

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 85 (1993)  
**Heft:** 7-8

**Artikel:** Ausmessung von Hochgeschwindigkeits-Störungen  
**Autor:** Schwalt, Markus / Hager, Willi H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-939994>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.05.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Ausmessen von Hochgeschwindigkeits-Strömungen

Markus Schwalt und Willi H. Hager

## Zusammenfassung

Es werden hydraulische Messgeräte vorgestellt, mit denen sich besonders schnellfließende Freispiegelabflüsse ausmessen lassen. Es geht dabei einerseits um die Aufhängevorrichtung von Sonden und andererseits um die Sonden selbst zur Geschwindigkeitsmessung nach Richtung und Betrag. Anhand von Konstruktionsskizzen lassen sich die im Labor entwickelten Geräte nachbauen.

## Abstract: Measurement of high-speed open channel flows

Hydraulic probes are presented by which high-speed open channel flows in particular may be investigated. Both the suspension rod as well as the probe elements for determining the velocity by value and direction are described. Based on design sketches, the laboratory-tested probes may be reconstructed.

## Einleitung

Die hydraulische Modellforschung hat eine traditionsreiche Geschichte, sie ist heute trotz numerischer Rechenmodelle ein wichtiges Werkzeug des Laboringenieurs, da eine Vielzahl von Strömungen sich nicht oder nur umständlich durch numerische Simulation bewältigen lassen. So ist man beispielsweise im Bereich von überkritischen Kanalströmungen nach wie vor auf Messungen am physikalischen Modell angewiesen, da dort die Einflüsse von Gemischströmungen, von Stosswellen oder von Unterdrückerscheinungen sich genau und innert vernünftiger Zeit nachbilden lassen. Damit die Modellresultate aber nicht von Zusatzeinflüssen beeinflusst werden, also sogenannte *Massstabeffekte* auftreten, darf der Modellmassstab nicht zu klein gewählt werden. Andernfalls können die Resultate vom Modell auf den Prototyp nicht durch ein Modellgesetz – im vorliegenden Falle nach Froude – übertragen werden, sondern es treten verfälschende Zusatzkräfte auf. Beispielsweise wird bei Wassertiefen unter etwa 20 mm – auch bei glatter Kanalberandung wie PVC – die Viskosität des Wassers dominant, und die Reynoldszahl beeinflusst die Messungen. Entsteht ein Wasser-Luft-Gemisch durch starke Scherschichten oder Oberflächenlufteintrag, so muss die Oberflächenspannung in Rechnung gestellt werden, d.h. die Resultate variieren nicht nur mit der Froudezahl, sondern auch mit der Weberzahl.

Für jeden hydraulischen Prozess lassen sich somit Grenzwerte definieren, über denen der Abfluss nur mehr von einer Masszahl, im vorliegenden Fall also von der *Froudezahl* abhängt. Da diese Grenzwerte bei schiessendem Abfluss recht hoch sind – die Wassertiefe muss mindestens etwa 20 mm betragen – sind die Geschwindigkeiten und Drücke auch im Labor entsprechend gross.

In der vorliegenden Untersuchung soll auf die Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern in hydraulischen Modellen eingegangen werden. Es werden dabei zwei Geräte vorgestellt, die sich bei Hochgeschwindigkeitsabflüssen bewährt haben und die für einen breiteren Kreis von Ingenieuren im Wasserwesen von Interesse sein können. Die vorgestellten Geräte, eines zur Messung des Geschwindigkeitsbetrages und das andere zur Richtungser-

mittlung bei Flachwasserströmung, lassen sich anhand der beigefügten Konstruktionsskizzen nachbauen. Obwohl die Geräte für den Hochgeschwindigkeitseinsatz bis rund  $10 \text{ ms}^{-1}$  konzipiert sind, lassen sich damit auch «langsame» Strömungen ab etwa  $0,10$  bis  $0,20 \text{ ms}^{-1}$  ausmessen.

Der Aufhängung von Messsonden im Hochgeschwindigkeitsabfluss kommt eine besondere Bedeutung zu, eine Neuentwicklung soll vorerst besprochen werden.

## Messgeräteaufhängung

Ein Messgerät muss möglichst störungsfrei in eine Flüssigkeit eingetaucht werden und soll den Messwert durch eine Anzeige ablesbar angeben. Im vorliegenden Fall wird die Messsonde an eine Gerätestange aus einem industriell hergestellten Alu-Ovalprofil  $15 \times 30 \text{ mm}$  mit einer Wandstärke von 2 mm montiert. Die Gerätestange lässt sich durch die Messgeräteführung längs der Vertikalachse bewegen, und die Verbindung zwischen dem Messwagen und der Messgeräteführung wird durch die Messgerätehalterung sichergestellt.

Die *Messgerätehalterung* (Bilder 1 und 2) ist mit einer Schraubenverbindung am Messwagen montiert. Sie sieht stufenförmig aus, besitzt zwei Horizontalplatten, welche durch vier Stahlstäbe vom Durchmesser 10 mm verbunden sind. Die Oberfläche der Klemmplatte (Bild 1) befindet sich 830 mm über der Kanalsohle. Alle in die Flüssigkeit eintauchenden Geräte sind so gefertigt, dass der Kanalboden um einen Millimeter nicht berührt wird und sie so gegenüber Aufprall gesichert sind. Die Klemmplatte, in die die Messgeräteführung eingesetzt wird, soll möglichst vibrationsfrei sein. Um eine einfache Montage des jeweiligen Gerätes zu gewährleisten, besitzt die Klemmplatte einen 26 mm breiten Schlitz, durch den die Gerätestange eingefahren wird. Durch Einsetzen der Messgeräteführung in die Kreisöffnung von 80 mm Durchmesser sitzt das Gerät fest. Es lässt sich in dieser Lage um  $360^\circ$  drehen und damit nach allen beliebigen Horizontalwinkeln ausrichten. Die Winkelangabe auf der Klemmplatte dient zur Richtungseinstellung. Durch Anziehen des Klemmgriffs lässt sich die Messgeräteführung sowohl in Vertikal- als auch in Horizontalrichtung fixieren.

Die *Messgeräteführung* (Bilder 1 und 2) ist aus Aluminium, Niro-Stahl und Messing hergestellt. Sie hat ein an der Gerätestange befindliches Messgerät starr zu verankern und es möglichst vertikal resp. parallel zum jeweiligen Kanalboden zu halten. Zudem soll sie die Höheneinstellung des Geräts ermöglichen und die Höhenlage über Kanalsohle durch eine Ablesereinrichtung anzeigen. Die robuste Ausführung hat sich als notwendig erwiesen, sind doch bei früheren Bauarten Mängel hinsichtlich Verschieblichkeit, Vibrationen und Bedienungskomfort aufge-

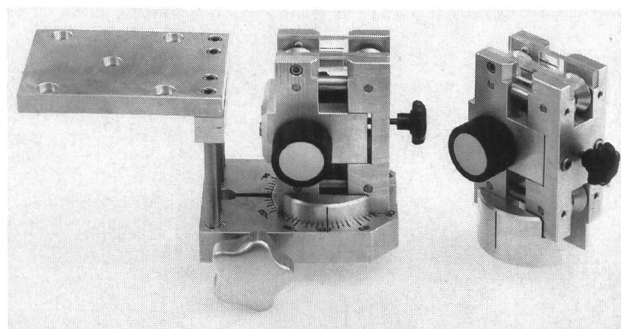


Bild 1. Messgeräteführung in Messgerätehalterung eingesetzt (links) und Schrägansicht (rechts).

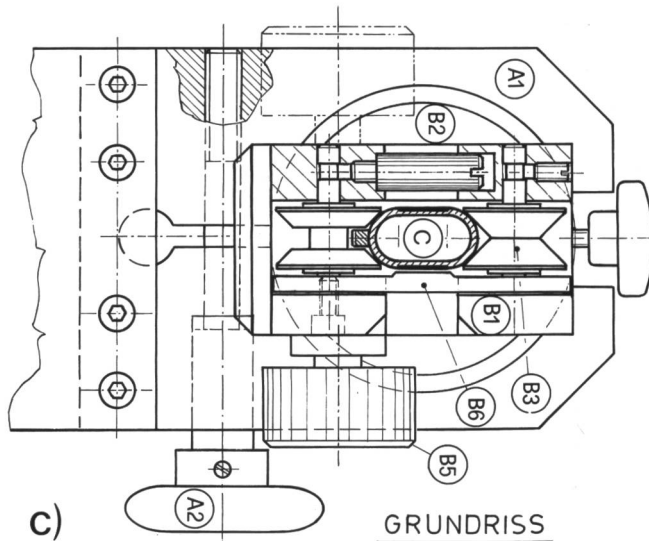
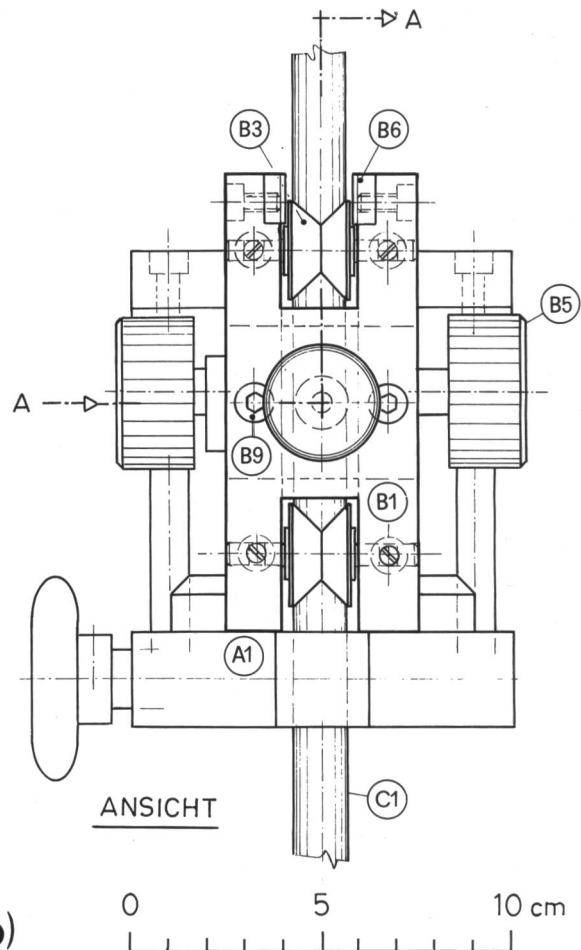
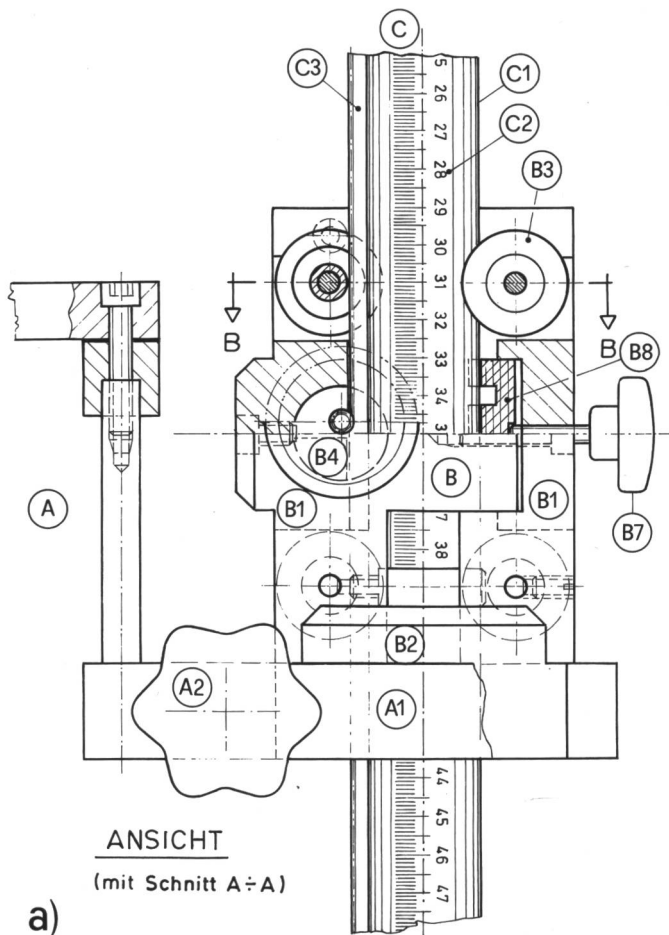


Bild 2. Messgeräteführung a) Längsansicht, b) Vorderansicht, c) Grundriss; A Messgerätehalterung, A1 Klemmplatte, A2 Klemmgriff; B Messgeräteführung, B1 Aluminiumgehäuse, B2 Aluminiumsockel, B3 Messingkeilrollen, B4 Ritzel mit Gehäuse, B5 Drehgriff, B6 Ableseeinrichtung, B7 Arretiergriff, B8 Bremsklotz, B9 Verbindungsschrauben; C Gerätestange, C1 Stangenprofil, C2 Massstab, C3 Zahnstange.

treten. Insbesondere beim Ausmessen von Strömungsfeldern soll die Lagerung in Vertikalrichtung selbsthemmend sein.

Die Messgeräteführung besteht aus einem zweiteiligen Alugehäuse, dem Alusockel, den Messingkeilrollen, dem exzentrisch gelagerten Ritzel und der Ablesevorrichtung. Der linke Gehäuseteil (Bild 2a) ist fest mit dem Sockel ver-

bunden. Die Keilrollen führen die Gerätestange über die Zahnstange in der Vertikalrichtung. Um einen optimalen Griff des Ritzels in der Zahnstange zu erreichen, ist dieses exzentrisch in einem drehbaren Niro-Stahl-Gehäuse gelagert. Die *Ablesevorrichtung* besteht aus zwei Plexiglasscheiben, die sich beidseitig vor den in die Gerätestange eingelassenen Massstäben befinden und an denen eine Ablesemarke angebracht ist. Der rechte Gehäuseteil enthält zwei weitere Keilrollen und die Stangenarretierung. Durch Drehen des Arretiergriffs wird ein PVC-Bremsklotz auf die Gerätestange gedrückt. Da die beiden Gehäuseteile gegenseitig verschraubt sind, kann durch Anziehen der Verbindungsschrauben der Keilrollendruck auf die Gerätestange verändert und auf selbsthemmende Bewegung eingestellt werden. Der gut fassbare Drehgriff zur Bewegung der Gerätestange ermöglicht ein einfaches Drehen.

### Horizontalwinkel-Messgerät

Lokale Richtungen in einem Strömungsfeld lassen sich mechanisch verschiedenartig ermitteln, so etwa:

- durch Zugabe von gefärbter Flüssigkeit kombiniert mit fotografischer Auswertung,
- Montage von kurzen, weissen Fadenstücken an dünnen Vertikalstäben über schwarzem Hintergrund,
- Auswertung von in verschiedenen Richtungen ausgeführten Pitotrohrmessungen oder
- Eintauchen von Strömungsfahnen.

Die letzte Methode soll hier beschrieben werden, da sie einige Vorteile aufweist. So etwa lässt sich der Messwert durch ein Gestänge einfach auf die Arbeitshöhe übertragen, wo er visuell als Mittelwert mit einer Schwankungs-

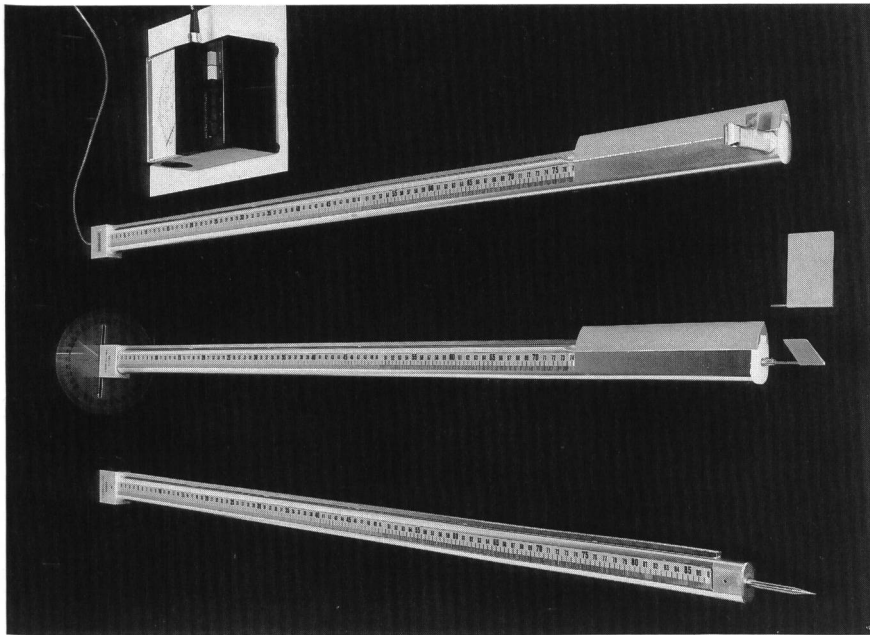


Bild 3. Messgeräte (von links nach rechts): Stechpegel, Horizontalwinkel-Messgerät und Geschwindigkeits-Messgerät mit Ablesegerät.

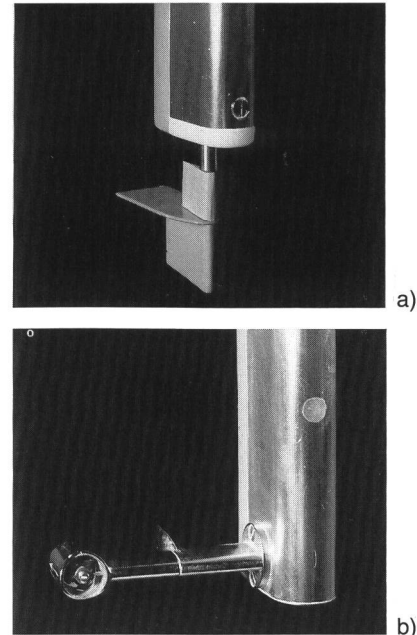


Bild 4. Spoilerelemente zur Belüftungsverhinderung beim a) Horizontalwinkel-Messgerät und b) beim Geschwindigkeits-Messgerät.

angabe oder auch elektronisch verarbeitet werden kann. Das Verfahren ist direkt, da im Gegensatz zum Pitotrohr der Messwert sich selbst einstellt und nicht über eine Anzahl von Messwerten ermittelt werden muss. Während beim Pitotrohr für eine Einzelmessung rund 10 bis 20 min benötigt werden, also eine Winkelbestimmung mit 5 Messpunkten über eine Stunde dauert, erlaubt das Prinzip der Strömungsfahne dieselbe Information innerhalb von wenigen Sekunden.

Bild 3 zeigt links einen Stechpegel, in der Mitte das Horizontalwinkel-Messgerät und rechts einen hydraulischen Flügel zur Geschwindigkeitsmessung. Diese und weitere Geräte sind durch ein strömungsgünstiges Alu-Ovalprofil 15×30 mm als *Gerätestange* montiert. Die Vertikalposition der Sonde über dem Kanalboden wird durch beidseitig montierte, in 1-mm-Nuten eingelassene Massstäbe angegeben. Die Gerätestangen besitzen an der Unterwasserseite eine Zahnstange, welche ebenfalls mit dem Aluprofil verschraubt wird. Um die Zähne der Zahnstange nicht durch Schraubenlöcher zu schwächen, wird diese von der Profilvorderseite her durch das Aluprofil hindurch befestigt. Die Gerätebaulänge beträgt einheitlich 1000 mm.

Der *Stechpegel* (Bild 3) besitzt keine beweglichen Teile und benötigt keine strömungsgünstigen Elemente, da er nicht ins Wasser eintaucht. Die sorgfältig bearbeitete Gerätespitze ist austauschbar und lässt sich verstellen, damit beim Nachspitzen der Nullpunkt wieder eingestellt werden kann.

Das *Horizontalwinkel-Messgerät* (Bild 3) ist zur Winkelanzeige mit einem fahnenähnlichen Plättchen – der *Fahne* – bestückt. Die Fahne ist am Halterungsende praktisch reibungsfrei gelagert und dreht sich selbsttätig in die Strömung. Um den jeweiligen Geschwindigkeits- und Wassertiefenverhältnissen angepasst zu sein, liegen Fahnen mit Bauhöhen von 19 und 38 mm vor (Bild 3). Als vernünftiges Verhältnis von Länge zu Höhe hat sich 3:5 herausgestellt.

Die lokale Fliessrichtung wird durch die drehbare Vertikalachse im Innern der Halterungstange mechanisch an den Gerätekopf auf einen Winkelmessgerät mit 360°-Anzei-

ge übertragen. Die kreisrunde Winkelanzeige hat einen Durchmesser von 130 mm und lässt sich auf  $\pm 0,5^\circ$  genau in die Richtung der Kanalachse einmessen. Die Genauigkeit der Winkelablesung liegt ebenfalls bei  $\pm 0,5^\circ$ , so dass sich ein Strömungswinkel mit etwa  $\pm 1^\circ$  genau ermitteln lässt. Da die Übertragung unmittelbar ist, kann auch ein Mass der Strömungs-Turbulenz aus der Anzeigebewegung abgelesen werden, so etwa:

- kann sich die Anzeige bewegungslos auf einen Winkel einstellen oder
- lassen sich leichte und frequenzintensive Vibrationen um einen mittleren Winkelwert herum wahrnehmen oder
- bewegt sich die Anzeige um den Mittelwert herum, führt aber abrupte Schwankungen aus oder schliesslich
- ist ein Mittelwert überhaupt nicht auszumachen, da die Anzeige völlig zufällige Werte über den gesamten Bereich angibt.

Beim ersten Fall herrscht eine stabile Strömung, etwa bei beschleunigtem Abfluss oder in schießendem Flachwasserabfluss; beim Fall zwei kann es sich um Strömungen mit stark gekrümmten Stromlinien nahe der Wand handeln, wo beachtliche Geschwindigkeitsgradienten auftreten; beim Fall drei liegt etwa ein Wassersprung vor, und beim Fall vier befindet man sich in einer stark durchströmten Ablösezone. Durch das mechanische Messgerät lässt sich kein Rückschluss auf die turbulente Strömung als Messgrösse wie bei Lasergeräten ziehen, den qualitativen Strömungscharakter kann man jedoch sehr wohl erfahren.

Die Fahne selbst hat einen symmetrischen Querschnitt von der Stärke 2 mm. Die Vorderseite ist kreisförmig ausgerundet und die daran tangential anschliessenden Seitenflächen vereinen sich gegen das Ende hin spitz. Diese Form hat sich als strömungsgünstig herausgestellt, und Einflüsse von der Halterungstange her sind nicht festgestellt worden. Die Fahne sollte infolge der Oberflächenspannung immer vollständig ins Wasser untergetaucht sein. Die minimale Geschwindigkeit, bei der die grössere

Fahne noch verlässlich anspricht, beträgt rund  $0,20 \text{ ms}^{-1}$ .

Die *Fahnenbefestigung* an der Halterungsstange ist besonders sorgfältig ausgebildet, da die Fahnen austauschbar sind. Die für die Befestigung an der beweglichen Vertikalachse notwendigen Schrauben sind versenkt ausgeführt. Beim Fahnen austausch muss die Nullage durch entsprechendes Drehen der Schrauben eingestellt werden. Dazu wird die Fahne bei schwach angezogenen Schrauben längs der Kanalwand gebracht und dort manuell die Nullrichtung der Ableseskala mit der Fahnenachse in Deckung gebracht. Mit ein bisschen Fingerspitzengefühl lässt sich die Nullage auf  $\pm 0,5^\circ$  genau justieren.

Bei hoher Geschwindigkeit ab rund  $3 \text{ ms}^{-1}$  treten unangenehme Begleiterscheinungen auf, falls die Fahne nicht tief ins Wasser eingetaucht ist. Da dann die Strömung sich an der Halterungsstange ablöst, also im abgelösten Bereich *Unterdruck* entsteht, dringt Luft von der Atmosphäre über den Nachlauf in diese Zone vor und verfälscht die Ablesung durch Belüftung einer Fahnen Seite. Um die Störung durch die massive Gerätestange zu reduzieren, ist deren Rückseite über eine Länge von 200 mm mit einer aus PVC gefertigten *Ablösekannte* ausgeführt (Bild 3). Dadurch kann die Gerätestange zwar nicht mehr vollständig in die Messgeräteführung eingezogen werden, was aber auch kaum nötig ist, da der Kanal bei Hochgeschwindigkeitsabfluss nie so hoch gefüllt ist. Die exakte Ablösegeometrie im Bodenbereich ist von *Hager und Bretz* (1986) beschrieben worden.

Neu an der modifizierten Ausführung ist aber auch ein Fahnen Schutz selbst. Beträgt nämlich die Geschwindigkeit mehr als rund  $3 \text{ ms}^{-1}$ , so ist das Wasser im Modell häufig nur 30 bis 50 mm tief, d. h. die Ablösekannte taucht bei oberflächennahen Messungen schon gar nicht in den Abfluss. Wie bei der Gerätestange treten hinter dem halb kreisförmigen Fahnenfrontbereich auch Unterdrücke auf, die zur einseitigen Belüftung der Fahne führen. Dabei stellt sich die Fahne eindeutig quer mit der in die Strömung gerichteten Fahnen Seite benetzt, während die andere Fahnen Seite «trocken» und damit vollständig belüftet ist. Dadurch lässt sich der Horizontalwinkel nicht mehr ungestört ermitteln.

Um diesem Missstand abzu helfen, muss der Luftweg von der Atmosphäre zu Fahne unterbrochen werden. Nach vielen Versuchen hat sich die folgende Modifikation als einfach und effektiv herausgestellt (Bild 4a): Zwischen dem Ende der Gerätestange und der Messfahne werden an der Achse eine Leitfahne und ein *Spoilerelement* frei beweglich aufgehängt. Die Leitfahne sorgt für eine Vororientierung der Messfahne, während das Spoilerelement, welches vorne die Form einer Halbellipse hat und hinten abrupt endet, eventuelle Luftblasen gar nicht zur Messfahne gelangen lässt, sondern sie direkt ins Unterwasser ableitet. Damit lässt sich der Messbereich des Horizontalwinkel-Messgerätes ohne Probleme bis zu etwa  $10 \text{ ms}^{-1}$  ausdehnen. Darüber sind keine Messungen angestellt worden, die Fahnen aufhängung dürfte dann jedoch zu schwach bemessen sein.

In Bild 4b ist dasselbe Prinzip auch mit Erfolg auf die *Geschwindigkeitssonde* übertragen worden. Mit beiden Geräten lassen sich somit Strömungen mit hoher Geschwindigkeit bis praktisch an die freie Oberfläche messen. Die Strömung wird dabei kaum aufgerissen, und es entsteht bei hoher Geschwindigkeit ein Ton, der demjenigen von einem schnell drehenden Windrädchen ähnelt. Bereits kurz unterstrom der Winkelmessung könnte also simultan eine zweite Messung ohne bedeutende Störung vorgenommen werden.

Die Spoilerelemente, die für die Hochgeschwindigkeitsströmung entwickelt worden sind, haben keine nachteiligen Folgen beim Einsatz in Strömungen mit kleiner Geschwindigkeit gezeigt. Die Modifikationen lassen sich damit ohne Nachteile in bestehende Geräte einbauen. Sowohl das Horizontalwinkel-Messgerät als auch das Geschwindigkeits-Messgerät ergeben dadurch bei den im Labor üblich vorkommenden Wassertiefen und Geschwindigkeiten ausgezeichnete Resultate.

### Gesamtdrucksonde

Geschwindigkeiten im offenen Laborkanal lassen sich vernünftig bis etwa  $5 \text{ ms}^{-1}$  mit hydraulischen Flügeln ermitteln, darüber wären wohl Geräte vorhanden, die Störungen auf den Freispiegelabfluss sind jedoch zu gross. Wie bereits erwähnt, wird dann bei kleinen Wassertiefen bis 100 mm die Wasseroberfläche aufgerissen und durch Luft eintrag der Gegendruck auf die Sonde verändert. Die entsprechende Geschwindigkeitsmessung ist dann fehlerbehaftet. Ab rund  $5 \text{ ms}^{-1}$  bewegt sich der Freispiegelabfluss auch häufig als Wasser-Luft-Gemisch, d. h. es handelt sich dann nicht mehr um einen Reinwasser-, sondern um einen *Gemischabfluss*. Da ein Messflügel recht empfindlich auf diesen reagiert, wird grundsätzlich eine zu tiefe Geschwindigkeit angezeigt. In der Folge soll die Gesamtdrucksonde vorgestellt werden, die speziell auf Hochgeschwindigkeitsabfluss ausgelegt ist und mit der sich Geschwindigkeitsfelder arbeitsmässig etwa gleich schnell wie mit dem hydraulischen Flügel aufnehmen lassen.

Das Gerät funktioniert wie ein *Pitotrohr*. Es hat einen L-förmigen Aufbau mit einem 50 mm langen Rohr vom Innendurchmesser 4 mm. Wahlweise lässt sich auch eine 100 mm lange Messspitze einschrauben. Das üblicherweise parallel zur Kanalsole montierte Messrohr wird von einem Schaft gehalten und verbindet es mit einem Standrohr, das gleichzeitig als Gerätestange dient (Bild 5a). Beim Übergang vom Pitotrohr zur Gerätestange befindet sich ein massives *Umlenkelement* aus Aluminium (Bild 5b), das eine minimale Strömungsstörung sicherstellt. Im Querschnitt ist das Umlenkelement ähnlich einem symmetrischen Flugzeugtragflügel, also im Frontbereich halbelliptisch und im Heckbereich dreieckig zuge-

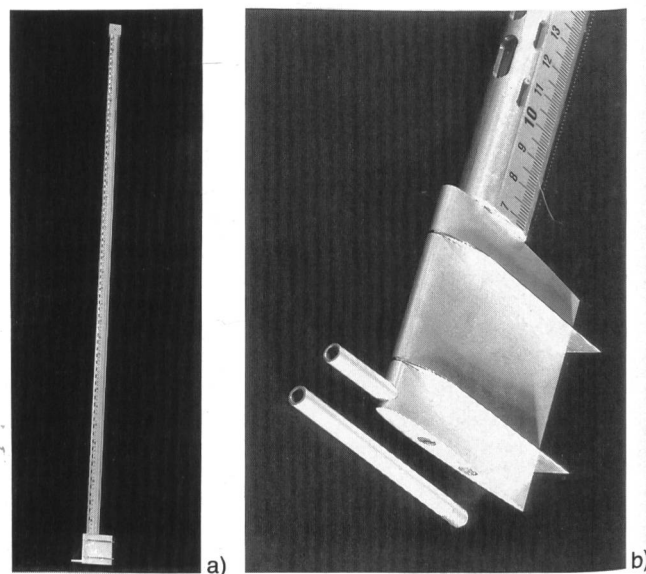


Bild 5. Gesamtdrucksonde a) Ansicht, b) Messsonde mit langer Messspitze.

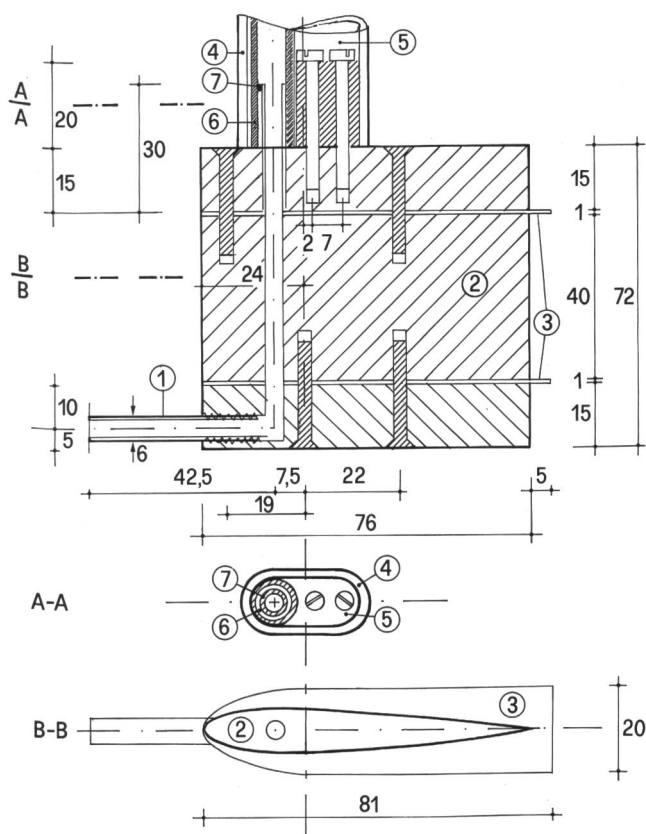


Bild 6. Umlenkelement für Gesamtdrucksonde; 1 Messspitze, 2 Umlenkelement, 3 Spoilerelement, 4 Gerätestange, 5 Schaft, 6 Standrohr, 7 Dichtung; Masse in mm.

spitzt. Damit sollen wie beim Richtungsmessgerät die vorteilhafte Umströmung des Fluids und die minimale Unterdruckbildung sichergestellt werden. Weiter sind zur Verhinderung von Lufteintrag zwei Spoilerlängselemente als 1 mm dünne Bleche in das Umlenkelement eingezogen. Wie sich aus umfangreichen Messungen ergeben hat, lässt sich dieses Gerät in die Strömung eintauchen, ohne dass Luft bis zum Sondenkopf vordringt resp. das Unterwasser stört.

Bild 6 zeigt Konstruktionsskizzen des Umlenkelementes. Die Gesamtlänge beträgt 76 mm, die Gesamthöhe 72 mm und die Baubreite 20 mm. Obwohl das Element etwas klotzig wirkt, verhält es sich äusserst vorteilhaft in der Strömung. Es treten keine Unterdruck anzeigenden Schlurfgeräusche auf, sondern die bereits erwähnten singenden Töne lassen sich wahrnehmen.

Bis heute liegen zwei Typen von Gesamtdrucksonden vor. Die erste ist einem klassischen Pitotrohr nachgebildet, der herrschende Gesamtdruck wird also direkt als Druckhöhe in der Gerätestange angezeigt. Um die Druckhöhe einfach abzulesen, ist die Halterungssange durch drei Reihen von Langlöchern der Länge 15 bzw. 10 mm aufgefärs. Da diese Öffnungen höhenmässig versetzt sind, kann jeder beliebige Piezometerstand visuell am beidseits montierten Massstab abgelesen werden. Weiter sind bei Hochgeschwindigkeitsströmungen die Stromlinien meist praktisch parallel, d.h. es herrscht hydrostatische Druckverteilung. Die Geschwindigkeitshöhe ergibt sich demnach durch Subtraktion der Eintauchtiefe  $z$  von der Piezometerablesung  $H$  und als lokale Geschwindigkeit folgt  $V = [2g(H - z)]^{1/2}$ . Mit einer Baulänge von 1600 mm lässt sich maximal  $5,5 \text{ ms}^{-1}$  Geschwindigkeit ab-

lesen, bei höherer Geschwindigkeit läuft Wasser aus dem Rohrende über.

Da die Druckhöhe quadratisch mit der Geschwindigkeitshöhe zunimmt, also etwa ein 3 m langes Rohr «nur» auf eine Maximalgeschwindigkeit von knapp  $8 \text{ ms}^{-1}$  führen würde, und für  $10 \text{ ms}^{-1}$  ein über 5 m langes Piezometerrohr nötig wäre, wird in diesem Bereich anders gearbeitet. Für Geschwindigkeiten ab  $5 \text{ ms}^{-1}$  wird dasselbe Geräteprinzip, nun aber auf die Standardbaulänge von 1000 mm verkürzt und der Gesamtdruck durch eine Drucksonde gemessen. Die kalibrierte Druckanzeige wird über ein Netzgerät mit  $\pm 15 \text{ V}$  gespeist. Durch Umrechnung lässt sich daraus die lokale Geschwindigkeit einfach berechnen.

Zwischen dem Piezometer und der Drucksonde befindet sich ein T-förmig angeschlossener Absperrhahn, an welchem eine Gummi-Handpumpe angehängt ist (Bild 7). Durch *Einpumpen von Luft* in das Piezometer wird alles Wasser vorerst aus ihm ausgeblasen, dann kann sich nach Schliessen des Absperrhahns im Alurohr der dem Zufluss entsprechende Luftdruck aufbauen. Beim Ausblasen des Wassers aus dem Piezometerrohr muss auf den Luftblasenausstritt geachtet werden. Soll also eine lokale Geschwindigkeit gemessen werden, so ist das Gerät in die Halterung zu bringen, das Druckanzeigergerät mit Netzgerät daran anzuschliessen und der Messwagen über den Messpunkt zu bringen. Anschliessend werden die drei Lagekoordinaten eingestellt, die Geschwindigkeitssonde in Stromlinienrichtung eingestellt und dann die Luft aus dem Alurohr ausgeblasen. Innerhalb von 5 Sekunden hat sich der lokale Strömungsdruck im Alurohr aufgebaut und der Druck kann am Anzeigergerät abgelesen werden.

Das modifizierte Gesamtdruck-Messgerät hat sich als äusserst robust ausgezeichnet, es ist frei von störenden Vibrationen, lässt sich auch bei hohen Geschwindigkeiten problemlos in der Strömung verschieben und löst ebenfalls nur eine geringe Unterwasserstörung aus. Insbesondere ist jedoch festzuhalten, dass die Messung äusserst unempfindlich auf leichte Schiefstellung reagiert. Dies wäre keinesfalls so mit einem Prandtlrohr, welches noch seitliche Druckanbohrungen für die statische Druckmessung aufweist. Letzteres ist bei Hochgeschwindigkeitsströmungen aber kaum relevant, da die Wassertiefe und Sohldruckmessungen Aufschluss über die Druckverteilung vermitteln.

Liegt ein Abfluss mit bedeutender Turbulenz vor, der eine einfache Messung der mittleren Geschwindigkeit erschwert, so hat sich die folgende *Piezometerdämpfung* als effektiv herausgestellt: Über die Öffnung des Messrohres wird ein handelsübliches Scotch Magic™ Klebeband gestülpt und durch eine Rasierklinge aufgeschlitzt. Der Schlitz wirkt dann wie eine Membran, und der Piezometerspiegel bleibt praktisch bewegungslos. Natürlich benötigt diese Dämpfungseinrichtung ein wenig mehr Füllzeit, dafür ist eine schwingungsfreie Ablesung gewährleistet.

## Schlussfolgerungen

Beim Ausmessen von Hochgeschwindigkeitsströmungen im hydraulischen Labor treten verschiedene Messprobleme auf, die sich nur mittels ausgefeilter Messtechnik meistern lassen. Die vorliegende Arbeit versucht zu zeigen, dass nicht nur hohe Ansprüche an die Messsonden zu stellen sind, sondern auch deren Halterung und Aufhängung besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Die Konstruktionsskizzen erlauben den Nachbau der unter verschiedenen Bedingungen getesteten Geräte, und Hin-

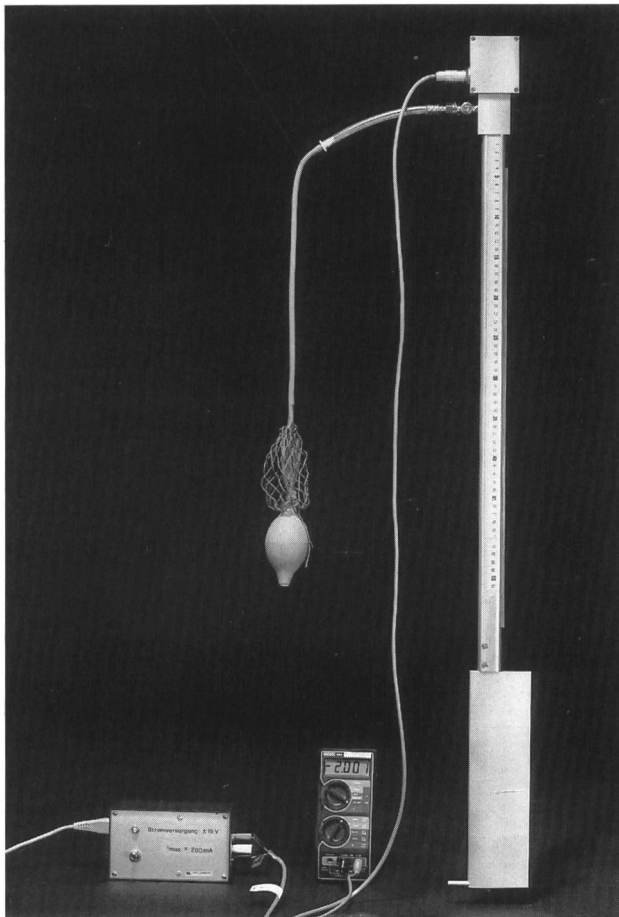


Bild 7. Gesamtdrucksonde mit Gegendruckelement; a) Messsonde, b) Gerätekopf.

weise auf die labormässige Anwendung sollten den einfachen und zeitsparenden Geräteeinsatz bewerkstelligen. Interessant dürfte sein, dass sich die vorliegenden Geräte nicht ausschliesslich auf Hochgeschwindigkeitsströmungen anwenden, sondern gleichfalls bei üblichen Geschwindigkeiten ohne Nachteile einsetzen lassen.

#### Verdankungen

Die Firma Schiltknecht AG, Gossau ZH, hat den hydraulischen Flügel (Mikro-Mini-Water, Typ 661/5S-110) für die Geschwindigkeitsmessung, den Stechpegel und das Horizontalwinkel-Messgerät geliefert und die in Bild 4b gezeigte Geschwindigkeitssonde gebaut. Wir möchten uns bei Mathis Bolleter für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Die Ausführung der übrigen Geräte verdanken wir den Mechanikern der institutseigenen Werkstatt Rolf Meier und Andreas Haas. Die Messgeräteführung ist von Chrispin Bucher, VAW, konzipiert worden.

#### Literaturnachweis

Hager, W. H., und Bretz, N. V. (1986). Geschwindigkeitsmessung unter beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fließgeschwindigkeit. «wasser, energie, luft» 78 (10): 272–276.

Adresse der Verfasser: Dipl. Ing. Markus Schwalt und Dr. Willi H. Hager, dipl. Bauing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

## Fugenabdichtungen

### in Schutzbauten für wassergefährdende Stoffe

Matthias Dietrich

Um Schwachstellen zu vermeiden, werden Schutzbauten für wassergefährdende Stoffe, wie beispielsweise Auffangwannen aus Beton, möglichst fugenlos ausgeführt. Trotzdem treten immer wieder Situationen auf, bei denen eine Fugenabdichtung unumgänglich wird, sei es zur Sanierung älterer Bauwerke oder bei der Abdichtung undichter Arbeitsfugen, Anschlussfugen oder sogar durchgehender Risse. In diesen Fällen sind die möglichen Belastungen sorgfältig zu analysieren, um das bestgeeignete Abdichtungssystem in Zusammenarbeit aller Beteiligten zu eruieren.

### Einleitung

Das Bewusstsein um den Schutz der Umwelt vor wassergefährdenden Stoffen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Zu dieser Sensibilisierung haben vor allem vereinzelte, aber durch ihre katastrophalen Auswirkungen bekannt gewordene Unfälle viel beigetragen.

Schutzbauwerke mit besonderen Sicherheitsbestimmungen werden schon seit vielen Jahren für das Lagern und den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vorgeschrieben, beispielsweise für Heizöl- und Treibstofftanks.

Durch das gestiegene Sicherheitsbedürfnis werden weitere Schutzbauten ausgeführt, die nicht ständig, sondern nur im Gefahrfall ein Austreten von wassergefährdenden Flüssigkeiten sicher verhindern müssen.

Diese Anlagen vollständig fugenlos auszuführen ist aus konstruktiven Gründen nicht immer möglich. Es entstehen Arbeitsfugen, wenn der Betoniervorgang unterbrochen werden muss. Ein typisches Beispiel ist die Arbeitsfuge zwischen Sohle und Wänden einer Auffangwanne. Bewegungsfugen müssen angeordnet werden zum Ausgleich von Volumenänderungen des Betons, die z. B. durch Temperaturschwankungen hervorgerufen werden. Ein weiterer wichtiger Fugentyp sind die Anschlussfugen zwischen zwei verschiedenen oder gleichen Materialien bzw. Bauteilen, beispielsweise die Anschlussfuge zwischen dem Ringfundament und dem Stehtank (Bild 1), oder die Anschlussfuge zwischen Laminatende und Abschlusswinkeleisen (Bild 2). Bei Fugenabdichtungen auf Beschichtungen von Auffangwannen ist bereits im Planungsstadium auf die Verträglichkeit zwischen Beschichtung und Dichtstoff Rücksicht zu nehmen (Bilder 2 und 3).

### Chemikalienbeständigkeit

Zur Abdichtung von Fugen werden zumeist sogenannte Elastomere verwendet, das heisst Kunststoffe, die sich bei Krafteinwirkung verformen lassen und beim Entfernen der einwirkenden Kraft wieder selbständig in ihre ursprüngliche Form zurückgehen.

Werden Kunststoffe durch die Einwirkung von Chemikalien belastet, können folgende Vorgänge ablaufen:

#### Absorption

Die Chemikalien können vom Kunststoff absorbiert werden, was sich durch eine Volumenzunahme (Quellen) bemerkbar macht. Da die Elastomere eine vernetzte Struktur aufweisen, ist die Quellung begrenzt, sie erreicht einen Grenzwert und ändert sich dann nicht mehr.