

Conference Paper, Published Version

Gierra, Tobias

Messung der Eigenschaften freier Wasserstrahlen in Luft

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/20.500.11970/103369>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gierra, Tobias (2015): Messung der Eigenschaften freier Wasserstrahlen in Luft. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 89-98.

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.



Messung der Eigenschaften freier Wasserstrahlen in Luft

Tobias Gierra

Die numerische Simulation freier Wasserstrahlen in Luft unter Berücksichtigung der charakteristischen Prozesse Lufteinmischung und Strahlauflösung gestaltet sich mit den gegenwärtig verbreiteten Methoden auch im Bereich der 3D-HN-Simulation schwierig. Zumeist müssen analytische Modelle als Hilfsmittel eingesetzt werden, um mit vertretbarem Aufwand Ergebnisse zu generieren. Zur Kalibrierung und Validierung geeigneter Hilfsmodelle sind aber zunächst Messdaten erforderlich.

In diesem Beitrag wird die Messung der Eigenschaften freier Wasserstrahlen (Geschwindigkeits- und Luftgehaltsverteilung, Kernzone, Strahlaufweitung und -verlauf) mittels Druckmessungen mit einem Pitot-Rohr, Leitfähigkeitsmessungen mit einer Doppelsonde sowie Hochgeschwindigkeitsfotographie beschrieben. Dabei wird auf die Entwicklung einer robusten Leitfähigkeitssonde, welche sich zwar eines bekannten Messprinzips bedient, beim Anwendungsfall Freistrahle jedoch der besonderen Beanspruchung des Strahldrucks widerstehen muss, die Auswertemethodik sowie den Vergleich mit vorhandenen analytischen Ansätzen zur Beschreibung von Wasserstrahlen eingegangen.

Stichworte: Freistrahle, Leitfähigkeitssonde, Luftgehalt

1 Einleitung

Unter dem Begriff Freistrahle soll in diesem Beitrag ein turbulenter Wasserstrahl verstanden werden, der horizontal aus einer kreisrunden Öffnung ohne Einfluss seitlicher Begrenzungen in ein ruhendes, homogenes und isothermes Umgebungsmedium, in diesem Fall Luft, eintritt. Diese Strahlform ist im Wasserbau unter anderem bei frei ausmündenden Grundablässen und Schussrinnen oder auch bei Peltonturbinen anzutreffen.

Bei der Betrachtung des Freistrahls müssen sowohl die Wasser- als auch die Luftphase (Zweiphasenströmung) berücksichtigt werden. Beide interagieren an der Phasengrenze, die zumeist als freie Oberfläche bezeichnet wird. Durch die freie Turbulenz am Außenradius des Strahls kommt es zu einer Diffusionszone (Kraatz, 1989), in der die kinetische Energie des Strahls abgebaut wird. Dieser Vorgang ist mit einer Beschleunigung des Umgebungsmediums und einem

Zerfall des gesamten Strahls, das heißt, mit einer Durchmischung mit dem Umgebungsmedium, verbunden (Abbildung 1). Die mitgerissene und eingemischte Luft verändert die Eigenschaften der Strömung, insbesondere die mittlere Dichte und Kompressibilität und damit ihre turbulente Struktur. Je nach Anwendungsgebiet ist dieser Zerfall gewünscht (z. B. zur Energiedissipation) oder unerwünscht (z. B. zur Energienutzung). Eine Vorhersage des Strahlverhaltens ist aufgrund der komplexen Modellbildung schwierig und bedingt die Kenntnis von Strömungsparametern aus Referenzmessungen. Bisherige experimentelle Untersuchungen von selbstbelüfteten Strömungsvorgängen wurden vor allem für (Treppen-)Schussrinnen, Wechselsprünge oder Tauchstrahlen durchgeführt. Die Untersuchung freier Wasserstrahlen soll in diesem Beitrag thematisiert werden.

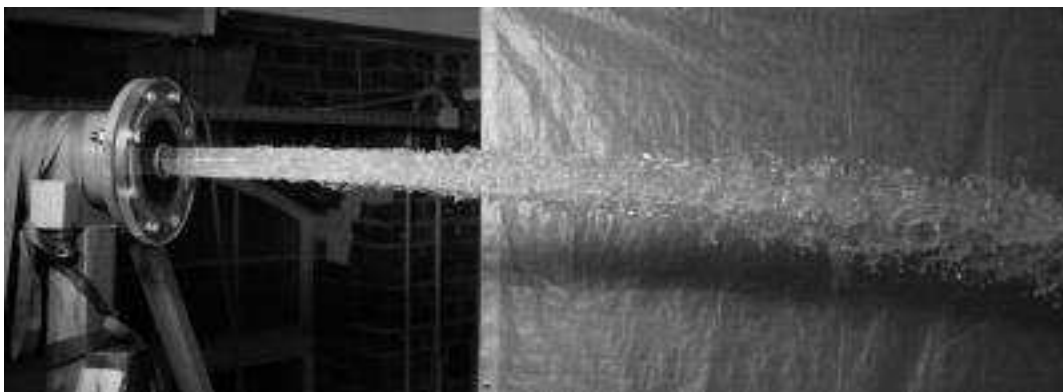


Abbildung 1: Freier Wasserstrahl in Luft im Huber-Engels-Labor der TU Dresden

2 Freistrahlen

2.1 Eigenschaften

Aufgrund des großen Dichteunterschiedes zwischen dem Wasser des Strahls und der umgebenden Luft ist der Freistrahл unmittelbar nach dem Austritt durch Abtrieb beeinflusst und folgt der Richtung der Gravitation auf einer parabelähnlichen Wurfbahn. Die Druckverteilung im Freistrahл kann entsprechend der Grenzschichttheorie als einheitlich und gleich dem Umgebungsdruck angenommen werden. Die vor dem Austritt vorhandene Druckverteilung einer Rohrströmung, wird am Beginn des Freistrahls in kinetische Energie umgewandelt, wodurch sich der Strahl leicht einschnürt. Zusätzlich gibt es eine Kontraktion seines Querschnitts durch die Verengung der Fließfläche an einer Austrittsblende. Die bereits vor dem Strahlaustritt vorhandene Turbulenz nimmt auf Grund der hydrodynamischen und aerodynamischen Prozesse zu und die Radien der Oberflächenwellen am Strahlrand werden größer. Übersteigt die kinetische Energie der Turbulenzballen die Oberflächenspannung zwischen Wasser und

Luft, beginnt der Zerfall des Freistrahls (Ervin und Falvey, 1987). Der unbelüftete Bereich des Freistrahls geht hier in den teilweise belüfteten Bereich über. Der Strahlzerfall ist durch das Herauslösen von Wassertropfen aus dem Strahl und den Eintrag von Luftblasen in den Strahl gekennzeichnet. Dies wird teilweise als eine Art Oberflächenbelüftung verstanden. Falvey (1980) weist aber darauf hin, dass der Prozess vor allem durch die Turbulenz des Strahls (turbulente Diffusion) und nur sekundär durch die Interaktion mit dem Umgebungsmedium beeinflusst wird.

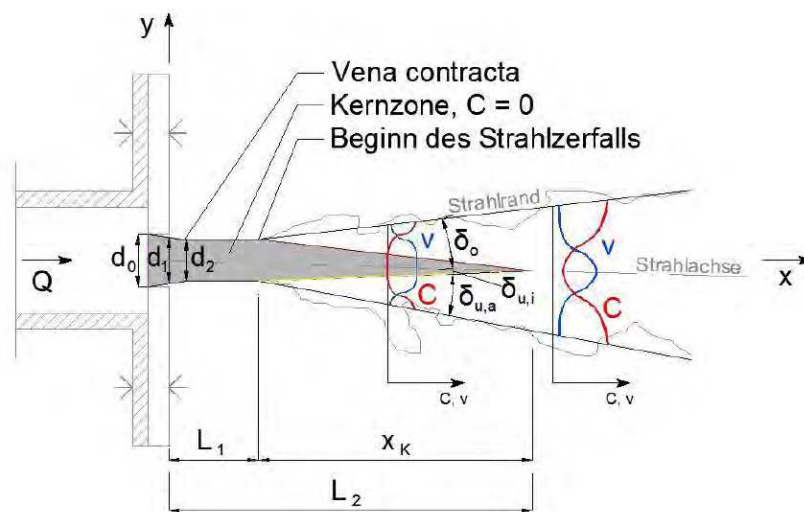


Abbildung 2: Definitionen am Querschnitt eines Freistrahls (Mühle 2013b)

In Untersuchungen zur Strahlauflösung stellte Ohnesorge (1936) fest, dass sich die Art des Zerfalls mit Hilfe der Weberschen und Reynoldsschen Ähnlichkeitsgesetze beschreiben und in verschiedene Bereiche unterteilen lässt. Hierfür bildete er eine dimensionslose Kennzahl Z (1) in die alle den Strahl bestimmenden Eigenschaften eingehen. Für niedrigen Reynoldszahlen wurde damit der Bereich des Zertropfens von laminaren Strahlen begrenzt, an den erst der Bereich des Zerwellens durch ein axialsymmetrisches Schwingen und abschließend der Bereich des Zerstäubens (Atomisieren) anschließt (Abbildung 3). Alle untersuchten Freistrahlen lassen sich nach Ohnesorge als zerstäubende Strahlen klassifizieren. Dabei sind die entstehenden Tropfen umso feiner, je höher die Weber- und Reynoldszahlen sind.

$$Z = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{v \cdot \sqrt{\frac{d \cdot \rho_w}{\sigma}}}{\frac{v \cdot d \cdot \rho_w}{\eta}} = \frac{\eta}{\sqrt{d \cdot \rho_w \cdot \sigma}} \quad (1)$$

Eine weitere Einteilung des Strahlfalls, die sich an den zur Verfügung stehenden Modellansätzen orientiert, ist die Unterscheidung in primären und sekundären

Strahlzerfall. Der primäre Strahlzerfall beschreibt das Aufbrechen des Strahls aufgrund von Störungen seiner Oberfläche sowie das Herauslösen von Wassertropfen aus dieser. Dabei sind die Einflussfaktoren vor allem Viskosität, Oberflächenspannung und aerodynamische Kräfte. Der sekundäre Zerfall umfasst den Zerfall der Wassertropfen bis zu einer stabilen Größe unter dem Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den Tropfen und aerodynamischer Kräfte, denen die Oberflächenspannung und die Viskosität stabilisierend entgegenstehen.

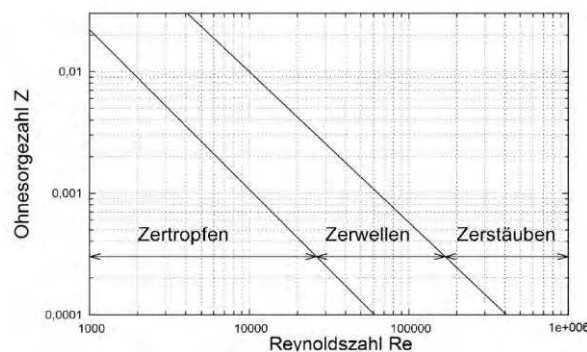


Abbildung 3: Ohnesorge-Diagramm (Mühle 2013b)

Der Zerfall des Strahls beginnt gemäß Abbildung 2 an der freien Oberfläche nach einer vorderen Aufbruchlänge L_1 und setzt sich mit einem theoretischen Auswitungswinkel δ , welcher zusätzlich in einen inneren (δ_i) und äußeren (δ_a) Winkel unterschieden werden kann, zur Strahlachse fort. Dabei beschreibt die Kernzone bei kreisrunden Strahlen einen paraboloidförmigen Bereich, in dem die Austrittseigenschaften (Geschwindigkeit, Luftgehalt) des Strahls nahezu bestehen bleiben. Sie endet nach der hinteren Aufbruchlänge L_2 , wo auch an der Strahlachse eine Belüftung festgestellt werden kann.

Charakteristisch für den zerfallenden Wasserstrahl in Luft sind eine Zunahme des Luftgehalts, eine Abnahme der Strahlgeschwindigkeit, seine Aufweitung und ein Energieabbau. Zu seiner Beschreibung können die Art seines Zerfalls, die Aufweitungswinkel des Strahlrandes, die Länge und Form der Kernzone, der Strahlverlauf, die dreidimensionale Geschwindigkeits- und Luftkonzentrationsverteilung sowie die Entwicklung der Tropfengrößen verwendet werden.

2.2 Analytische Betrachtung

Für den Verlauf der Strahlbahn und somit auch für seine Wurfweite gibt es noch keinen erprobten analytischen Ansatz. Die Länge der Kernzone wird nach verschiedenen Ansätzen und Untersuchungen mit ca. $x_k \approx 50 \cdot d_0$ angegeben. Die sich ausbildenden Geschwindigkeitsprofile entlang der Strahlachse können mit der speziellen Funktion für das Normalverteilungsgesetz der Beobachtungsfehler erfasst werden, welche angibt, wie sich die Fehler eines Messresultats um

den Mittelwert gruppieren. Nach Kraatz (1989) kann dafür im Bereich des vollständig belüfteten Strahls Gleichung (2) verwendet werden.

$$v_{x,y} = \frac{x_K}{x} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{2} \cdot x_K \cdot y}{d_0 \cdot x}\right)^2} \cdot v_0 \quad (2)$$

Neben der Geschwindigkeit ist die Luftkonzentration ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung des Freistrahls. Die Luftkonzentration C_L (3) wird als das Volumen der Luft (V_L) innerhalb des Volumens der Mischung aus Wasser (V_W) und Luft definiert. Bei einer Konzentration von $C_L = 0,9$ wird die freie Oberfläche des Strahls definiert. Dieser Wert wird mit der hohen Homogenität des Luft-Wasser-Gemisches für Werte niedriger als $C_L = 0,9$ verbunden. Über 90 % ist die Geschwindigkeit der Luft nicht mehr gleich der Geschwindigkeit des Wassers und Messungen der Luftkonzentration werden ungenau.

$$C_L = \frac{V_L}{V_L + V_W} \quad (3)$$

Chanson (1996) leitete aus der Kontinuitätsgleichung für Luft eine Formel (4) zur Bestimmung der Luftkonzentrationsverteilung an einer Stelle $x \gg 0$ im Strahl mit annähernd stationärer Strömung her, welche verschiedene Bessel-Funktionen erster Gattung (J_0, J_1) und deren Nullstellen α_n verwendet und die Kenntnis über den turbulenten Diffusionskoeffizienten D_t der Strömung erfordert.

$$C_L = 0,9 - \frac{1,8}{r_{90}} \cdot \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{J_0(r \cdot \alpha_n)}{\alpha_n \cdot J_1(r_{90} \cdot \alpha_n)} \cdot \exp\left(-\frac{D_t}{v_0} \cdot \alpha_n^2 \cdot x\right) \right] \quad (4)$$

Zur Abschätzung der Turbulenz als Hauptursache für den Strahlzerfall geben Ervine und Falvey (1987) die Turbulenzintensität Tu (5) als Verhältnis von geometrischem und arithmetischem Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeit und eine Möglichkeit der Abschätzung für $v_m = v_0$ in Abhängigkeit des äußeren Strahlaufweitungswinkels an.

$$Tu = \frac{v'}{v_m} = \frac{\delta_a}{0,38 \cdot x} \quad (5)$$

2.3 Messtechnik bei Luft-Wasser-Gemischen

Bei der Messung von Luft-Wasser-Gemischen versagen aktuelle Methoden wie die Laser Doppler Anemometrie (LDA) oder Particle Image Velocimetry (PIV) durch die Reflexion des Laserlichts auf den Luftblasen. Auch Weiterentwicklungen wie die Bubble Image Velocimetry (BIV), bei der die Blasen verfolgt und deren Geschwindigkeit durch Korrelieren der Texturen von Blasenbildern

gemessen werden, kann nur angewendet werden, wenn man in verschiedene Strömungsebenen hineinsehen kann. Da dies beim Freistrahls nicht möglich ist, bleiben nur intrusive Verfahren, bei denen die Messsonden die räumliche Verteilung der Messgrößen über ein möglichst feines Raster aufnehmen. Als Messgeräte dienen dabei unter anderem Staurohre, einfache und doppelte Nadelsonden oder Lichtleitfaser-Sonden. Allen diesen Sonden gemein ist der Nachteil, dass die Hauptströmungsrichtung im Voraus bekannt sein sollte, da es sonst zu erheblichen Messfehlern kommen kann.

Die Grundlage des Prinzips der Lichtleitfaser-Sonden ist die Änderung des optischen Brechungsindex zwischen den beiden Phasen. Bei den Nadelsonden wird der Unterschied zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand in Wasser und Luft ausgewertet. Der Unterschied zwischen den Sonden mit einzelner Spitze und Doppelspitzen ist, dass mit letzterer neben der Messung des Luftanteils auch die Geschwindigkeit der Blasen durch Korrelieren der Zeiträume, in denen sich die Sonde in Luft oder Wasser befindet, ausgewertet werden kann. Unter der Annahme, dass die Blasengeschwindigkeit der Wassergeschwindigkeit entspricht, kann somit die Geschwindigkeitsverteilung im belüfteten Strahl ermittelt werden. Im unbelüfteten Bereich kommt schließlich das Pitot-Rohr zur Anwendung, mit dem durch Messung des Staudrucks aus der dynamischen Druckhöhe die Wassergeschwindigkeit abgeleitet werden kann. Da diese Messung im belüfteten Bereich ungenau wird, können die Eigenschaften von Freistrahlen nur durch Kombination verschiedener Messmethoden erhalten werden.

3 Versuchsaufbau und Messmethodik

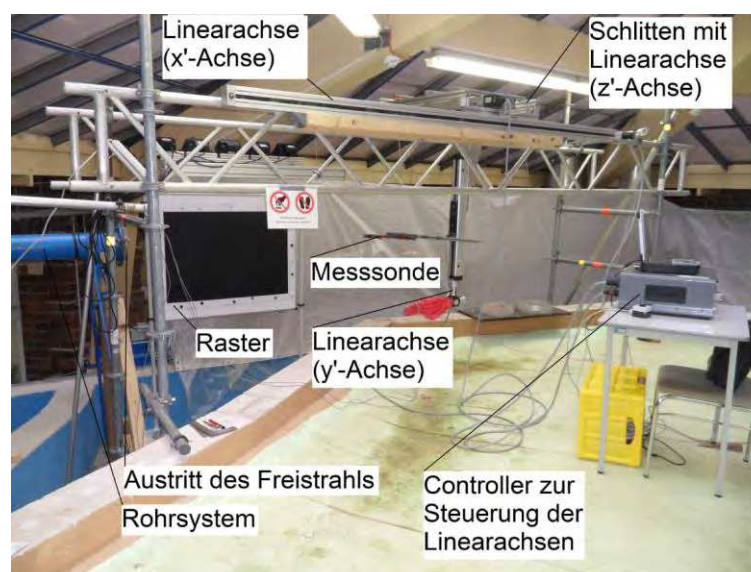


Abbildung 4: Versuchsaufbau (Quelle: Mühle, 2013a)

Der Versuchsstand (Abbildung 4) wurde im Hubert-Engels-Labor des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik an der Technischen Universität Dresden aufgebaut und besteht vor allem aus einer Rohrleitung DN 150, die an eine drehzahlgeregelte Schmutzwasserpumpe angeschlossen ist. Das Wasser wird im Kreislauf mit bis zu 50 l/s gefördert. Der Durchfluss wird dabei mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser in der Steigleitung gemessen. Am horizontalen Ende der Rohrleitung können Blenden mit verschiedenen, kreisförmigen Austrittsgeometrien montiert werden. Parallel zum Koordinatensystem des Freistrahls ist ein Gerüst aufgebaut, das drei miteinander verbundene lineare Traversierungsachsen trägt. Diese dienen der exakten Positionierung der Messsonden im Strahl. Die Achsensteuerung sowie die Wandlung und Verarbeitung der analogen Messsignale erfolgt mithilfe einer DAQ-Software.

Zur Bestimmung der Kernzone (Geschwindigkeit, Lage, Form) wurde ein Pitot-Rohr verwendet, das an eine Druckmessdose angeschlossen war. Zur Bestimmung der Luftkonzentration und der Strahlgeschwindigkeit im belüfteten Bereich wurde eine Doppelnadelsonde entwickelt, die auf dem Prinzip der Leitfähigkeitsmessung (Abbildung 5) beruht. In Abhängigkeit des Mediums, das die Leiter der Elektroden umgibt, ändert sich der Widerstand und es wird eine sich entsprechend ändernde Spannung zurückgegeben. Da die direkte Messung dieser Spannungen trotz hoher Abtastfrequenzen zu fehlerhaften Einschätzungen der Passierzeiten einzelner Blasen führen kann, wurde zur korrekten Erfassung dieses Spannungsabfalls zusätzlich ein integrierter Schaltkreis entwickelt, der durch eine logische Verknüpfung, die den Potentialabbau im Gleichspannungsstromkreis der Messsonde auswertet, scharf begrenzte Messwerte ermöglicht.

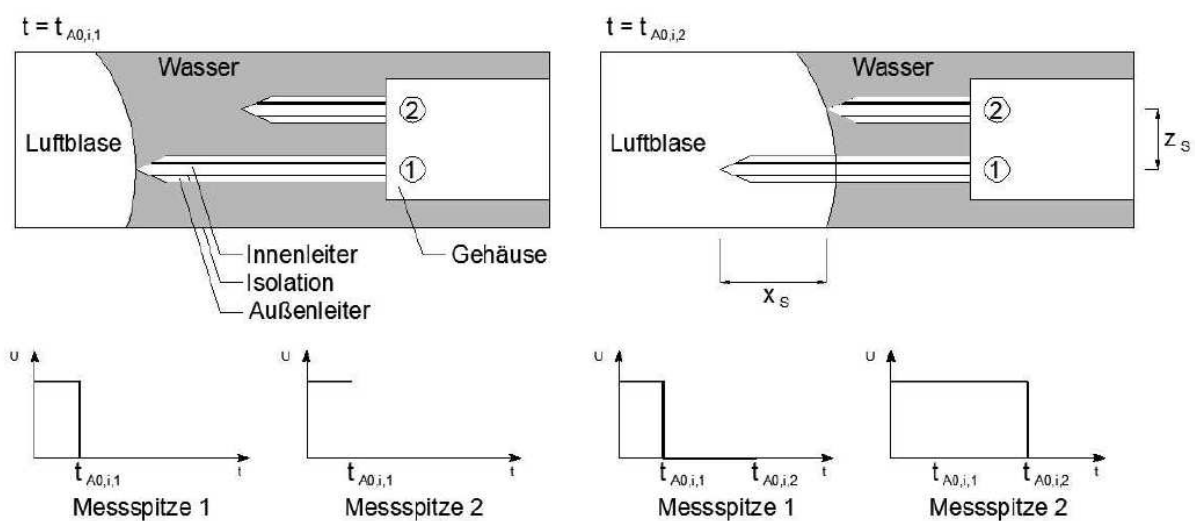


Abbildung 5: Messprinzip einer doppelten Leitfähigkeitssonde (Mühle, 2013b)

Aus der Messung können somit über den Vergleich der Zeiten niedriger Spannungen mit der gesamten Messzeit die Luftkonzentration, über den zeitlichen

Versatz korrelierender Ausschläge und die räumliche Distanz der Sondenspitzen die Blasengeschwindigkeit sowie über die Geschwindigkeit und die Zeitdifferenz einer niedrigen Spannung auch die Blasenlänge bestimmt werden.

Zur Bestimmung der äußeren Strahlform und der Randgeschwindigkeiten wurden zusätzlich Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Freistrahls gemacht. Zur Überprüfung des Einflusses der Austrittsgeometrie auf die Strahleigenschaften wurden Blenden mit Öffnungsdurchmessern von 6, 8 und 10 cm sowie rechteckigem, scharfkantigem, viertelkreisförmigem- sowie viertelelliptischem Profil verwendet.

4 Messergebnisse

4.1 Strahlform

Aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ließ sich der Strahlverlauf im beobachteten Abschnitt ableiten. Die Strahleinschnürung hing dabei von der verwendeten Blendengeometrie ab und ist umso größer, je mehr Widerstand die Blende der Strömung entgegensetzt. Bei allen Blenden stellte sich eine etwa paraboloidförmige Kernzone ein. Bei den untersuchten Durchflüssen stellten sich bereits nach Austritt des Strahls der Zerfall sowie eine Neigung der Strahlachse ein. Die Abmessungen der Kernzone variieren zwischen den Auswertungen der verschiedenen Messverfahren deutlich. Trotzdem lässt sich feststellen, dass die Kernzonenzlänge deutlich kürzer ausfällt, als der analytische Ansatz erwarten lässt, da dieser einen konstanten Aufweitungswinkel voraussetzt. Die gemessenen Kernzonenzlängen entsprechen ca. dem 2,5-fachen des Austrittsdurchmessers. Im Nahbereich des Austritts kann man den Strahlverlauf unter Berücksichtigung des anfänglichen Neigungswinkels und der Ausflusszahl mit Hilfe der Wurfparabel abschätzen. Der äußere Aufweitungswinkel liegt im Bereich zwischen 1° und 8° , der innere zwischen 5° und 6° . Sie sind mit den Angaben aus der Literatur vergleichbar – scheinen über den Umfang des Strahles aber nicht konstant.

4.2 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeiten im Freistrahls werden bei gleichen Austrittsdurchmessern durch den Widerstand der Blendengeometrie beeinflusst. Höhere Einschnürungen bewirken dabei größere Anfangsgeschwindigkeiten aber schnellere Geschwindigkeitsabnahmen. Zuverlässige Geschwindigkeitsprofile lassen sich nur aus der Kombination von Druck- und Leitfähigkeitssonde erhalten, da die Messwerte der Drucksonde im Bereich größerer Luftgehalte ungenau werden.

Andererseits ist eine Geschwindigkeitsbestimmung mit der Leitfähigkeitssonde im Bereich geringer Luftgehalte durch fehlende Korrelation kaum noch möglich.

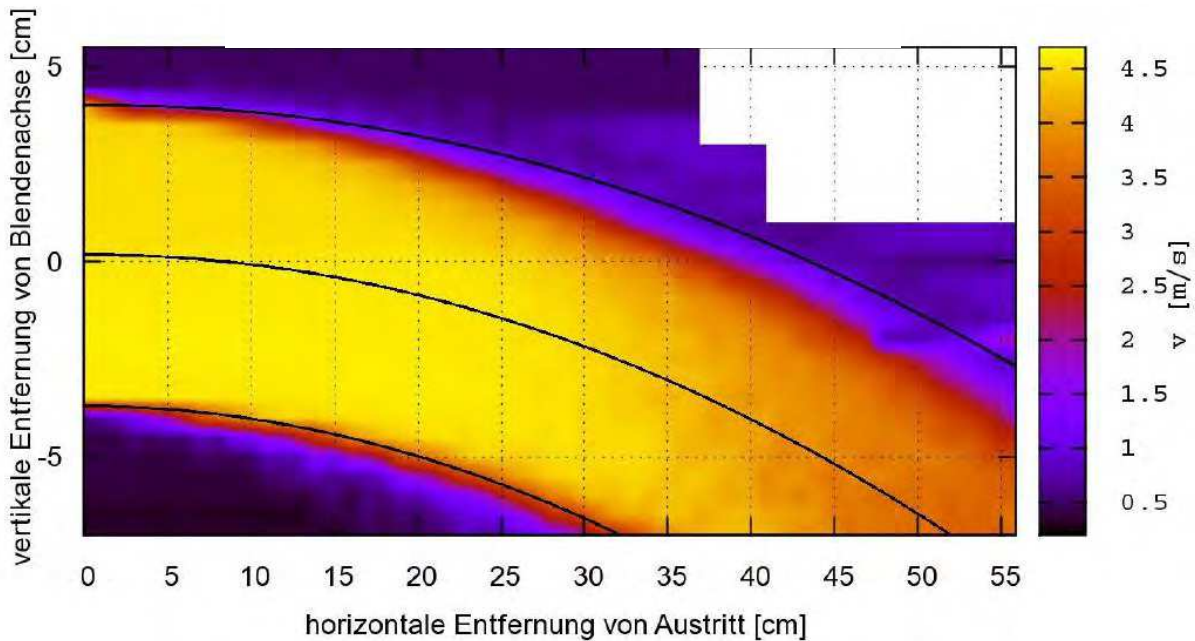


Abbildung 6: Vergleich Strahlform/Geschwindigkeiten aus Druckmessung (Mühle, 2013b)

4.3 Luftgehalt

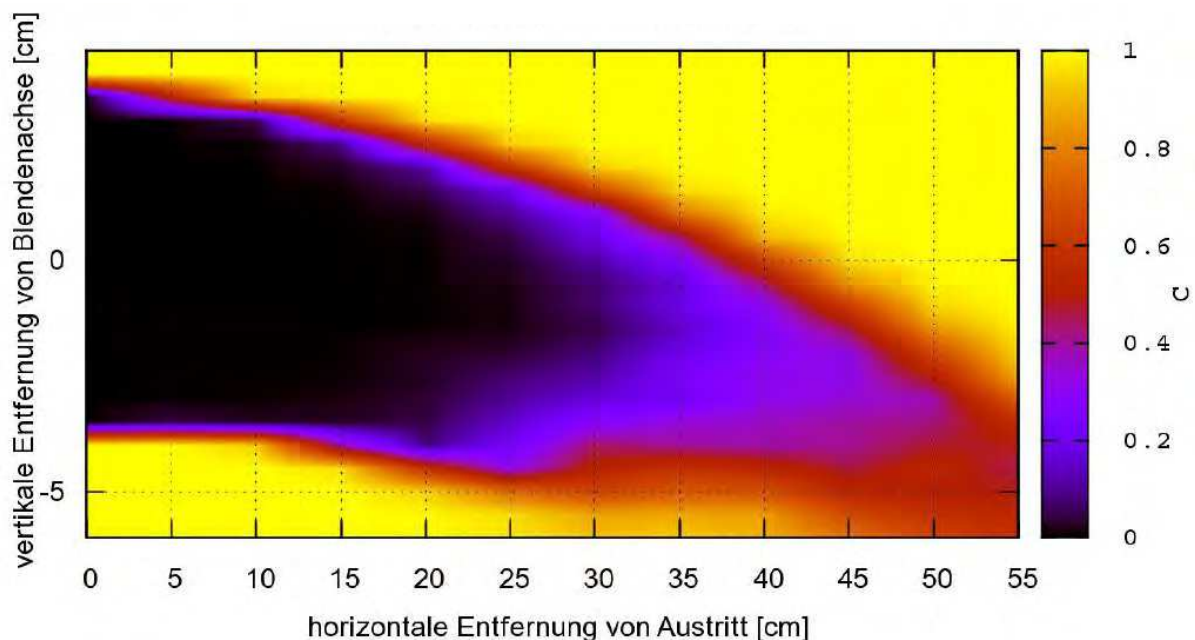


Abbildung 7: Luftkonzentration aus Leitfähigkeitsmessung (Mühle, 2013b)

Die gemessenen Luftgehalte haben einen ähnlichen Verlauf wie die analytischen Ansätze erwarten lassen (Abbildung 7). Der Übergang von der Kernzone zum Strahlrand ist dabei sehr stark von der Blendengeometrie abhängig, so dass sich

die turbulenten Diffusionskoeffizienten der einzelnen Strahlen stark unterscheiden müssen.

Obwohl Messungen mit Leitfähigkeitssonden schon in vielen verschiedenen Untersuchungen durchgeführt wurden, stellen die durch Freistrahlen verursachten Einwirkungen große Anforderungen an die Konstruktion der Sonden. Diese müssen bezüglich der Nadeldurchmesser und –abstände einerseits möglichst klein ausgeführt werden, damit auch kleinste Blasendurchmesser an beiden Spitzen detektiert werden können. Andererseits müssen sie stabil genug sein, um Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s zu widerstehen, und groß genug, damit keine Tropfen zwischen den Elektroden anhaften bleiben. Hierzu werden am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik gegenwärtig weitere Forschungsarbeiten durchgeführt.

5 Literatur

- Kraatz(1989): Flüssigkeitsstrahlen. In: Bollich; Technische Hydromechanik – Band 2: Spezielle Probleme. Verlag für Bauwesen, Berlin 1989
- Chanson(1996): Air-bubble Entrainment in Free Surface Turbulent Shear Flows. Academic Press, London 1996
- Ervine und Falvey(1987): Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere an in plunge pools. Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2, 1987
- Falvey(1980): Air-water flow in hydraulic structures. United States Department of interior, Engineering Monograph No. 41, Denver 1980
- Mühle(2013a): Lufteinmischung in Freistrahlen. Projektarbeit, Technische Universität Dresden 2013
- Mühle(2013b): Untersuchungen zum Einfluss der Öffnungsgeometrie des Austrittsquerschnitts auf die hydraulischen Eigenschaften von Freistrahlen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden 2013
- Ohnesorge(1936): Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 16, Ausgabe 6, 1936

Autor:

Dipl.-Ing. Tobias Gierra

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 36119
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: Tobias.Gierra@tu-dresden.de