

# Durch Luftblasen erzeugte Auftriebsstrahlen

## Air-Bubble-Induced Buoyant Jets

### Kurzfassung / Summary

Die strömungsmechanischen Grundlagen für die Berechnung von Luftschleierströmungen werden dargestellt und Näherungslösungen entwickelt. Das Strömungs- und Konzentrationsfeld wurde experimentell untersucht, wobei zunächst geeignete Meßverfahren für Blasenkonzentrationen, -größe und -steiggeschwindigkeit entwickelt werden mußten. Die Anwendung von Luftschleiern als Preßluft-Ölsperre sowie zum Sauerstoffeintrag in Gewässer wird beschrieben.

*The fluid mechanics fundamentals of air-bubble screens are described and approximate solutions are developed. An experimental investigation of the flow- and concentration field is presented, which included the development of suitable instrumentation for measurements of bubble concentration, size and rise velocity. The application of bubble screens as oil barriers and as a means of oxygenating water bodies is described.*

### 1 Einleitung

Durch das Einblasen von Druckluft in ausreichender Tiefe in stehende oder fließende Gewässer wird bei relativ geringem Energiebedarf eine Auftriebsstrahlströmung erzeugt. Die aufsteigenden Luftblasen bewirken örtlich einen Vertikaltransport von Tiefenwasser an die Oberfläche und erzeugen an der Wasseroberfläche Strömungen, ohne hierfür Einbauten oder Geräte im Gewässer selbst erforderlich zu machen. Diese beiden Eigenschaften sind für eine Reihe wasserbaulicher und wassergütetechnischer Aufgaben von Interesse, so daß Luftschleieranlagen im Wasserbau und im Gewässerschutz für vielerlei Zwecke Verwendung finden können.

Luftschleier werden mit sehr gutem Erfolg als „pneumatische Ölsperren“ eingesetzt, welche die Ausbreitung eines Ölfilms auf einer Wasseroberfläche verhindern. Auch gegen das Eindringen von Salzwasser in Süßwasserkanäle sowie zur Beeinflussung temperaturbedingter Dichteströmungen bei Kühlwasserleitungen haben sich Luftblasenschleier als wirksame Methode zur Vertikalvermischung bewährt. Zur künstlichen Sauerstoffanreicherung werden Luftschleier nicht nur seit langem in der Abwassertechnik, sondern auch in stehenden und fließenden natürlichen Gewässern als Maßnahme zur Verbesserung der Wasserqualität eingesetzt. Auch zur Umwälzung dichtegeschichteter Seen sind sie geeignet. Im Winter kann der Transport relativ warmen Wassers aus tieferen Schichten genutzt werden, um Wasseroberflächen mit Hilfe von Luftschleiern bereichsweise eisfrei zu halten.

Der Einsatz von Luftschleieranlagen für derartige Aufgabenstellungen setzt voraus, daß die Anlage für die jeweiligen Anforderungen hydraulisch richtig dimensioniert werden kann. Als Bemessungsgrundlage sind deshalb quantitative Angaben über das vom Luftschleier erzeugte Strömungsfeld sowie über Größe und Verteilung der Luftblasen erforderlich. Die hierzu notwendigen umfangreichen Grundlagenuntersuchungen wurden zu einem bedeutenden Anteil im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 80 durchgeführt. Neben einer analytischen Behandlung zweiphasiger Auftriebsstrahlen waren hierzu auch umfangreiche experimentelle Untersuchungen dieser Strömungskonfiguration erforderlich. Be-

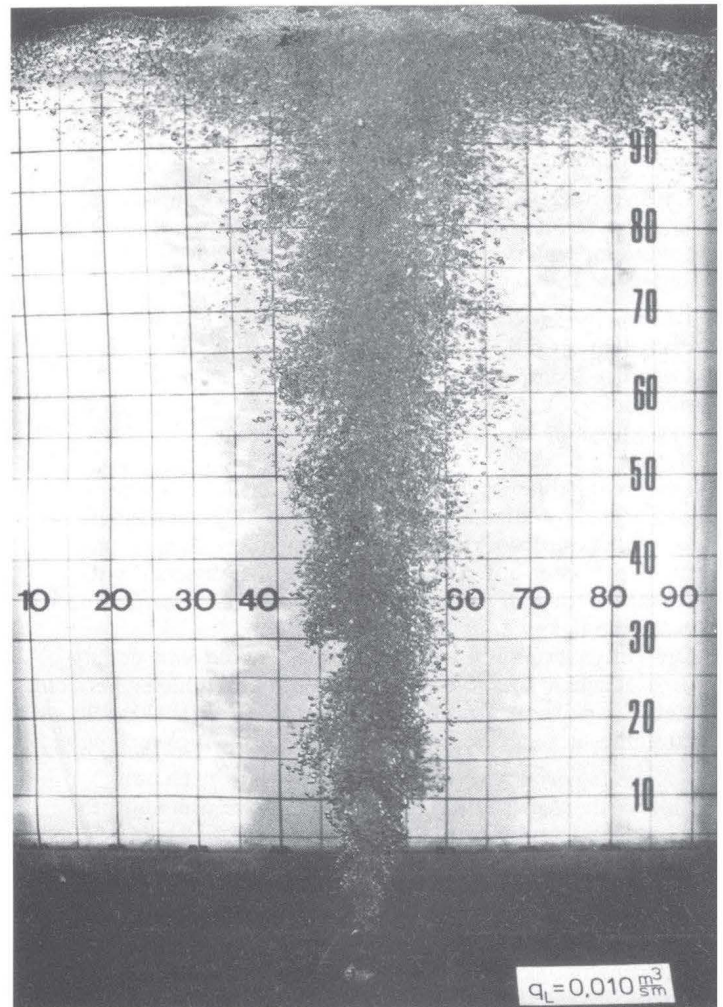
sonderes Gewicht kam hierbei der Meßtechnik zu, da für die Messung von Blasengrößen, Blasengeschwindigkeiten und Luftkonzentrationen erst zuverlässige Meßmethoden entwickelt und erprobt werden mußten, bevor sie auf das anstehende Problem des Luftblasenschleiers angewendet werden konnten.

An den Forschungsarbeiten im SFB 80 zu diesem Thema waren eine Reihe von Mitarbeitern beteiligt, von denen vor allem die Herren H. Honekamp und D. Danzeisen zu nennen sind. Die vorliegende Zusammenfassung gibt einen Überblick über die Ergebnisse, die im Einzelnen in der Habilitationsschrift des Erstautors [6] und in der Dissertation des Zweitautors [9] dargestellt sind.

### 2 Strömungsmechanische Grundlagen

Durch das Einblasen von Druckluft in ein Gewässer entsteht ein kontinuierlicher Luftstrahl, der sich infolge des plötzlichen Druckabfalls rasch ausdehnt und in Luftblasen verschiedener Größen zerfällt. Nach einem kurzen „Anlaufbereich“, in dem die örtlichen Verhältnisse an der Düse das Strömungsfeld beeinflussen, steigt der Blasenstrom frei auf (Bild 1),

Bild 1: Luftblasenschleier





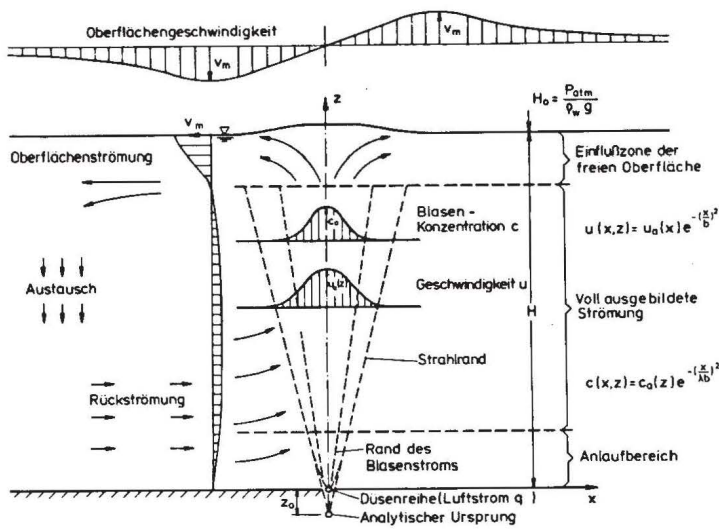


Bild 2: Definitionsskizze

wobei das Geschwindigkeitsfeld ausschließlich vom Luftstrom abhängig ist. Das Strömungsfeld eines Luftblasenschleiers in einem ruhenden Gewässerkörper ist in Bild 2 dargestellt. Die aufsteigenden Luftblasen üben eine Kraft auf das umgebende Wasser aus, der zufolge eine aufwärts gerichtete Wasserströmung zustande kommt; der Impulsstrom dieser Strömung nimmt mit der Höhe über der Zuleitungsstelle ständig zu und wird sehr rasch so groß, daß der ursprüngliche Ausgangsimpuls des Luftstrahls mit guter Näherung vernachlässigt werden kann. In diesem Strömungsfeld wird mit zunehmender Höhe ein ständig wachsender Wasservolumenstrom in Aufwärtsbewegung versetzt. An der Wasseroberfläche tritt die aufsteigende Luft aus, während der induzierte Wasserstrahl seitlich umgelenkt wird. Hierbei treten die größten Horizontalgeschwindigkeiten unter der Wasseroberfläche in einem gewissen seitlichen Abstand von der vertikalen Strahlachse auf. Aus Kontinuitätsgründen muß in einiger seitlicher Entfernung ein vertikaler Massenaustausch und in den unteren Regionen eine Rückströmung zum Luftschleier hin auftreten.

Das aufwärts gerichtete Strömungsfeld des Wasser-Luftgemisches kann strömungsmechanisch als Auftriebsstrahl behandelt werden, wobei hier jedoch einige Besonderheiten zu beachten sind:

- Die treibende Kraft ist der Auftrieb der Luftblasen, welcher dem jeweiligen Blasenvolumen proportional ist. Zuzufolge der Kompressibilität der Luft nimmt das Luftblasenvolumen beim Aufsteigen der Blasen entsprechend der Abnahme des hydrostatischen Druckes kontinuierlich zu.
- Die im Luftblasenschleier aufsteigenden Blasen weisen wegen ihrer endlichen Größe eine Relativgeschwindigkeit („Schlupfgeschwindigkeit“) gegenüber dem umgebenden Wasser auf. Der klassische Auftriebsstrahl entspräche dem Fall unendlich kleiner Blasen ohne Schlupfgeschwindigkeit.
- Die Druckverteilung im Luftschleier weicht von der hydrostatischen Druckverteilung ab. Im Luftschleier herrscht stets ein höherer Druck als im umgebenden Fluid, was zu einem gegenüber der hydrostatischen Druckverteilung verringerten Auftrieb führt.

Die klassische Analyse eines Auftriebsstrahls ist sowohl für den achsialsymmetrischen Fall (Einzeldüse) als auch für den plansymmetrischen Fall (Düsenreihe) in [6] ausgehend von der Impulsgleichung und den Kontinuitätsgleichungen für Wasser und Luft dargestellt. Hierbei wird davon ausgegangen, daß das Verhältnis  $\lambda$  der Breiten des Konzentrations- und Geschwindigkeitsprofils konstant ist und daß der Einmischkoeffizient  $\alpha$  eine Funktion des Luftstroms ist, je-

doch nicht von der Wassertiefe abhängt. Nimmt man für die Querprofile von Geschwindigkeits- und Konzentrationsfeld Gaußsche Verteilungen an (siehe Bild 2), können die Gleichungen integriert werden. Für den plansymmetrischen Fall des Luftschleiers (Düsenreihe) ergibt sich dann das folgende Gleichungssystem zur Bestimmung der Achsgeschwindigkeit  $u_a$ , der Strahlbreite  $b$  (seitlicher Abstand von der Strahlachse, bei der die Geschwindigkeit auf  $u_a/e$  abgesunken ist) und der Konzentration  $c_a$  bzw. des Dichtedefizits  $\Delta \rho_a$  auf der Strahlachse:

$$\frac{d}{dz} (u_a b) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \alpha u_a \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \left[ \left( 1 - \frac{\sqrt{2} \lambda \Delta \rho_a}{\rho_w \sqrt{1 + \lambda^2}} \right) u_a^2 b \right] = R \sqrt{2} \lambda b g \frac{\Delta \rho_a}{\rho_w} \quad (2)$$

bzw. in vereinfachter Form:

$$\frac{d}{dz} (u_a^2 b) = \sqrt{2} \lambda b g \frac{\Delta \rho_a}{\rho_w} \quad (2a)$$

$$C_a \approx \frac{\Delta \rho_a}{\rho_w} = \frac{q_0 \sqrt{1 + \lambda^2}}{b \lambda \sqrt{\pi} (u_a + \Delta u_b \sqrt{1 + \lambda^2})} \cdot \frac{H_0}{H_0 + H - z} \quad (3)$$

Hierbei werden die Breite  $b_L$  des Luftstroms, der Einmischkoeffizient  $\alpha$  und die Aufstiegs geschwindigkeit  $u_L$  der Luft wie folgt definiert:

$$b_L = \lambda b \quad (4)$$

$$\frac{dq}{dz} = 2 \alpha u_a \quad (5)$$

$$u_L = u + \Delta u_b \quad (6)$$

Die Geschwindigkeit der Luft  $u_L$  ergibt sich nach Gl. (6) aus der Summe der Wassergeschwindigkeit  $u$  und der Blasen schlupfgeschwindigkeit  $\Delta u_b$ , welche der Aufstiegs geschwindigkeit der Einzelblasen in ruhendem Medium entspricht.

Mit dem in Gl. (2) eingeführten empirischen Druckkorrekturfaktor  $R$  wird der durch die nicht-hydrostatische Druckverteilung verringerte Auftrieb berücksichtigt. Demzufolge muß  $R$  stets kleiner als Eins sein und mit steigendem Luftstrom abnehmen.

Gleichung (2) vereinfacht sich zu Gleichung (2a), falls die nicht-hydrostatische Druckverteilung nicht berücksichtigt wird und die sogenannte Boussinesq-Hypothese angesetzt wird. Letztere besagt, daß für kleine Dichteunterschiede ( $\Delta \rho \ll \rho$ ) die Dichteunterschiede  $\Delta \rho$  in den Trägheitsgliedern der Gleichungen vernachlässigt werden können. Hingegen muß  $\Delta \rho$  im Auftriebsglied beibehalten werden, da die Auftriebskraft ausschließlich durch den Dichteunterschied hervorgerufen wird. Obwohl der Dichteunterschied zwischen Luft und Wasser extrem groß ist, wird bei niedrigen Luftkonzentrationen die Gemischdichte näherungsweise gleich der Dichte des Wassers sein, so daß die Vereinfachung der Boussinesq-Hypothese zulässig ist. Im Bereich hoher Luftkonzentrationen, insbesondere im Anlaufbereich in Düsen-nähe, ist hingegen mit größeren Abweichungen von dieser Vereinfachung zu rechnen.

Das vollständige Gleichungssystem (1), (2) und (3) ist nicht explizit lösbar, kann jedoch mit Hilfe numerischer Methoden gelöst werden [9]. Für das vereinfachte System (1), (2a) und (3) können geschlossene Näherungslösungen angegeben werden [6].



Mit Hilfe der Lösung für die Achsgeschwindigkeit des Auftriebsstrahls kann auch die vom Luftschleier erzeugte maximale Geschwindigkeit  $V_m$  der Oberflächenströmung bestimmt werden. Sie ergibt sich mit guter Näherung aus der hypothetischen Achsgeschwindigkeit  $u_a$  (H) im Querschnitt des ungestörten Wasserspiegels.

### 3 Meßtechnik für Wasser-Luftgemische

#### 3.1 Meßgrößen

Bei allen Berechnungsverfahren für Luftblasenschleier müssen die nur experimentell zu ermittelnden Parameter  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\Delta u_b$  und  $R$  bekannt sein oder durch geeignete Abschätzungen bestimmt werden. Für die Größen  $\Delta u_b$  und  $R$  lagen keine, für  $\alpha$  und  $\lambda$  nur sehr wenige, teilweise stark widersprüchliche Daten vor. Dies ist insbesondere auf die bis dahin komplizierte, aufwendige und ungenaue Meßtechnik zurückzuführen. Zur Verbesserung der Berechnungsverfahren für Luftblasenschleier mußten daher zunächst geeignete Meßverfahren zur Bestimmung von Blasenkonzentration, Blasensteiggeschwindigkeit und Blasengröße entwickelt werden.

#### 3.2 Blasenkonzentration

Photometrische Verfahren sind unter den gegebenen Versuchsbedingungen eines plansymmetrischen Luftblasenschleiers am besten zur Blasenkonzentrationsmessung geeignet. Wie in Bild 3 schematisch dargestellt, erfolgt bei diesem Verfahren die Messung der Blasenkonzentration über die Abschwächung („Absorption“) eines parallelen Lichtstrahls durch die im Meßvolumen befindlichen Luftblasen. Unter der Annahme, daß der Energieverlust der einfallenden Strahlung der Intensität  $\Phi_0$  und der Dicke  $d$  des Schichtelementes proportional ist, ergibt sich für die Konzentration ein exponentielles Absorptionsgesetz [9]. Die Konzentration der Luftblasen kann nach Eineichung des spezifischen Absorptionskoeffizienten  $\epsilon_b$  für Luftblasen sehr einfach durch Messung der Lichtströme vor und nach Durchstrahlung der Meßstrecke bestimmt werden. Der Extinktionskoeffizient  $\epsilon_b$  ist für den Fall der Lichtabsorption durch Luftblasen keine Konstante, sondern hängt sowohl von der Blasengröße als auch von der Blasenform ab. In [9] konnte jedoch abgeschätzt werden, daß der Extinktionskoeffizient für den Blasengrößenbereich von 2 mm bis 8 mm mit guter Näherung als konstant angesetzt werden kann. Dies wurde mit dem in Bild 3 dargestellten Meßgerät, das im wesentlichen aus einer Lichtquelle, einem optischen System mit Strahlteiler zur Referenzmessung, sowie einer Empfangsoptik, den Photodetektoren und einer speziell entwickelten Auswertelektronik bestand, an einem Eichversuchsstand experimentell bestätigt.

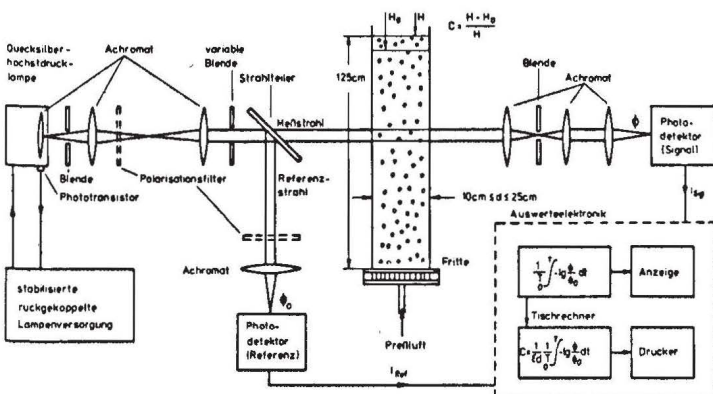


Bild 3: Blasenkonzentrationsmeßmethode (Eichversuchsstand)

#### 3.3 Blasensteiggeschwindigkeit

Zur Messung der Blasensteiggeschwindigkeit im Luftblasenschleier, d.h. bei hohen Blasenkonzentrationen, wurde ebenfalls ein neues optisches Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf der Laufzeitmessung zwischen zwei Lichtschranken. Wie in Bild 4 schematisch dargestellt, unterbricht eine aufsteigende Luftblase zunächst die untere Startlichtschranke und danach die obere Stoplichtschranke. Durch Messung der Laufzeit  $T$  zwischen den beiden Lichtschranken und dem bekannten Abstand  $s$  (2 mm) läßt sich sehr leicht die Blasensteiggeschwindigkeit ermitteln. Die Messung mit zwei Lichtschranken ist jedoch deshalb unzureichend, weil die Luftblasen im allgemeinen nicht senkrecht aufsteigen und somit die Lichtschranken nicht von derselben Stelle der Blasenoberfläche unterbrochen werden, was zu beträchtlichen Meßfehlern führt. Völlige Fehlmessungen ergeben sich, wenn die beiden Lichtschranken nicht von der selben Luftblase unterbrochen werden. Aus diesem Grunde wurde das Verfahren dahingehend erweitert, daß anstelle von zwei nunmehr achtzehn Lichtschranken eingesetzt werden. Durch Vergleich der Anzahl unterbrochener Start- bzw. Stoplichtschranken kann dann eindeutig sichergestellt werden, daß sowohl Beginn als auch Ende der Laufzeitmessung von ein und derselben Stelle der Blasenoberfläche ausgelöst werden und damit tatsächlich eine exakte Messung der Vertikalkomponente der Aufstiegs geschwindigkeit erfolgt. Eine Überprüfung dieser Meßmethode an aufsteigenden Einzelblasen ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit Literaturwerten. Durch die Sonde wird zwar die Strömung gestört, jedoch ist diese Störung wegen der kleinen Ausmaße der Sonde (Wandstärken von wenigen mm, Meßbreiten von einigen cm) gering.

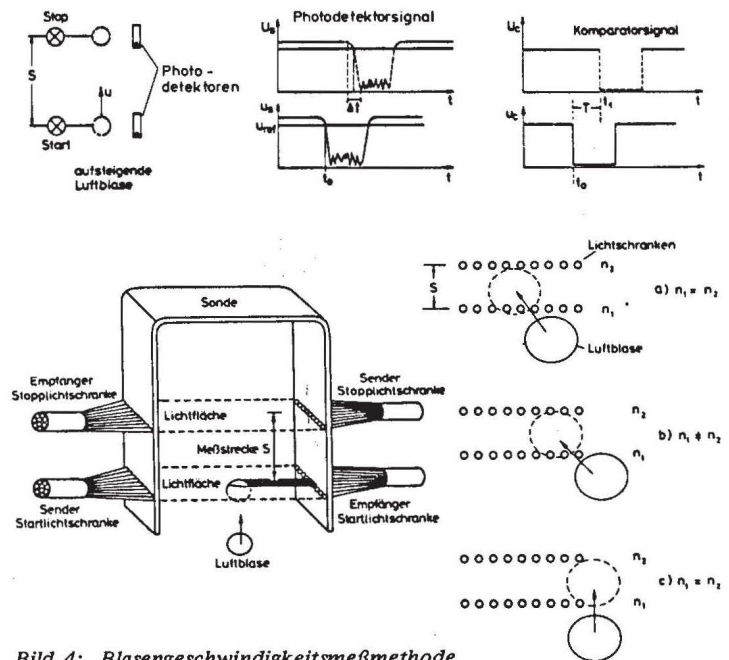


Bild 4: Blasensteiggeschwindigkeitsmeßmethode

#### 3.4 Blasengröße

Zur Messung der Blasengröße wurde das in Bild 5 dargestellte Gerät nach einer von Todtenhaupt [5] vorgeschlagenen Methode aufgebaut. Mit einer trichterförmig aufgeweiteten Rohrsonde werden Blasen aus dem Wasser-Luftgemisch abgesaugt. Innerhalb der Glaskapillare unterbricht die Luftblase, die nun zwangsweise die Form eines Pfropfens hat, wiederum zwei Lichtschranken. Aus der Blasenlaufzeit  $T$  zwischen den beiden Lichtschranken läßt sich die Geschwindigkeit der Blase im Absaugrohr bestimmen. Aus der Dauer  $\tau$  der Unterbrechung einer Lichtschranke läßt sich dann mit



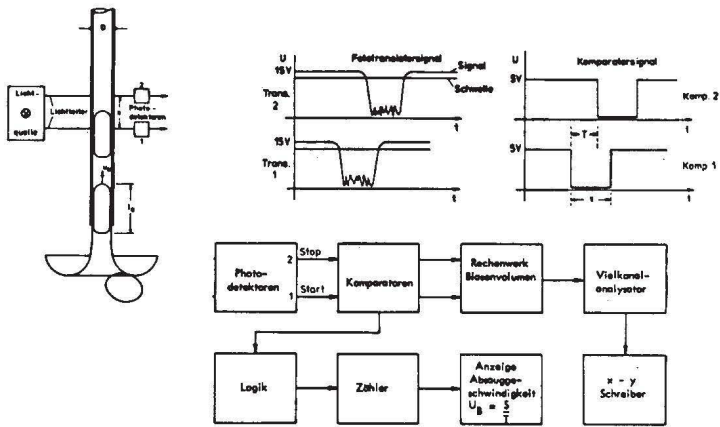


Bild 5: Blasengrößenmeßmethode

Hilfe der zuvor ermittelten Geschwindigkeit der Blase, auch ihre Länge  $l_b$  bestimmen. Unter Annahme zylinderförmiger Blasen tropfen kann bei bekanntem Rohrdurchmesser das Volumen der Blase berechnet werden. Dies gilt unter der Annahme, daß die Blasenform, der Blaseninnendruck und die Dicke des Flüssigkeitsfilms zwischen Blase und Rohrwand unabhängig von der Absauggeschwindigkeit ist. Da diese Voraussetzungen jedoch nur bedingt gegeben sind, muß das Gerät für genaue Blasengrößenmessungen entsprechend geeicht werden. Darüber hinaus muß durch günstige Form und Größe des Absaugtrichters sichergestellt werden, daß Blasen, die auf den Trichterrand treffen, nicht zerteilt werden und sich auch nicht mehrere Blasen im Trichter vereinigen. Da stabile Blasenpfropfen nur bei Absauggeschwindigkeiten zwischen 1,5 und 2,5 m/s erreicht werden, muß sowohl der Rohrdurchmesser als auch der Ansaugtrichter an die zu erwartende Blasengrößenverteilung angepaßt werden. Erfahrungsgemäß können mit einer Sonde nur Blasen in einem Größenbereich von ( $d_{max} : d_{min} = 10$ ) fehlerfrei gemessen werden.

#### 4 Strömungs- und Konzentrationsfeld

Zur Beschreibung der Luftschleierströmung, d.h. zur Lösung der Bestimmungsgleichungen (1) bis (3) müssen zunächst die empirischen Beiwerte  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\Delta u_b$  und  $R$  bestimmt werden. Hierzu wurde mit einem automatisierten Versuchsstand das Geschwindigkeits- und das Konzentrationsfeld eines Luftschleiers für verschiedene Luftdurchsätze ermittelt.

Bild 6 und 7 zeigen als Beispiel dieser Messungen die uni-

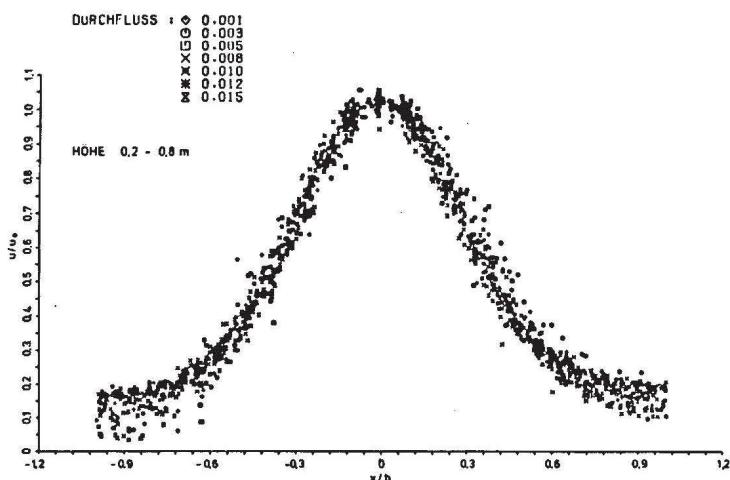


Bild 6: Universelle Geschwindigkeitsverteilung

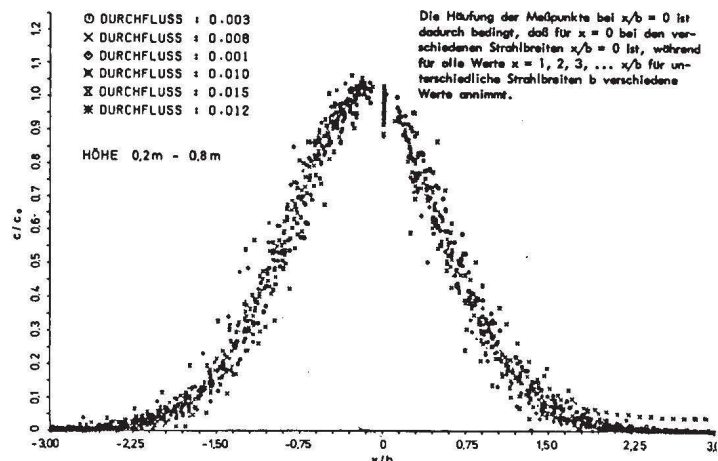


Bild 7: Universelle Konzentrationsverteilung

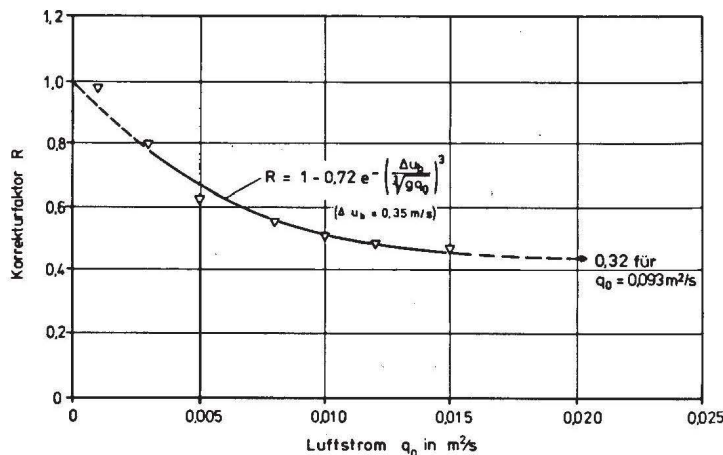
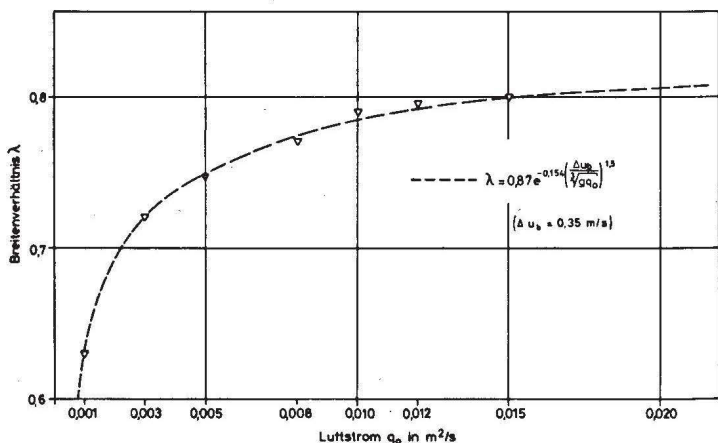
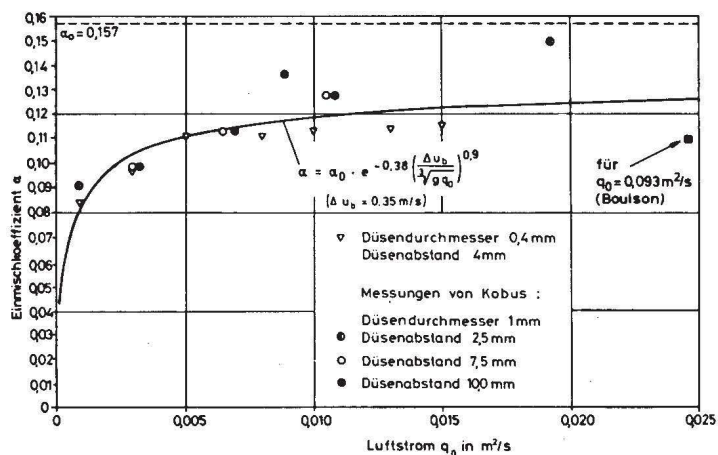


Bild 8: Einmischkoeffizient  $\alpha$ , Breitenverhältnis  $\lambda$ , Druckkorrekturfaktor  $R$  in Abhängigkeit vom Luftstrom



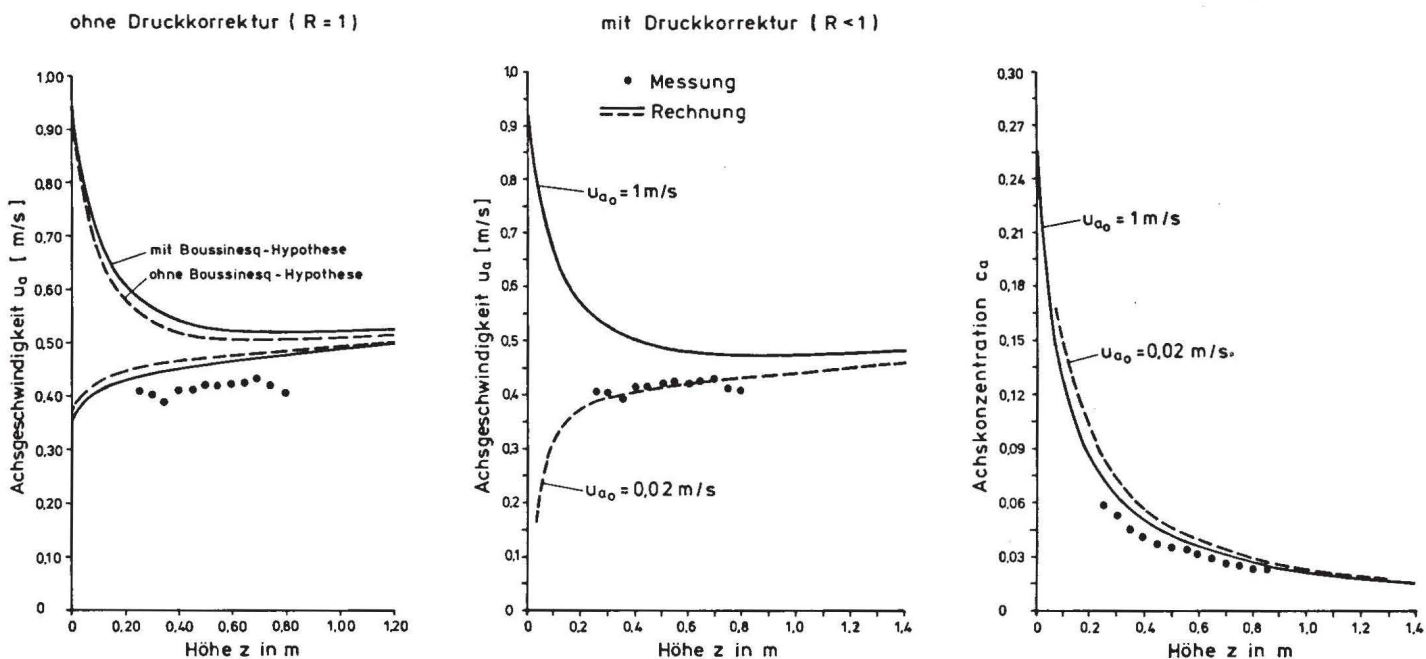


Bild 9: Numerische Berechnung von Achsgeschwindigkeit und Achskonzentration: Einfluß des Druckfeldes und der Boussinesq-Hypothese

verselle Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilung für alle Luftdurchsätze und alle Wassertiefen. Beide Verteilungen bestätigen in überzeugender Weise die in den Ausgangsgleichungen getroffene Annahme Gaußscher Querprofile.

Für die Blasenschlupfgeschwindigkeit  $\Delta u_b$  ergaben die Messungen [9] im gesamten Luftschleier einen annähernd konstanten Wert von ( $\Delta u_b = 0,35 \text{ m/s}$ ) mit ( $0,3 \text{ m/s} \leq \Delta u_b \leq 0,4 \text{ m/s}$ ) ohne signifikante Abhängigkeit vom Luftstrom und der Wassertiefe. Der Einmischkoeffizient  $\alpha$  und das Breitenverhältnis  $\lambda$  steigen mit zunehmendem Luftstrom an und nähern sich asymptotisch den Werten für den einphasigen Auftriebsstrahl (Bild 8). Der Druckkorrekturfaktor  $R$  hat ohne Luftstrom ( $q_0 = 0$ ) den Wert 1 und nimmt mit steigender Luftmenge kontinuierlich ab.

Mit den so ermittelten empirischen Beiwerten konnten die Bestimmungsgleichungen (1) bis (3) numerisch integriert werden. Hierzu wurde das Programmpaket (SLDGL) des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe verwendet. Die numerisch ermittelten Werte für die Achsgeschwindigkeit, die Strahlbreite und die Achskonzentration ergab in allen untersuchten Fällen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten. Darüberhinaus konnten auch die Messungen von Bulson [2], die bei zehnfachem Luftstrom und zehnfacher Wassertiefe (gegenüber den eigenen Experimenten) durchgeführt wurden, mit dem numerischen Modell verifiziert werden.

In Bild 9 sind diese Berechnungen exemplarisch für einen Luftdurchsatz von ( $q_0 = 0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ ) im Vergleich mit experimentellen Daten dargestellt. Die Berechnungen erfolgten dabei sowohl ausgehend von einem reinen Auftriebsstrahl (Anfangsgeschwindigkeit  $u_{a0} \approx 0$ ) als auch für einen Auftriebsstrahl mit Anfangsimpuls (Anfangsgeschwindigkeit  $u_{a0} = 1 \text{ m/s}$ ). Zur Verdeutlichung des Einflusses der Boussinesq-Hypothese und des Druckfeldes wurden die Berechnungen nicht nur mit dem vollständigen Gleichungssystem, sondern auch ohne Berücksichtigung des Druckfeldes und unter Zuhilfenahme der Boussinesq-Hypothese durchgeführt.

Erwartungsgemäß ergibt sich, daß die Berechnungen mit dem kompletten System am besten mit den Meßwerten übereinstimmen. Hierbei treten zwar je nach Wahl der An-

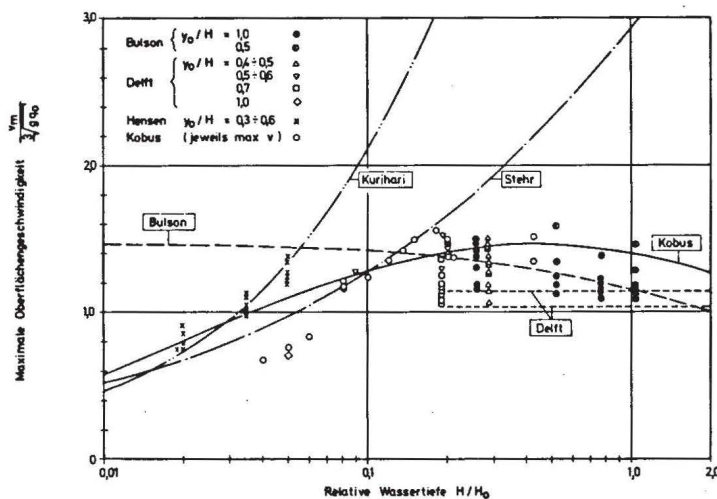


Bild 10: Maximale Oberflächengeschwindigkeit als Funktion von Luftstrom und Wassertiefe

fangsgeschwindigkeit im Anlaufbereich des Strahls unterschiedliche Abweichungen auf, die jedoch mit größerer Entfernung vom Strahlursprung schnell geringer werden. Ebenso zeigt sich, daß die Abweichungen durch die Anwendung der Boussinesq-Hypothese nur im Strahlanlaufbereich von Bedeutung sind. Demgegenüber ergeben sich deutliche systematische Abweichungen (stets zu größeren berechneten Geschwindigkeiten) gegenüber den Meßergebnissen, wenn bei der Berechnung der Achsgeschwindigkeit das nicht-hydrostatische Druckfeld unberücksichtigt bleibt.

Da die von einem Luftschleier induzierte Oberflächengeschwindigkeit aus der Achsgeschwindigkeit ermittelt werden kann, sind in Bild 10 Messungen und Näherungslösungen verschiedener Autoren für die Oberflächengeschwindigkeit eines Luftschleiers in ruhendem Medium dargestellt. Hierbei zeigt die in [6] erarbeitete Näherungslösung eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten im gesamten Wassertiefenbereich (bis 10 m), so daß auch die Extrapolation auf noch größere Wassertiefen möglich erscheint. Demgegen-



über zeigen alle anderen Lösungen nur für begrenzte Wassertiefenbereiche brauchbare Übereinstimmung mit den Meßwerten.

## 5 Luftschleier in Querströmung

Technische Luftschleieranlagen müssen in einer Reihe von Anwendungsfällen im Bereich von Querströmungen oder windinduzierten Oberflächenströmungen eingesetzt werden. Zur Bemessung derartiger Anlagen muß daher der Einfluß einer Querströmung auf das Strömungsfeld eines Luftschleiers bekannt sein.

Wird dem Auftriebsstrahl eine Querströmung überlagert, dann bewirkt diese eine Auslenkung des Blasenstroms in Strömungsrichtung. Von dieser „Querversetzung“ des Blasenstroms bleibt der induzierte Vertikaltransport von Wasser durch den Luftschleier in erster Näherung unberührt bzw. wird eher intensiviert, da die effektive Blasensteiggeschwindigkeit durch die Querströmung abgemindert wird und deshalb die Einwirkzeit der einzelnen Blasen und damit die Gesamtauftriebskraft des Blasenstroms erhöht wird. Für Luftschleieranlagen, deren Wirkung auf der Kontaktzeit zwischen Luftblase und Wasser beruht (Anlagen zur Sauerstoffanreicherung) kann demnach eine Querströmung allenfalls einen positiven Effekt erbringen. Die resultierende Oberflächenströmung hingegen wird von einer Querströmung sehr wesentlich beeinflusst. Für pneumatische Ölsperren, die aufgrund der induzierten Oberflächenströmung als Sperre über einen Querschnitt wirken, ist deshalb der Einfluß einer Querströmung von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen das Strömungsfeld über einer Düsenreihe unter der Wirkung einer Querströmung untersucht, wobei insbesondere der Frage Aufmerksamkeit geschenkt wurde, wie sich diese auf die Geschwindigkeit an der Oberfläche entgegen der Querströmungsrichtung auswirkt [7].

Im ruhenden Gewässer wird die vom Luftschleier erzeugte maximale Oberflächengeschwindigkeit  $v_m$  mit guter Näherung beschrieben durch die hypothetische Achsgeschwindigkeit die bei Abwesenheit der Oberfläche dort vorhanden wäre. Diese maximale Oberflächengeschwindigkeit wird in einem seitlichen Abstand von der Luftschleierebene erreicht, der etwa der nominellen Strahlbreite entspricht. Vom Staupunkt bis zu diesem Abstand nimmt die Oberflächengeschwindigkeit rasch zu, mit größer werdendem Abstand allmählich wieder ab (Bild 2).

In Bild 11 sind die gemessenen Stromlinienbilder eines Luftschleiers für einen konstanten Durchsatz bei verschiedenen Quergeschwindigkeiten wiedergegeben. Deutlich erkennbar ist hierbei der mit steigender Quergeschwindigkeit  $u_H$  abnehmende Anteil der stromaufwärts gerichteten Oberflächenströmung. Die vom Luftschleier induzierte maximale Oberflächengeschwindigkeit  $v_m$  entgegen der Querströmung läßt sich nach [6] näherungsweise durch folgende empirische Beziehung beschreiben:

$$\frac{v_m}{\sqrt[3]{g q_0}} = \frac{v_m(u_H = 0)}{\sqrt[3]{g q_0}} - \frac{5}{3} \frac{u_H}{\sqrt[3]{g q_0}} \quad (7)$$

Eine stromaufwärts gerichtete Oberflächengeschwindigkeit ergibt sich demnach nur für Luftdurchsätze, die im ruhenden Medium eine Oberflächengeschwindigkeit von  $5/3$  der Horizontalgeschwindigkeit erreichen würden.

## 6 Anwendungen

### 6.1 Preßluft-Ölsperren

Pneumatische Ölsperren bestehen aus einem üblicherweise an der Gewässersohle verlegten, mit Preßluft beschickten Düsenrohr, das heißt aus einer Luftschleieranlage. Die so-

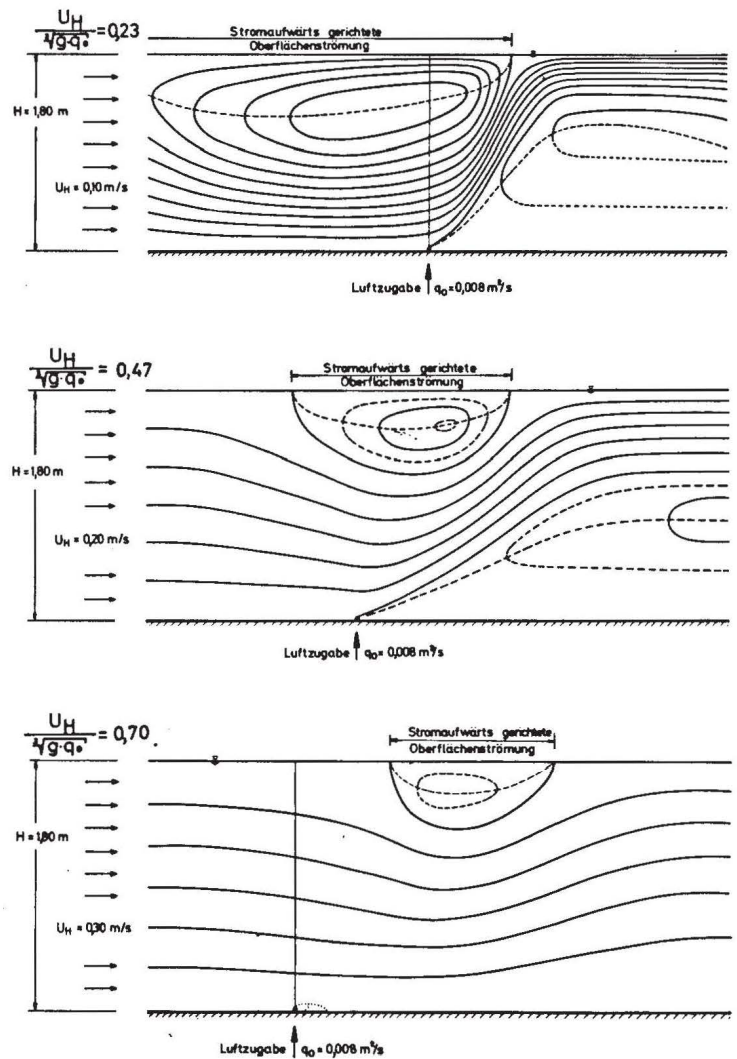


Bild 11: Stromlinienbilder eines Luftschleiers in einer Querströmung

fortige Einsatzbereitschaft, der geringe Bedienungsaufwand, die Funktionsfähigkeit auch bei Brandfällen und die Möglichkeit, auch im Betrieb die Preßluftölsperren mit Booten oder Schiffen zu durchfahren, sind wesentliche Vorteile dieser Ölsperrenart gegenüber den mechanischen Sperren.

Zur Bemessung einer Preßluftölsperre muß zunächst aus dem maximal zurückzuhaltenden Ölvolumen und der Oberfläche des abzusperrenden Gebiets die Schichtdicke  $D$  des zurückzuhaltenden Ölfilms ermittelt werden. Nach [6] kann dann bei bekannter Dichte  $\rho_M$  und Oberflächenspannung  $\sigma_M$  des Mineralöls die erforderliche Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  zur Zurückhaltung der Ölschicht der Dicke  $D$  ermittelt werden. Die vom Luftschleier erzeugte maximale Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  läßt sich ebenfalls anhand der in [6] gegebenen Lösungen einfach berechnen. Diese maximale Oberflächengeschwindigkeit stellt jedoch einen zeitlichen Mittelwert dar, der erheblichen Schwankungen unterworfen sein kann. Die Bemessungsoberflächengeschwindigkeit  $v_M$  muß daher um einen Sicherheitsfaktor  $\epsilon$  höher liegen als die erforderliche Sperrgeschwindigkeit  $v_s$ , damit die Sperre zu keinem Zeitpunkt vom Öl überflutet werden kann. Für den praktischen Betrieb kann ein Sicherheitsfaktor von  $\epsilon = 1,5$  als angebracht betrachtet werden.

Darüber hinaus müssen gegebenenfalls weitere Sicherheitszuschläge für die durch Windgeschwindigkeit verursachte Öldrift gemacht werden und der Einfluß einer evtl. vorhandenen Quergeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Mit Hilfe des in Bild 12 wiedergegebenen Nomogramms zur Auslegung von Preßluftölsperren können diese auf einfache Weise für praktische Anwendungszwecke bemessen werden.



# ANWENDUNGEN FÜR LUFTSCHLEIERANLAGEN :

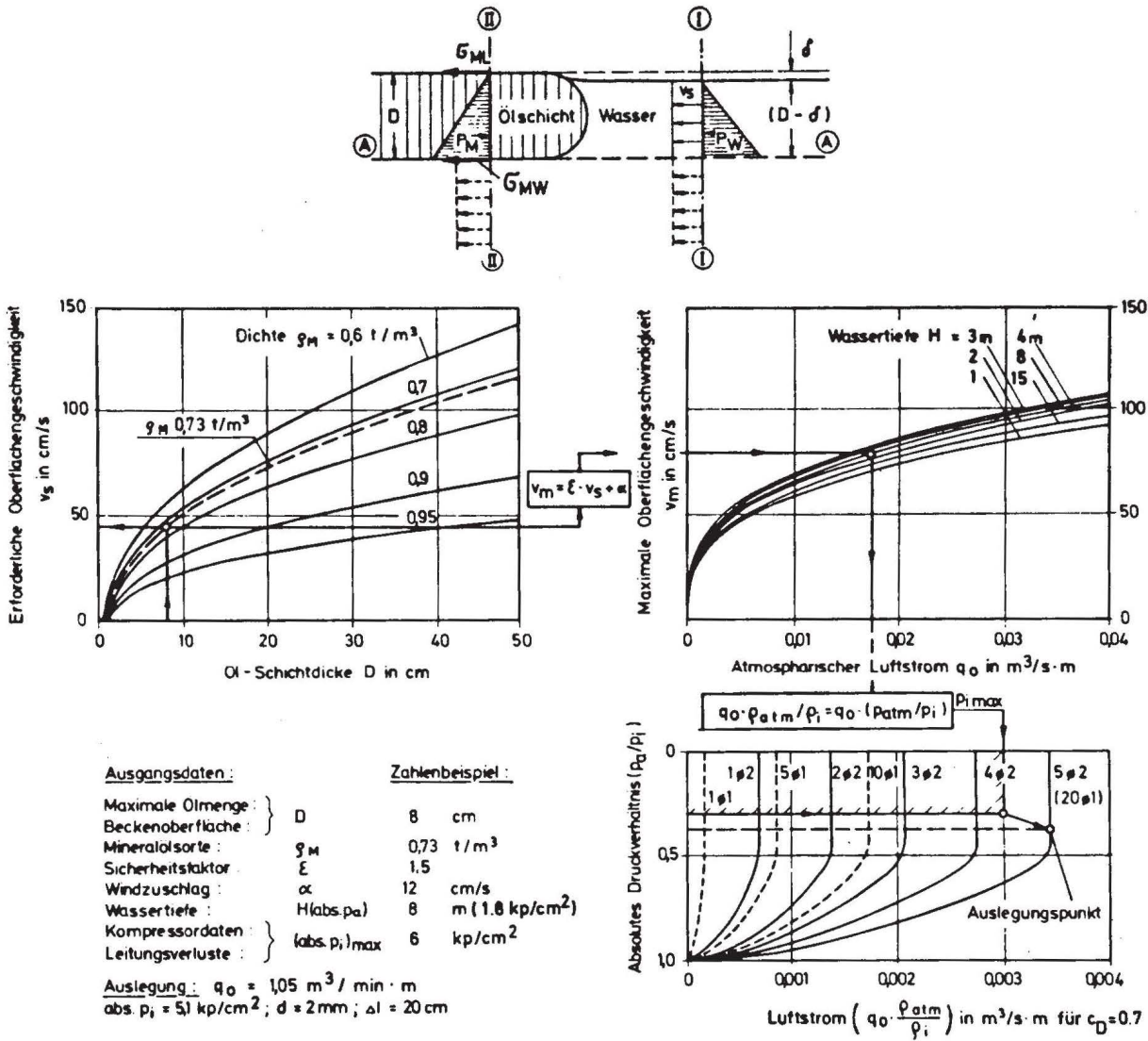


Bild 12: Nomogramm zur Auslegung von Preßluft-Ölsperren

## 6.2 Sauerstoffeintrag in Gewässer

Durch die Verschmutzung der Oberflächengewässer und die damit verbundene Erhöhung des Sauerstoffverbrauchs, bei teilweise verringerter Sauerstoffaufnahme, können starke Störungen des Sauerstoffgehalts natürlicher Gewässer auftreten. Die Wiederherstellung oder Erhaltung zufriedenstellender Sauerstoffverhältnisse erfordert daher in Engpaßsituationen den Einsatz künstlicher Belüftungsmaßnahmen. Neben einer Reihe anderer Anlagen wie zum Beispiel Wehre, Schußrinnen, Turbinenbelüfter, mechanische Oberflächenbelüfter, usw., bietet sich der Luftschleier als eine effiziente Belüftungsmethode an.

Wegen der stark schwankenden Angaben zum Wirkungsgrad existierender Luftschleieranlagen zur Gewässerbelüftung wurden systematische Laborversuche zur künstlichen Sauerstoffanreicherung in Fließgewässern unter Verwendung von Druckluft und Sauerstoff durchgeführt sowie der Sauerstoffeintrag in stehende Gewässer in einer Modellfamilie (3 Standzylinder verschiedener Größe) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in [10] zusammengefaßt. Werden alle experimentelle Ergebnisse auf ein einheitliches Sauerstoffdefizit (im allgemeinen 100%) und auf eine einheitliche Temperatur (20°C) umgerechnet – dies ist notwendig, um defizit- bzw. temperaturbedingte Unterschiede zu eliminieren – ergeben sich folgende Erkenntnisse zum Sauerstoffeintrag mit Luftschleieranlagen.

Der Sauerstoffeintrag in Fließgewässer hängt ab vom Luftdurchsatz, der Wassertiefe und der Strömungsgeschwindigkeit. Die Sauerstoffausnutzung nimmt mit der Aufenthaltszeit der Gasblasen, das heißt mit der Wassertiefe linear zu. Sie wächst mit zunehmender Querströmungsgeschwindigkeit und mit abnehmendem Luftdurchsatz. Feinporige Filterplatten liefern wegen der Art der Blasenbildung (kleinere Blasen) einen wesentlich höheren Sauerstoffeintrag als Düsenrohre. Bei kleinen Luftdurchsätzen (unter 40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·h) ergeben sie eine zwei- bis dreifache Steigerung der Sauerstoffausnutzung. Änderungen des Düsendurchmessers, des Düsenabstands oder der Düsenorientierung wirken sich hingegen auf den Sauerstoffeintrag nicht signifikant aus.

Die Sauerstoffausnutzung pro Höheneinheit liegt für reinen Sauerstoff in derselben Größenordnung wie für Luft. Das heißt, bei gleichem Volumenstrom können mit Sauerstoffbegasung erheblich größere Eintragsraten erzielt werden: entsprechend dem Sauerstoffanteil der Luft von ca. 20% ergibt sich ein Faktor von rund 5.

Luftschleieranlagen bieten insbesondere bei der Sauerstoffanreicherung in stehenden Gewässern erhebliche Vorteile gegenüber anderen Belüftungsmethoden. Dies konnte eindrucksvoll bei der Sauerstoffanreicherung des Baldegger Sees (Oberfläche ca. 12 km<sup>2</sup>, maximale Wassertiefe 65 m) im Kanton Luzern/Schweiz bewiesen werden. Diese Seebelüftung, die nach den hier gegebenen Bemessungsgrundlagen



konzipiert wurde und an der die Autoren beratend mitwirkten, ist seit zwei Jahren in Betrieb, wobei derzeit ca. 4 Tonnen Sauerstoff pro Tag in den See eingetragen werden. Bei dieser Anlage wird im Sommerhalbjahr durch Betrieb mit reinem Sauerstoff das Hypolimnion des Sees mit Sauerstoff angereichert. Hierbei wird der eingeblasene Sauerstoff praktisch vollständig (über 99,9%) aufgenommen, wobei die Dichteschicht des Sees vollständig erhalten bleibt. Im Winterhalbjahr wird die Anlage (mit anderen Diffusoren) bei wesentlich größeren Durchsätzen mit Preßluft betrieben, wobei die dann induzierte Auftriebsstrahlströmung zur Vertikaldurchmischung beiträgt. Auf diese Weise wird das sauerstoffarme Tiefenwasser an die Oberfläche gebracht, wobei die durchgeführten Messungen eine nahezu gleichmäßige Sauerstoffverteilung im gesamten See zeigen.

## 7 Schlußfolgerungen

Das Strömungs- und Konzentrationsfeld zweiphasiger Auftriebsstrahlen, die durch Luftblasen erzeugt werden, wurde theoretisch und experimentell eingehend untersucht. Dies machte die Entwicklung neuer Meßverfahren für Blasengröße, -konzentration und -steiggeschwindigkeit erforderlich. Unter Verwendung der empirisch ermittelten Beiwerte läßt sich das Strömungs- und Konzentrationsfeld mit einem numerischen Modell berechnen, in dem die Abweichung des Druckfeldes von der hydrostatischen Druckverteilung sowie die Dichteänderungen in den Trägheitsgliedern mitberücksichtigt werden.

Für praktische Bemessungsaufgaben wurden explizite Näherungslösungen erarbeitet, mit deren Hilfe technische Luftschleieranlagen sicher dimensioniert werden können. Im Zuge des Gewässerschutzes finden Luftschleieranlagen zunehmend Anwendung, wobei neben dem Einsatz als pneumatische Ölsperre vor allem auch die künstliche Belüftung stehender Gewässer Bedeutung gewinnt.

## Schrifttum

- [ 1 ] Rouse, H., Yih, C.S., H.W. Humphreys: Gravitational Convection from a Boundary Source, *Tellus* 4, 1952
- [ 2 ] Bulson, P.S.: Currents Produced by an Air Curtain in Deep Water, Dock and Harbour Authority, Vol. 42, No. 487, May 1961, London, England
- [ 3 ] Abraham, G.: Jet Diffusion in Stagnant Ambient Fluid, Delft Hydraulics Laboratory, Publ. No. 29, 1963
- [ 4 ] Cederwall, K., 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
- [ 5 ] Todtenhaupt, E.: Blasengrößenverteilung in technischen Begasungsapparaturen, *Chemie-Ingenieur-Technik (CIT)* 43, Nr. 6, 1971
- [ 6 ] Kobus, H.: Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Luftschleier im Wasserbau, Erich Schmidt Verlag 1973
- [ 7 ] Kobus, H., H. Konekamp, B. Barczewski: Experimentelle Ermittlung des von einem Luftschleier in einer Querströmung erzeugten Strömungsfeldes, Bericht Nr. ET/18, SFB 80, Universität Karlsruhe, Dezember 1974
- [ 8 ] Brevik, J.: Two Dimensional Air-Bubble Plume, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE* Vol. 103, 1977
- [ 9 ] Barczewski, B.: Neue Meßverfahren für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen, Dissertation, Universität Karlsruhe und Mitteilungsheft 45, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1978
- [ 10 ] Kobus, H.: Gesetzmäßigkeiten der Modelldarstellung von Anlagen zur Sauerstoffanreicherung, Bericht Nr. HWV 015, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1980

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. Helmut *Kobus*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80  
 Dr. Ing. Baldur *Barczewski*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80