90
Morgenschweis, G. (2010): Hydrometrie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
Mulsow, Ch., Maas, H.-G., Hentschel, B. (2014): Weiterentwicklung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Bestimmung von bewegten spiegelnden Oberflächen; DGPF Tagungsband 23/2014

Autor:

Dipl.-Ing. Bernd Hentschel

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W2)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel: +49 721 9726 4640
Fax: +49 721 9726 4540
E-Mail: bernd.hentschel@baw.de