

## Erwiderung

### auf den vorstehenden Diskussionsbeitrag von Dr.-Ing. E. Stehr, Hamburg,

Ich bin Herrn Stehr für seinen Diskussionsbeitrag dankbar, gibt er mir doch Gelegenheit, einige Unklarheiten zu beseitigen und explizit auf die von ihm angeschnittenen Punkte einzugehen.

Herr Stehr stellt sowohl die analytischen Ansätze als auch die zitierten Natur- und Labormessungen in Frage. Es mag vielleicht an der Ausdrucksweise des Verfassers liegen, daß Herr Stehr die Grundlagen der Analyse als „hypothetische Annahmen“ apostrophiert. Daß aber Luftschleier-Strömungen physikalisch zur Klasse der Auftrieb-Strahlströmungen gehören und demnach auch als solche analytisch behandelt werden können, kann nicht ernsthaft bezweifelt werden und hat in der internationalen Fachliteratur schon mehrfach seinen Niederschlag gefunden [8,12,13,14,17]. Die Annahme, daß die maximale Oberflächengeschwindigkeit mit guter Näherung der Achsgeschwindigkeit des Auftriebsstrahls gleichgesetzt werden kann, die ohne freie Oberfläche im Querschnitt der Oberfläche vorhanden wäre, geht auf eine analytische Arbeit von Taylor [8] zurück und ist experimentell sowohl für axialsymmetrische Strahlen [15] als auch für zweidimensionale Strahlen [16] für Wassertiefen von mehr als 20 Düsendurchmessern (eine Bedingung, die bei Luftschleieranlagen stets erfüllt ist) als gut zutreffend erwiesen worden. Seit Ein-sendung des Aufsatzmanuskripts (Juli 71) durchgeführte eigene Messungen haben dies für Luftschleier ebenfalls bestätigt. Die Analyse beruht somit auf wohlfundierten und durch Untersuchungen gerechtfertigten Grundlagen.

Ich stimme mit Herrn Stehr in der Ansicht überein, daß analytische Berechnungen durch den Vergleich mit Messungen bestätigt werden müssen und verweise hierzu auf Abschnitt 4.5 und auf Bild 6 des Aufsatzes, wo Natur- und Labormessdaten zusammengetragen und der Berechnung gegenübergestellt wurden. Die Problematik bezüglich der Änderung der Oberflächengeschwindigkeit mit dem seitlichen Abstand von der Luftschleierebene ist dort einschließlich der von Herrn Stehr gegen die Messungen von Bulson vorgebrachten Einwände diskutiert. Die im Abstand ( $y=H$ ) gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten liegen sicher unter dem Maximalwert  $v_m$ . Es besteht jedoch [12] eine eindeutige Beziehung zwischen der relativen Oberflächengeschwindigkeit  $v(y)/v_m$  und dem relativen seitlichen Abstand ( $y/H$ ), so daß die bei ( $y=H$ ) gemessenen Geschwindigkeiten in einem konstanten Verhältnis zu  $v_m$  stehen. Von einer Multiplikation aller betroffenen Meßwerte mit einem konstanten Faktor bleibt jedoch die entscheidende Tendenz unberührt, daß die Meßwerte für den Parameter  $v_m/\sqrt[3]{gQ_0}$  mit wachsender Wassertiefe abnehmen.

Auch ich würde es begrüßen, wenn mehr Meßdaten bei großen Wassertiefen zur Verfügung stünden, um das Ergebnis der Berechnung weiter zu erhärten. Leider existieren solche Daten bis heute noch nicht. Die von Stehr zitierten eigenen Messungen wurden in die ursprüngliche Zusammenstellung deshalb nicht mit aufgenommen, weil es sich hierbei nicht um örtliche Geschwindigkeitsmessungen handelt, sondern um Weg-Zeitmessungen mit Hilfe von Schwimmern, auf deren

Nachteile Stehr selbst hingewiesen hat. Gegen die hieraus abgeleitete Formel für die Oberflächengeschwindigkeit ist unter anderem einzuwenden, daß sie Maximalwerte im Staupunkt über der Düsenreihe liefert, wo die tatsächliche Geschwindigkeit aus Symmetriegründen gleich Null sein muß (siehe Bild 1). Schließlich sei erwähnt, daß Sjöberg und Verner [17] bei einem Vergleich verschiedener experimenteller Daten zu dem Schluß kommen, daß bei guter Übereinstimmung der anderen Meßergebnisse die Stehr'schen Werte „um einen Faktor 2 bis 3 zu hoch liegen“.

Im zweiten Teil seines Beitrages versucht Herr Stehr zu begründen, warum seiner Ansicht nach bei konstanter Luftzufuhr die resultierende Oberflächengeschwindigkeit  $v_m$  mit steigender Wassertiefe stets wachsen müsse und nicht abnehmen oder konstant bleiben könne. Zur Klärung dieses Zusammenhangs sei zunächst der einfachere Fall betrachtet, daß die Kompressibilität der Luft vernachlässigt werden könnte und somit der Auftrieb pro Höheneinheit durch die Luftblasen wegen ihrer konstanten Steiggeschwindigkeit konstant wäre. Für derartige (klassische) Auftriebsströmungen ergibt sich eine über die Höhe gleichbleibende Achsgeschwindigkeit, deren Größe von der Auftriebskraft pro Höheneinheit (nicht aber von der Gesamtauftriebskraft) abhängt [18]. Das Geschwindigkeitsfeld bereitet sich linear aus, so daß sich die durch den Auftrieb bewirkte Zunahme des Impulsflusses mit der Wassertiefe in einer Zunahme der pro Zeiteinheit bewegten Wassermasse bemerkbar macht, nicht aber in einer Vergrößerung der Achsgeschwindigkeit. Diese Betrachtung liegt der Delfter Formel zugrunde, die somit (für  $H > 2$  m) eine wassertiefenunabhängige, konstante Achs- und damit maximale Oberflächengeschwindigkeit liefert. Die tatsächliche Auftriebskraft pro Höheneinheit eines Luftschleiers ist jedoch wegen der Kompressibilität der Luft nicht konstant, sondern umgekehrt proportional dem absoluten örtlichen Druck, wie auch aus den Gleichungen (7) und (8) ersichtlich wird: die gleiche Luftmasse nimmt in 10 m Wassertiefe nur ein halb so großes Volumen ein wie an der Oberfläche und erzeugt somit auch nur einen halb so großen Auftrieb. Auf die Wirkung der Kompressibilität ist es daher zurückzuführen, daß für einen vorgegebenen atmosphärischen Luftstrom  $Q_0$  die Achsgeschwindigkeit (und damit  $v_m$ ) nicht für alle Wassertiefen gleich sein kann, sondern bei großen Wassertiefen schließlich kleinere Werte annehmen muß. Diese Zusammenhänge sind aus einer Reihe neuerer Arbeiten zu diesem Thema ersichtlich [6,12,13,17].

Unverständlich bleibt die Argumentation, daß wegen der Wasserspiegelerhöhung über dem Wasserluftgemisch die Oberflächengeschwindigkeit mit wachsender Wassertiefe ständig zunehmen müsse. Die Oberflächenströmung wird durch die Umlenkung der vertikalen Wasserströmung an der freien Oberfläche erzeugt, wobei die hiermit verbundene Wasserspiegelerhöhung von untergeordneter Bedeutung ist. Dies wird ohne weiteres deutlich, wenn man sich die freie Oberfläche durch eine starre Wand ersetzt denkt: in diesem

Fall würde auch ohne jegliche Oberflächenverformung nahezu dasselbe Geschwindigkeitsfeld erzeugt, wie dies mit freier Oberfläche der Fall ist. Das von Herrn Stehr angegebene Gesetz für die Wasserspiegelerhebung berücksichtigt ohnehin nur den hydrostatischen Anteil und läßt außer acht, daß sich aufgrund des Geschwindigkeitsfeldes ebenfalls eine Wasserspiegelverformung ergibt: bei der Umlenkung eines vertikal nach oben gerichteten Wasserstrahls an einer freien Oberfläche wird diese natürlich auch verformt, obwohl der Strahl keine Dichteunterschiede zum umgebenden Wasser aufweist und nach dem von Stehr angegebenen Gesetz demzufolge keine Spiegelerhöhung auftreten dürfte [15,16].

Zum Abschluß sei hier bemerkt, daß mir nichts ferner liegt, als die Verdienste der Stehr'schen Arbeit zu schmälern. Sie ist vor 13 Jahren erschienen und hat damals einen wesentlichen Beitrag zur Klärung der Einsatzmöglichkeiten von Luftschleiern als Ölsperren geliefert. Dies ändert jedoch nichts an der Tatsache, daß aufgrund neuerer Untersuchungen – nicht nur meiner eigenen – einige der damaligen Erkenntnisse revidiert werden müssen. Im übrigen stimme ich mit Herrn Stehr darin überein, daß es wünschenswert wäre, wenn mehr Messungen bei großen Wassertiefen vorlägen; es wird zweifellos interessant sein, zukünftige Naturmessungen zur weiteren Überprüfung der analytischen Ergebnisse heranzuziehen.

#### Druckfehler

Die Skalenwerte der Ordinate von Bild 5 sind durch 10 zu dividieren (tatsächlicher Skalenbereich: 0.02...0.2).

In Gl. (16) ist auf der rechten Seite hinter der eckigen Klammer der Exponent (1/2) hinzuzufügen.

Dr.-Ing. H. Kobus, Karlsruhe

#### Zusätzliche Literaturangaben

- [12] A. Sjöberg: „Strömingshastigheter kring luftbubbelrida i tätthetshomogent och stillastaende vatten“, Meddelande nr. 39, Institutionen för vattenbyggnad, Chalmers Institute of Technology, Göteborg 1967.
- [13] K. Cederwall und J. D. Ditmars: „Analysis of Air-Bubble-Plumes“, California Institute of Technology, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Report No. KH-R-24, Sept. 1970.
- [14] G. Abraham: „Theoretische beschouwingen over zoutbestrijding bij schutsluizen door luchtbellengordijnen“, Technisch Wetenschappelijk Onderzoek 1, 24. März 1972.
- [15] B. Hunt und S. T. Hsu: „Configuration of the free surface above a vertical jet“, La Houille Blanche, No. 6, 1965.
- [16] S. Liang: „Experimentelle Untersuchung der Umlenkung eines zweidimensionalen Wasserstrahls an der Wasseroberfläche“, Vertiefungsarbeit am Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe 1971.
- [17] A. Sjöberg und B. Verner: „Pneumatic barriers against the spreading of oil on water“, Tryckluft (Atlas Copco) 1970.
- [18] H. Rouse, C. S. Yih und H. W. Humphreys: „Gravitational Convection from a Boundary Source“, Tellus 4 (1952).