

Wissenschaftlicher Bericht  
Nr. 80/5 (HWV 015)

GESETZMÄSSIGKEITEN DER MODELLDARSTELLUNG  
VON ANLAGEN ZUR SAUERSTOFFANREICHERUNG

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben DFG Ko 528/1 und 3

Beihilfeempfänger: Prof. Dr. H. Kobus  
Bewilligung: 27.3.75 (Ko 528/1)  
25.4.75 (Ko 528/3)  
Sachbearbeiter: Dr. Markofsky  
(Sept. 75 bis Jan. 78)  
Bearbeitungszeitraum: 1975 - 1979

Stuttgart, im Dezember 1979



(Prof. Dr. H. Kobus)

## INHALTSVERZEICHNIS

### Inhaltsverzeichnis

### Verzeichnis der Bilder

1. TÄTIGKEITSBERICHT
2. GESETZMÄSSIGKEITEN DES SAUERSTOFFEINTRAGS
  - 2.1 Einflußgrößen
  - 2.2 Modellgesetze
    - 2.2.1 Lufteintrag
    - 2.2.2 Strömungstransport des Blasenstroms
    - 2.2.3 Stoffübergang
  - 2.3 Eintragswirkung von Anlagen zur Sauerstoffanreicherung
3. SAUERSTOFFEINTRAG AN WEHREN
  - 3.1 Parameterdarstellung der Eintragswirkung
  - 3.2 Labor- und Modellmessungen am Wehr Wendlingen
  - 3.3 Sauerstoffeintrag an Wehranlagen
4. LUFTBLASENSCHLEIER IN FLIESSGEWÄSSERN
  - 4.1 Parameterdarstellung der Eintragswirkung
  - 4.2 Sauerstoffeintrag durch Luftblasenschleieranlagen
5. LUFTBLASENSCHLEIER IN STEHENDEN GEWÄSSERN
  - 5.1 Ergebnisse der Sauerstoffeintragsmessungen
  - 5.2 Messung der Blasengrößen
  - 5.3 Erkenntnisse aus der Modellfamilie
6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### Literaturhinweise

VERZEICHNIS DER BILDER

- 1 Sauerstoffanreicherung durch Überfallwehre -  
Definitionsskizze
- 2 Nomogramm für Sauerstoffanreicherung durch Überfallwehre
- 3 Relative Vertikalposition des Aufreißpunkts für kreis-  
runde Strahlen (Meßdaten von Hutarew [3])
- 4 Das Wehr Wendlingen mit Sprungnasen in Betrieb  
( $Q \approx 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $B = 52 \text{ m}$ ) (Foto aus Hutarew [3])
- 5 Naturmeßdaten zum Sauerstoffeintrag am Wehr  
Wendlingen (aus Hutarew [3])
- 6 Sauerstoffeintrag durch zweidimensionale Luftblasen-  
schleier in einer Querströmung
- 7 Vergleich der Eintragswirkung bei Verwendung von  
Luft und Sauerstoffgas
- 8 Korrelation der Sauerstoffeintragsdaten in Stand-  
zylindern unterschiedlicher Größe
- 9 Prinzip der elektrooptischen Blasengrößenmessung mit  
Absaugsonden (aus Barczewski [7])
- 10 Blasengrößen-Häufigkeitsverteilung bei  $q_a = 4 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$   
für verschiedene Filtermaterialien
- 11 Blasengrößen-Häufigkeitsverteilung bei  $q_a = 15 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$   
für verschiedene Filtermaterialien
- 12 Vergleich der Blasendurchmesser bei verschiedenen Filter-  
materialien

## 1. TÄTIGKEITSBERICHT

Der vorliegende Bericht faßt abschließend die Arbeiten des Forschungsprojekts Ko 528/1 und 3 zusammen. Dieses Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunkts "Gewässererwärmung" gefördert. Der Umfang des ursprünglich beantragten Vorhabens war auf 3 Jahre vorgesehen. Aufgrund verschiedener Entwicklungen während der Bearbeitung des Projekts und nicht zuletzt wegen der vorzeitigen Beendigung des Schwerpunktprogramms "Gewässererwärmung" wurde jedoch die Förderung auf eine Gesamtdauer von 2 Jahren und 4 1/3 Monaten beschränkt und von der Beantragung einer weiteren Fortsetzung des Vorhabens abgesehen.

Der Förderungsantrag für das vorliegende Forschungsvorhaben wurde am 28.7.1972 bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingereicht. Aufgrund einer Beurlaubung des Antragstellers im Akademischen Jahr 1973/74 zur Wahrnehmung eines Forschungsaufenthalts in den USA wurde der Antrag jedoch zunächst zurückgestellt und erst nach Ablauf des Auslandsaufenthalts bewilligt (Bewilligungsschreiben vom 27.3.1975). Die Arbeiten wurden mit Einstellung von Herrn Dr. Mark Markofsky als Sachbearbeiter am 20. September 1975 in Angriff genommen und im wesentlichen an der Universität Karlsruhe am Institut für Hydromechanik durchgeführt. Herr Dr. Markofsky schied am 31.1.1978 aus dem Projekt aus.

Im August 1977 verließ der Antragsteller das Karlsruher Institut für Hydromechanik, um einem Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Hydromechanik und Wasserbauliches Versuchswesen an der Universität Stuttgart zu folgen. Aufgrund dieses Wechsels ergab sich eine Verzögerung der abschließenden Arbeiten des Forschungsvorhabens, die an der Universität Stuttgart unter zeitweiliger Mitwirkung von Dipl.Ing. P. Müller durchgeführt wurden.



Die zeitliche Reihenfolge der Bearbeitung der einzelnen Unterpunkte des Arbeitsprogramms, wie es im ursprünglichen Antrag dargestellt wurde, wurde während der Bearbeitung aus Zweckmäßigkeitsgründen verändert. Die Gründe hierfür wurden in den ersten beiden Fortschrittsberichten des Vorhabens dargelegt. Das durchgeführte Arbeitsprogramm enthält folgende Abschnitte:

- (1) Modellgesetzmäßigkeiten der Wehrbelüftung:  
Dimensionsanalyse und Auswertung aller verfügbaren Modell- und Naturmeßdaten aus der Literatur.
- (2) Luftblasenschleier in strömendem Wasser:  
Systematische Laborversuche zur künstlichen Sauerstoffanreicherung in Fließgewässern unter Verwendung von Druckluft und Sauerstoffgas, sowie Auswertung der verfügbaren Literaturdaten über Labor- und Naturmessungen.
- (3) Luftblasenschleier in stehenden Gewässern:  
Systematische Labormessungen an einer Modellfamilie unterschiedlicher Dimensionen.

Diese Untersuchungen umfassen das gesamte ursprüngliche Arbeitsprogramm. Allerdings konnte die ursprünglich geplante abschließende Erweiterung der Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten der Modelldarstellung auch auf beliebige andere Arten des künstlichen Sauerstoffeintrags aufgrund der verkürzten Laufzeit des Projekts nur zum Teil - d.h. im Hinblick auf Wehranlagen - realisiert werden.

Während der Bearbeitung des Vorhabens waren wir stets bemüht, Gedanken- und Erfahrungsaustausch mit Forschungsinstitutionen im In- und Ausland zu suchen, die an ähnlichen Fragestellungen arbeiten. Im Sinne der ursprünglich vorgesehenen engen Zusammenarbeit mit Professor Mosonyi haben wir diesem stets unsere Zwischenberichte und Veröffentlichungen übergeben.

Mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, die umfangreiche Naturmessungen zur künstlichen Belüftung durchgeführt hat, bestehen enge Kontakte. Sehr befruchtend hat sich auch die Kooperation mit Professor Novak von der University of Newcastle upon Tyne in Großbritannien ausgewirkt, an dessen Institut Arbeiten zum künstlichen Sauerstoffeintrag an Überfallwehren und Schleusen durchgeführt werden. An der dort entstandenen Dissertation von Herrn Avery war der Antragsteller als Korreferent mitbeteiligt. Die am Stuttgarter Wasserbauinstitut unter meinem Vorgänger Professor Petrikat durchgeführten Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag an Wehren wurden ebenfalls weiterverfolgt und in die Auswertungen mitbezogen.

Die in unserem Forschungsvorhaben durchgeführten Arbeiten gaben schließlich mit Anlaß zur Durchführung eines Symposiums des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) mit dem Thema "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse". Dieses Symposium fand am 8. Juni 1979 in Darmstadt statt. Der Antragsteller war an der organisatorischen Leitung mitbeteiligt, und Teil unserer Untersuchungsergebnisse wurden von Herrn Dr. Markofsky in einem Vortrag vorgestellt.

Unsere Arbeiten im Forschungsvorhaben Ko 528/1 und 3 fanden ihren Niederschlag in insgesamt 6 Veröffentlichungen:

1. M. Markofsky und H. Kobus: "A Unified Presentation of Weir-Reaeration Data", ASCE-Journal of Hydraulics Division, April 1978.
2. M. Markofsky und H. Kobus: "On the Modelling of Artificial Reoxygenation", Proceedings, IAHR-Congress, Baden-Baden, 1977.
3. M. Markofsky: "On the Reoxygenation Efficiency of Diffused Air-Aeration", IAWPR-Conference on Aeration, Amsterdam, September 1978.

4. M. Markofsky: "On the Scaling of Laboratory Oxygenation Studies", Proceedings, 26.th ASCE Hydraulics Division Conference August 1978.
5. M. Markofsky: "Flußwasserbelüftung mit Druckluft und Sauerstoff", Kap. 4 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft 49 des DVWK (wird 1980 erscheinen)
6. H. Kobus: "Zur Problematik der Erfassung des künstlichen Sauerstoffeintrags", Kap. 1 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft 49 des DVWK (wird 1980 erscheinen)

Darüber hinaus wurden der Deutschen Forschungsgemeinschaft vor dem vorliegenden Abschlußbericht bereits drei Fortschrittsberichte vorgelegt, welche im wesentlichen die in den Veröffentlichungen enthaltenen Daten sowie detaillierte Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen enthalten.

Es sind dies die Berichte:

1. H. Kobus und M. Markofsky: "Zur Frage der Übertragbarkeit bei Modelluntersuchungen des Sauerstoffeintrags in Gewässer", Bericht Nr. 527, Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe, Juli 1976.
2. H. Kobus und M. Markofsky: "Laboruntersuchungen zur Frage der Sauerstoffanreicherung durch Luftschleieranlagen", Bericht Nr. 532, Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe, September 1976.
3. H. Kobus und M. Markofsky: "Diffuser Air-Aeration in Still Water. Study of Scale Effects", Bericht Nr. 552, Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe, Mai 1978.



## 2. GESETZMÄSSIGKEITEN DES SAUERSTOFFEINTRAGS

### 2.1 Einflußgrößen

Der Prozeß des technischen Sauerstoffeintrags in natürliche Gewässer ist deshalb äußerst komplex, weil er sowohl von den Strömungsbedingungen als auch von der Wasserbeschaffenheit sowie von der Temperatur und den Sättigungsverhältnissen der Anströmung abhängt. In einem natürlichen Gewässer sind alle diese Größen äußerst unterschiedlich und tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Sie hängen nicht nur von den jeweiligen hydrologischen und meteorologischen Gegebenheiten ab, sondern auch von der vorgegebenen Schmutzstoffbelastung, von den chemisch-biologischen Selbsteinigungsprozessen im Gewässer sowie von der natürlichen Wiederbelüftung durch die Wasseroberfläche.

Will man den Vorgang des technischen Sauerstoffeintrags im Detail betrachten, dann müssen solche Schwankungen der Randbedingungen zunächst außer Betracht bleiben. Unter vorgegebenen "Standardbedingungen" hinsichtlich Abfluß, Wasserbeschaffenheit und Temperatur sowie Sauerstoffdefizit der Anströmung läßt sich der Sauerstoffeintrag als eine Abfolge folgender Prozesse beschreiben:

- (1) Mechanischer Eintrag von Luft in das Wasser durch Einsatz von Energie. Bei dem Einblasen von Druckluft oder Sauerstoff wird externe Energie aufgewendet, um das Gas über Düsen- bzw. Filterrohre in Form von Blasen im Wasser zu verteilen. Hierbei wird die Größe des zugeführten Luftvolumenstroms extern durch die Leistung der Druckluftanlage vorgegeben. Hingegen wird beim bauwerksbedingten Lufteintrag - z.B. an Wehren - die Energie des Fließgewässers ausgenutzt, um Luftblasen hydromechanisch dem Gewässer zuzuführen. Hierbei

hängt der zugeführte Luftvolumenstrom von der verfügbaren Strömungsenergie (Abfluß und Fallhöhe) sowie von der geometrischen Gestaltung des Bauwerks ab.

- (2) Strömungstransport der Gasblasen im Gewässer. Je nach Art der Luftzufuhr (Düsenrohre, Filterplatten, eintauchender Wasserstrahl etc.) entsteht ein Gemisch von Gasblasen unterschiedlicher Größe, welches von der Strömung mittransportiert wird. Hierbei können große Blasen in zahlreiche kleinere zerfallen, oder kleinere Blasen koaleszieren. Die resultierende Blasengrößenverteilung hängt mit ab von
- a) der zufolge Blasenbewegung induzierten Turbulenz im Wasser-Luft-Gemisch,
  - b) der Wasserbeschaffenheit (insbesondere Oberflächenspannung und Zähigkeit),
  - c) der vorgegebenen Turbulenz der Gewässerströmung.
- (3) Stoffübergang von der Blase in das Wasser. Während des Strömungstransports der Gasblasen vom Augenblick des Eintrags bis zum Wiederaustritt aus dem Gewässer erfolgt an den Grenzflächen zwischen Luft- bzw. Sauerstoffblasen und Wasser der physikalische Stoffübergang, welcher in erster Linie vom örtlichen Konzentrationsgradienten zwischen Blase und Wasser abhängt. Dieser ist proportional dem jeweiligen Sauerstoffdefizit (Differenz zwischen dem Sättigungswert und der Sauerstoffkonzentration). Bei gleichem Defizit wird der Stoffübergang zusätzlich beeinflusst durch die chemische Beschaffenheit der Grenzfläche; er ändert sich demnach mit der Beschaffenheit des Wassers und liegt bei stark verunreinigtem Wasser erheblich niedriger als bei Reinwasser.



## 2.2 Modellgesetze

Quantitative Untersuchungen der Selbstbelüftung und des Sauerstoffeintrags in Gewässer sind komplexer Natur. Man ist daher stark auf den Einsatz von Laborversuchen bei kleinen Maßstäben angewiesen. Zur Verallgemeinerung der so gewonnenen Erkenntnisse ist es notwendig, die Modellgesetze solcher Vorgänge zu untersuchen, um herauszufinden, wie die Meßergebnisse auf andere geometrische Abmessungen übertragen werden können. Es wird häufig argumentiert, daß die resultierenden Blasen bei Selbstbelüftungsvorgängen in Modell und Natur stets etwa dieselbe Absolutgröße aufweisen. Dies bedeutet eine Verletzung der Forderung nach geometrischer Ähnlichkeit insofern, als das Verhältnis von Blasendurchmesser zur Bauwerksabmessung nicht konstant bleibt, und außerdem eine Verletzung der Forderung nach kinematischer Ähnlichkeit, da auch die Blasensteiggeschwindigkeit im Absolutwert in Modell und Natur gleich bleiben würde, so daß sich das Verhältnis von Blasensteiggeschwindigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit des Wassers vom kleinmaßstäblichen Modell zur Natur verändern würde.

Die Modellgesetze für eine perfekte Ähnlichkeit des Lufteintrags, der Strömung von Gasblasen und Wasser sowie des Stoffübergangs lassen sich mit Hilfe von dimensionsanalytischen Betrachtungen herleiten. Obwohl eine perfekte Ähnlichkeit dieser Vorgänge im kleinmaßstäblichen Modell aus technischen Gründen nicht realisiert werden kann, ist eine Betrachtung der vollständigen Modellgesetze äußerst nützlich, da sie einerseits die Grundlage für eine geeignete allgemeingültige Parameterdarstellung experimenteller Ergebnisse in dimensionsloser Form liefert, und andererseits auch eine rationale Basis abgibt zur Erklärung der unterschiedlichen Resultate aus Natur- und Labormessungen. Sie liefert somit den Ausgangspunkt zur Erklärung der beobachteten

Maßstabeffekte und zu einer Quantifizierung von Übertragungskriterien vom Modell auf die Natur.

### 2.2.1 Lufteintrag

Betrachtet man eine technische Sauerstoffanreicherungsanlage mit einer charakteristischen Längenabmessung  $L$  (z.B. Wassertiefe, Wehrhöhe o.ä.) und einer charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit  $U$  des Gewässers, dann erhält man folgende generelle Beziehungen.

Für den eingetragenen Luftstrom  $Q_a$  und den resultierenden charakteristischen Blasendurchmesser  $d_b$  gilt (siehe [1]):

$$\left. \begin{matrix} Q_a \\ d_b \end{matrix} \right\} = f_{1,2} (U; L; \rho_w; g; \mu_w; \sigma_{WL}; \text{Anlagengeometrie}) \quad (1)$$

wobei  $\rho_w$ ,  $\mu_w$  und  $\sigma_{WL}$  die Dichte, Zähigkeit und Oberflächenspannung des Wassers angeben und  $g$  die Erdbeschleunigung ist. Eine Dimensionsanalyse führt zu der Parameterbeziehung

$$\left. \begin{matrix} Q_a / (UL^2) \\ d_b / L \end{matrix} \right\} = F_{1,2} \left( \frac{U}{\sqrt{gL}}; \frac{\rho_w UL}{\mu_w}; \frac{U}{\sqrt{\sigma_{WL}/\rho_w L}}; \text{Geom.} \right) \quad (2)$$

$$= \bar{F}_{1,2} (Fr; Re; We; \text{Geometrie})$$

Perfekte Ähnlichkeit des Vorgangs des Lufteintrags würde demnach gleiche Zahlenwerte der Froudezahl, Reynoldszahl und Weberzahl in der Natur und im geometrisch ähnlichen Modell erfordern. Wenn jedoch auch im Modell Wasser verwendet wird, kann nur eine dieser Größen (in der Regel die Froudezahl) durch entsprechende Wahl der Modellgeschwindigkeit eingehalten werden, während die anderen beiden zwangsweise unterschiedliche Natur- und Modellwerte aufweisen.

Alternativ kann der Flüssigkeitsparameter  $Z$  eingeführt werden, der definiert ist gemäß [1] zu

$$Z \equiv \frac{g \cdot \rho_w^4}{\rho_w \cdot \sigma_{wl}^3} \quad (3)$$

Diese dimensionslose Kenngröße charakterisiert die jeweilige Flüssigkeit, ohne den Blasendurchmesser oder eine Geschwindigkeit zu enthalten. Für Wasser vorgegebener Beschaffenheit und Temperatur nimmt  $Z$  demnach einen konstanten Zahlenwert an. Somit gilt alternativ zu Gl (2)

$$\left. \begin{array}{l} Q_a / (UL^2) \\ d_b / L \end{array} \right\} = F_{3,4} \text{ (Fr; Re; Z; Geometrie)} \quad (4)$$

und für eine Anlage vorgegebener Geometrie reduziert sich diese Beziehung unter Standardbedingungen (Wasserbeschaffenheit und -temperatur konstant) zu

$$\left. \begin{array}{l} Q_a / (UL^2) \\ d_b / L \end{array} \right\} = F_{5,6} \text{ (Fr; Re)} \quad (5)$$

Die Reynoldszahl charakterisiert hierbei den Einfluß der Zähigkeit und der Turbulenz auf den Lufteintrag. Da in technischen Anlagen dieser Vorgang stets unter vollturbulenten Verhältnissen erfolgt, ist dieser erste Schritt des Vorganges auch unabhängig von  $Re$  und wird somit eindeutig durch die Froudezahl charakterisiert. Das heißt, daß der Lufteintrag als solcher in kleinmaßstäblichen Modellen nach dem Froudeschen Modellgesetz ähnlich nachgebildet wird, sofern das Modell geometrisch ähnlich ist und in Modell und Natur das gleiche Wasser verwendet wird.



Es läßt sich des weiteren zeigen [1], daß der mechanische Lufteintrag primär von den örtlichen Bedingungen am Ort der Luftaufnahme (z.B. Eintauchpunkt eines Überfallstrahls, Fußpunkt einer Deckwalze) abhängt und demnach unabhängig ist von der Bezugslänge L des Bauwerks. Hieraus erhält man

$$\frac{Q_a}{U^5/g^2} = \text{const.} \quad \text{oder} \quad \beta = \frac{Q_a}{UL^2} = \frac{Q_a}{Q_w} = \text{const.} \quad (\text{Fr}^2) \quad (6)$$

und

$$\frac{d_b}{U^2/g} = \text{const.} \quad (7)$$

Diese Zusammenhänge sind durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen belegt [1]. Solange der Lufteintrag demnach nicht begrenzt wird durch die Bauwerksgeometrie (z.B. die Tiefe des Unterwasserbeckens an Wehranlagen) oder durch die Transportkapazität der Strömung, ist somit der hydro-mechanische Lufteintrag als solcher ausschließlich von der Froudezahl abhängig und kann in kleinmaßstäblichen wasserbaulichen Modellen korrekt nachgebildet werden.

### 2.2:2 Strömungstransport des Blasenstroms

Für den Strömungstransport des Blasenstroms im Gewässer aufgrund der Wasserströmung und der Eigenbewegung der Blasen gelten grundsätzlich dieselben Abhängigkeiten. Die Trajektorie l einer Gasblase oder ihre Verweilzeit T im Gewässer wird demnach durch folgende Beziehung charakterisiert:

$$\left. \begin{array}{l} l/L \\ TU/L \end{array} \right\} = F_{7,8} \quad (\text{Fr}; \text{Re}; Z; \text{Geometrie}) \quad (8)$$

wobei hier wiederum Z die Wasserbeschaffenheit repräsentiert.

In einem geometrisch ähnlichen Modell unter Standardbedingungen (Wasserbeschaffenheit konstant) gilt somit

$$\left. \begin{array}{l} 1/T \\ TU/L \end{array} \right\} = F_{9,10} (Fr; Re) \quad (9)$$

Im Gegensatz zum Lufteintrag, wo der Einfluß der Reynoldszahl in der Regel vernachlässigt werden kann, spielt beim Strömungstransport die Turbulenz und damit die Reynoldszahl eine entscheidende Rolle. Der Blasenstrom wird deshalb in kleinmaßstäblichen Wasserbaumodellen, die nach dem Froudeschen Modellgesetz betrieben werden, in aller Regel nicht ähnlich nachgebildet. Für Sauerstoffanreicherungsanlagen, bei denen der Strömungstransport der Blasen wesentlich ist oder den limitierenden Faktor darstellt, sind demnach Maßstabeffekte und entsprechende Abweichungen zwischen Modell- und Naturmessungen zu erwarten.

### 2.2.3 Stoffübergang

Der Stoffübergang wird beschrieben durch die Erhöhung der Sauerstoffkonzentration des Wassers beim Passieren der Anlage. Die Sauerstoffkonzentrationserhöhung (Differenz zwischen der Konzentration unterstrom und oberstrom)

$$\Delta c = c_{uw} - c_{ow} \quad (10)$$

ist neben den vorgenannten Größen zusätzlich noch abhängig vom Sauerstoffdefizit der Zuströmung (Differenz zwischen Sättigungskonzentration  $c_s$  und Sauerstoffkonzentration oberstrom). Da  $\Delta c$  erwiesenermaßen proportional zum Ausgangsdefizit ist, läßt sich die Eintragswirkung der Anlage charakterisieren durch die dimensionslose Größe

$$\left( 1 - \frac{1}{r} \right) \equiv \frac{c_{uw} - c_{ow}}{c_s - c_{ow}} = \frac{O_2\text{-Konzentrationserhöhung}}{O_2\text{-Defizit oberstrom}} \quad (11)$$

Hierbei ist der Parameter  $r$  definiert als das Defizitverhältnis:

$$r \equiv \frac{c_s - c_{ow}}{c_s - c_{uw}} \quad (12)$$



Das Defizitverhältnis  $r$  ist seinerseits wiederum abhängig von den oben genannten Einflußgrößen:

$$r = f (Fr; Re; Z; \text{Geometrie}) \quad (13)$$

wobei  $Z$  wiederum die Wasserbeschaffenheit und -temperatur charakterisiert. Selbst unter Standardbedingungen ( $Z=\text{const}$ ) läßt sich der Sauerstoffeintrag in einem geometrisch ähnlichen Froudemodell nicht maßstäblich nachbilden, so daß auch hier entsprechende Übertragungskriterien zur Berücksichtigung der Maßstabeffekte angewendet werden müssen [9,11].

### 2.3 Eintragswirkung von Anlagen zur Sauerstoffanreicherung

Die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten funktionalen Beziehungen dienen dem Zweck, eine Parameterbasis für den quantitativen Vergleich zwischen verschiedenen technischen Anlagen zur Sauerstoffanreicherung zu liefern, und insbesondere eine Beziehung zwischen Naturmessungen und entsprechenden Laboruntersuchungen an kleinmaßstäblichen Modellen zu liefern. Will man einen echten Vergleich unterschiedlicher Meßergebnisse vornehmen, dann ist es unerlässlich, die in der Literatur verfügbaren Meßergebnisse auf vorgegebene "Standardbedingungen" zu reduzieren. Dies betrifft im einzelnen:

(1) Sauerstoffdefizit der Zuströmung.

Da der funktionale Zusammenhang zwischen Eintragswirkung und Ausgangs-Sauerstoffdefizit bekannt ist, lassen sich die jeweiligen aktuellen Meßwerte umrechnen auf entsprechend korrigierte Werte bei vergleichbarer Ausgangssituation, wobei üblicherweise ein Sauerstoffdefizit von 50 % oder 100 % zugrundegelegt wird.

(2) Temperaturabhängigkeit.

Da die Sättigungskonzentration von Sauerstoff in Wasser stark temperaturabhängig ist, müssen alle zu vergleichenden Meßwerte auf eine Vergleichstemperatur durch eine entsprechende Korrektur reduziert werden (siehe [2]).

(3) Wasserbeschaffenheit.

Die Wasserbeschaffenheit hat einen wesentlichen Einfluß sowohl auf die Größe der resultierenden Blasen als auch auf den Stoffübergang. Auch hierzu ist eine empirische Reduzierung auf "Standardbedingungen" unerlässlich (siehe [2]). Die bisher verfügbaren empirischen Korrekturen sind sehr pauschal und noch unbefriedigend, da sich der Sauerstoffeintrag mit der Wasserbeschaffenheit sehr stark ändert. Erste Schritte zu einer Quantifizierung dieser Effekte wurden von Novak [11] unternommen.

(4) Druckabhängigkeit.

Da die Sättigungskonzentration von Sauerstoff in Wasser unter anderem druckabhängig ist, ist gegebenenfalls eine Reduzierung verfügbarer Meßdaten auf einen Standarddruck (üblicherweise Atmosphärendruck) erforderlich.

(5) Abweichungen der Geometrie verschiedener Anlagen.

Ein Vergleich verschiedener technischer Anlagen wird häufig dadurch erschwert, daß die geometrische Form der Anlagen Abweichungen aufweist. Beispielsweise wirkt sich bei Wehrüberfällen erschwerend aus, daß die Details der Geometrie des Überfalls, die resultierende Strahlform sowie das Unterwasserbecken in der Regel von Anlage zu Anlage variieren und somit einen direkten Vergleich erschweren. Näherere Ausführungen finden sich hierzu in [11] und [13].

Der hier vorgeschlagene Weg stellt einen ersten Schritt dar in Richtung auf eine einheitliche Betrachtungs- und Vorgehensweise, welche den direkten Bezug und Vergleich verschiedener Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag durch technische Anlagen erlaubt. Wie in [8] ausgeführt wurde, sind wir jedoch insgesamt von diesem Ziel noch weit entfernt. In der Literatur finden derzeit noch eine Vielzahl unterschiedlicher Maßstäbe für die Eintragswirkung von Sauerstoffanreicherungsanlagen Anwendung, die je nachdem eingesetzt werden, ob die Betrachtungsweise mehr auf energiewirtschaftliche und Kostenaspekte, auf physikalische Aspekte oder auf siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte ausgerichtet ist. Auf der Basis eines besseren Verständnisses der quantitativen Zusammenhänge ist jedoch zu hoffen, daß es in Zukunft gelingen wird, die Dimensionierung und technische Auslegung solcher Anlagen auf eine allgemeingültige Basis zu stellen.

### 3. SAUERSTOFFEINTRAG AN WEHREN

#### 3.1 Parameterdarstellung der Eintragswirkung

Die Gesetzmäßigkeiten des Sauerstoffeintrags an Wehren waren Gegenstand des ersten Fortschrittsberichts zu diesem Forschungsvorhaben.

Für scharfkantige, belüftete Rechteckwehre mit tiefem Unterwasserbecken wurde eine allgemein gültige Parameterdarstellung entwickelt. Bild 1 zeigt die untersuchte Konfiguration, und in Bild 2 sind alle bislang verfügbaren Natur- und Labor-meßdaten dargestellt. Es zeigt sich, daß die gewählte Auftragsform allgemeingültigen Charakter hat und den Zusammenhang zwischen kleinmaßstäblichen Modellversuchen und Naturanlagen gut erfaßt. Die Ergebnisse sind im Einzelnen in [2] diskutiert.

#### 3.2 Labor- und Modellmessungen am Wehr Wendlingen

Am Stuttgarter Institut für Wasserbau wurden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. K. Petrikat Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag für das damals in Bau befindliche Wehr Wendlingen durchgeführt. Die Untersuchungen umfaßten

- a) Sauerstoffeintragungsmessungen im Labor an kleinmaßstäblichen, scharfkantigen Dreieckswehren bei großen Fallhöhen
- b) Hydraulische Modellversuche zur Optimierung des Wehrrückens für das geplante Wehr Wendlingen im Hinblick auf die Erzielung eines möglichst großen Sauerstoffeintrags
- c) Naturmessungen des Sauerstoffeintrags am Wehr Wendlingen.

Bei den Laborversuchen an Dreieckswehren wurde primär die Fallhöhe bis zum Eintauchen in das Unterwasser variiert. Die Ergebnisse zeigten, daß eine optimale Fallhöhe mit



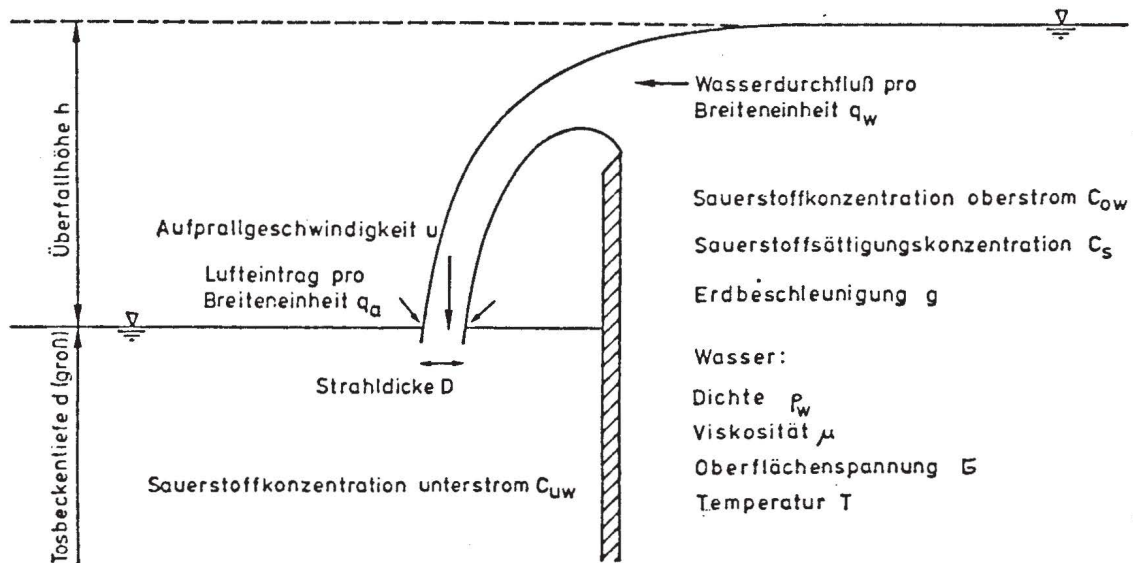


Bild 1: Sauerstoffanreicherung durch Überfallwehre -  
Definitionsskizze

Meßdaten im Sauerstoffeintragsnomogramm Bild 2

Literaturangaben:

- ① Kayser, R., and Stegmann, R., "Sauerstoffeintrag an Wehren mit geringen Beaufschlagungen", Wasser und Boden, Vol. 2, 1975.
- ② Water Pollution Research Laboratory, England, "Aeration at Weirs", Notes on Water Pollution, No. 61, June, 1973.
- ③ Londong, D. "Über den Sauerstoffeintrag an freien Überfällen", Dissertation, Technische Universität, Aachen, 1973.
- ④ Albrecht, D., "Schätzung der Sauerstoffzufuhr durch Wehre und Kaskaden", Die Wasserwirtschaft, Vol. 11, 1969.
- ⑤ ATV Arbeitsblatt AW 161, "Die künstliche Belüftung von Oberflächengewässern", ZfGW-Verlag GmbH, Frankfurt, 1971.



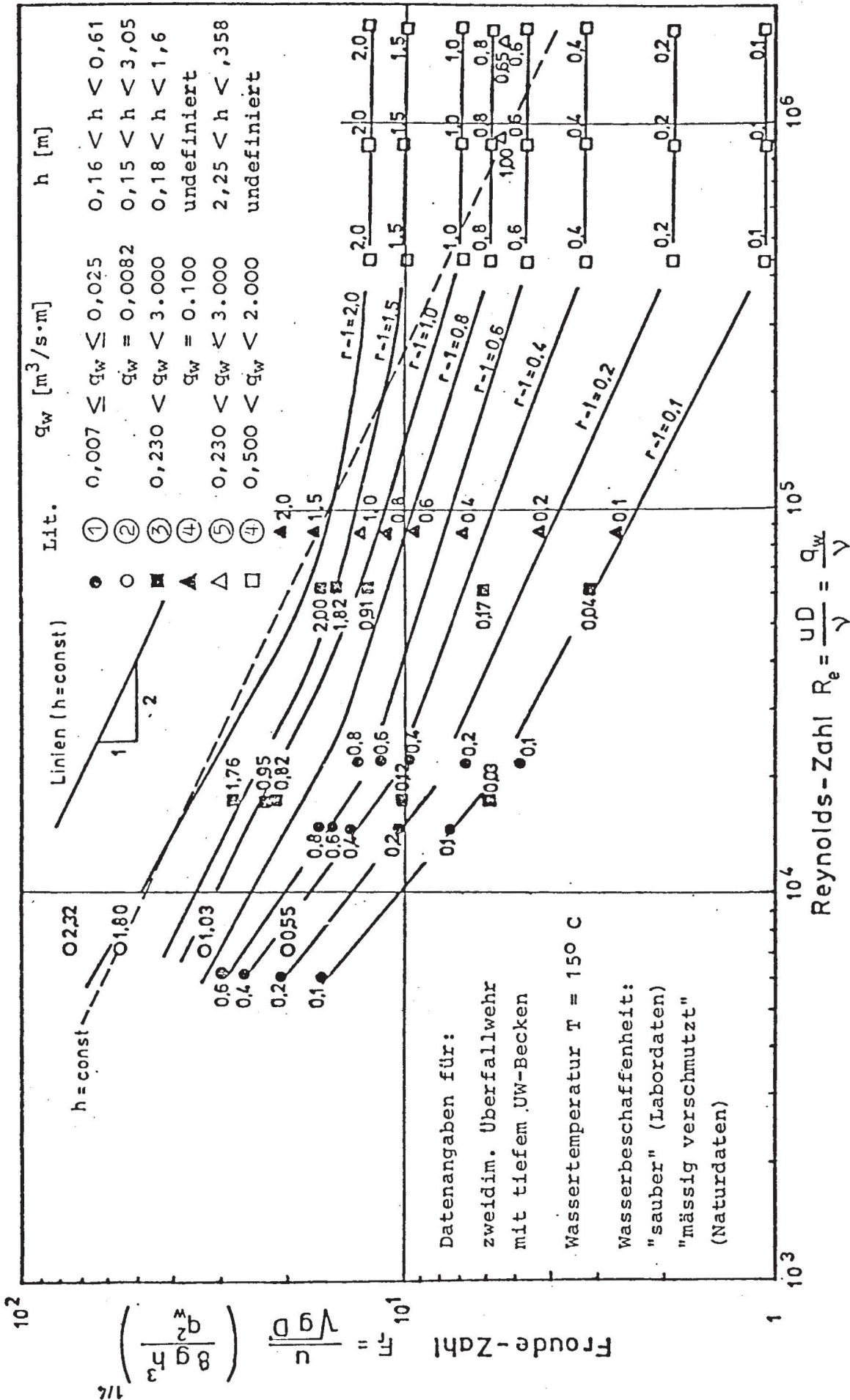


Bild 2: Nomogramm für Sauerstoffanreicherung durch Überfallwehre

maximalem Sauerstoffeintrag existiert. Diese entspricht der Höhe, in der ein frei fallender Strahl "aufreißt", d.h. in Einzeltropfen zerfällt. Bis zu dieser Höhe nimmt die Eintragungswirkung mit größer werdender Fallhöhe wegen der gleichfalls wachsenden kinetischen Energie des Strahls zu. Nach dem Aufreißen des Strahls werden jedoch die einzelnen Tropfen aufgrund des Luftwiderstands stark abgebremst, so daß der mechanische Lufteintrag beim Eintauchen in das Wasserpolster reduziert wird.

Hutarew hat die Lage des Strahlaufreißpunkts für runde Wasserstrahlen verschiedener Durchmesser und verschiedener Anfangsneigung untersucht. Seine Ergebnisse wurden einer Dimensionsanalyse unterzogen; das Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt.

Eine Dimensionsanalyse liefert für die Höhe H des Aufreißpunkts für die untersuchte Konfiguration folgende Abhängigkeiten:

$$H = f_1(Q; D; g; \rho_w; \mu_w; \sigma_{wl}) \quad (14)$$

Diese Beziehung mit 7 dimensionsbehafteten Größen reduziert sich auf eine dimensionslose Beziehung mit 4 Parametern:

$$\frac{H}{D} = f_2 \left( \frac{Q^2}{gD^5}; \frac{Q}{(\rho_w/\rho_w)D}; \frac{g\mu_w^4}{\rho_w \sigma_{wl}^3} \right) \quad (15)$$

oder, bei entsprechender Interpretation der einzelnen Größen,

$$\frac{H}{D} = f(Fr; Re; Z) \quad (16)$$

Die auf den Strahldurchmesser bezogene Fallhöhe ( $H/D$ ) ist demnach abhängig von der relativen Wirkung der Schwerkraft (Froudezahl  $Fr$ ), Zähigkeit (Reynoldszahl  $Re$ ) und Oberflächenspannung (enthalten im Flüssigkeitsparameter  $Z$ ).

In Bild 3 ist die relative Fallhöhe ( $H/D$ ) als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  dargestellt. Der Flüssigkeitsparameter  $Z$  war in den Hutarewschen Versuchen stets konstant. Die sichtbare Korrelation der Ergebnisse zeigt, daß die Lage des Aufreißpunkts überwiegend von Trägheits- und Zähigkeitseffekten bestimmt wird, und daß die Schwerkrafteffekte hierbei von untergeordneter Bedeutung sind (Diese machen sich in der Streubreite der Meßergebnisse bemerkbar: wäre die Schwerkraft gänzlich ohne Einfluß, dann müßten alle Ergebnisse auf eine einzige Kurve fallen).

Die hydraulischen Modellversuche zur Optimierung des Wehrrückens für das Wehr Wendlingen beschränkten sich ausschließlich auf Geschwindigkeits- und Druckmessungen, so daß hieraus keine quantitativen Aussagen über den Sauerstoffeintrag vorliegen. Das wesentliche Ergebnis der Modellversuche war die Ausbildung einer "Sprungnase" auf dem Wehrrücken, die bei kleinen Abflüssen ein Abheben des Überfallstrahls bewirkt und dadurch ein frei fallendes Wasserband erzeugt, das beim Eintauchen in das Unterwasser nicht nur an seiner Oberseite, sondern auch an der Unterseite Luft mitreißt und dadurch eine beträchtliche Erhöhung des Sauerstoffeintrags bewirkt. Die Funktion der "Sprungnase" ist in Bild 4 klar zu erkennen.

Nach Fertigstellung des Wehres Wendlingen wurden dort Naturmessungen zur Ermittlung des erzielten Sauerstoffeintrags durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Bild 5 tabellarisch festgehalten. Ein direkter Vergleich mit den Labordaten ist bedauerlicherweise nicht möglich, da am kleinmaßstäblichen Wehrmodell keinerlei Sauerstoffeintragungsmessungen durchgeführt wurden. Für die

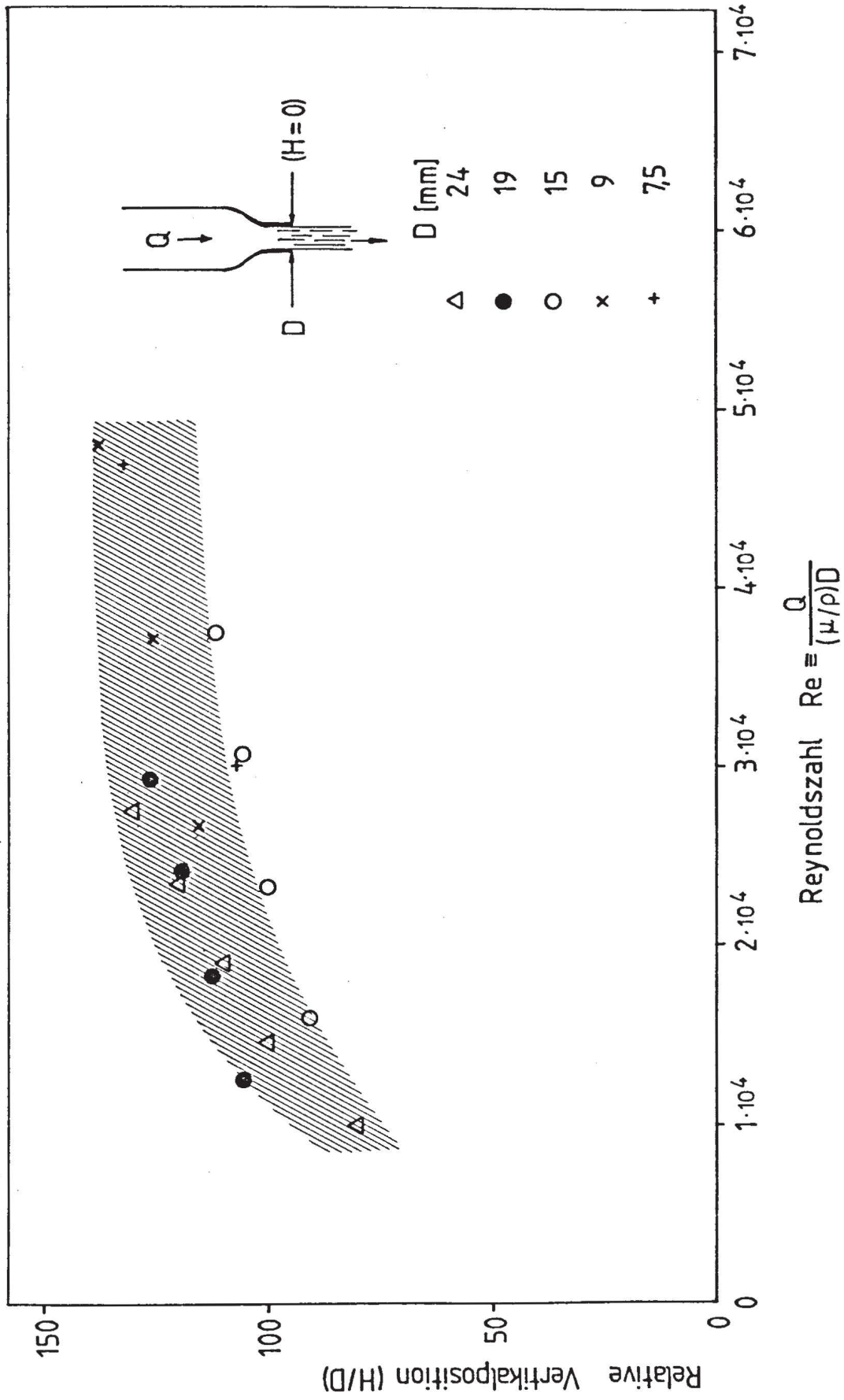


Bild 3: Relative Vertikalposition des Aufreißpunkts für kreisrunde Strahlen  
 (Meßdaten von Hutarew [3])



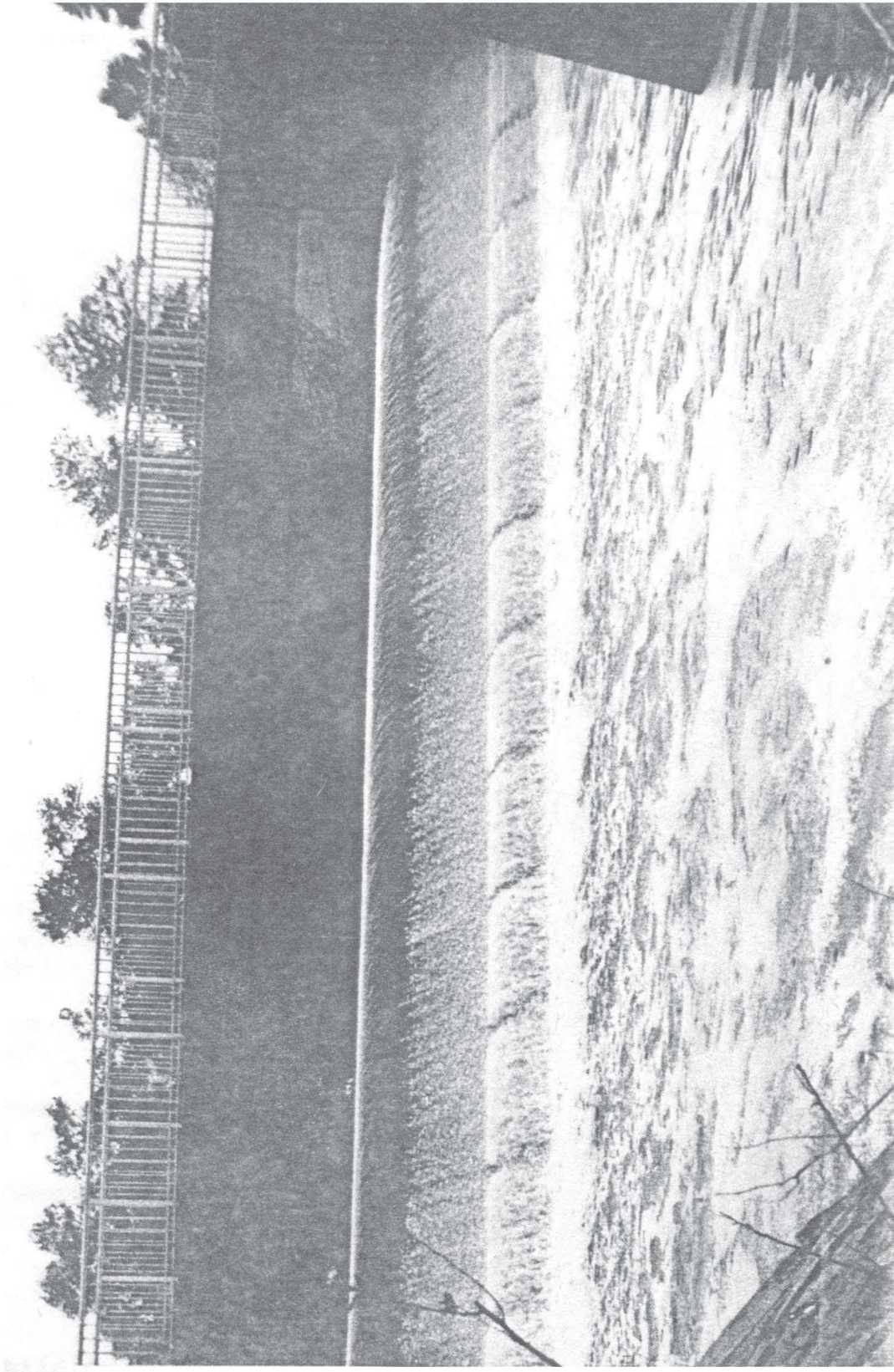
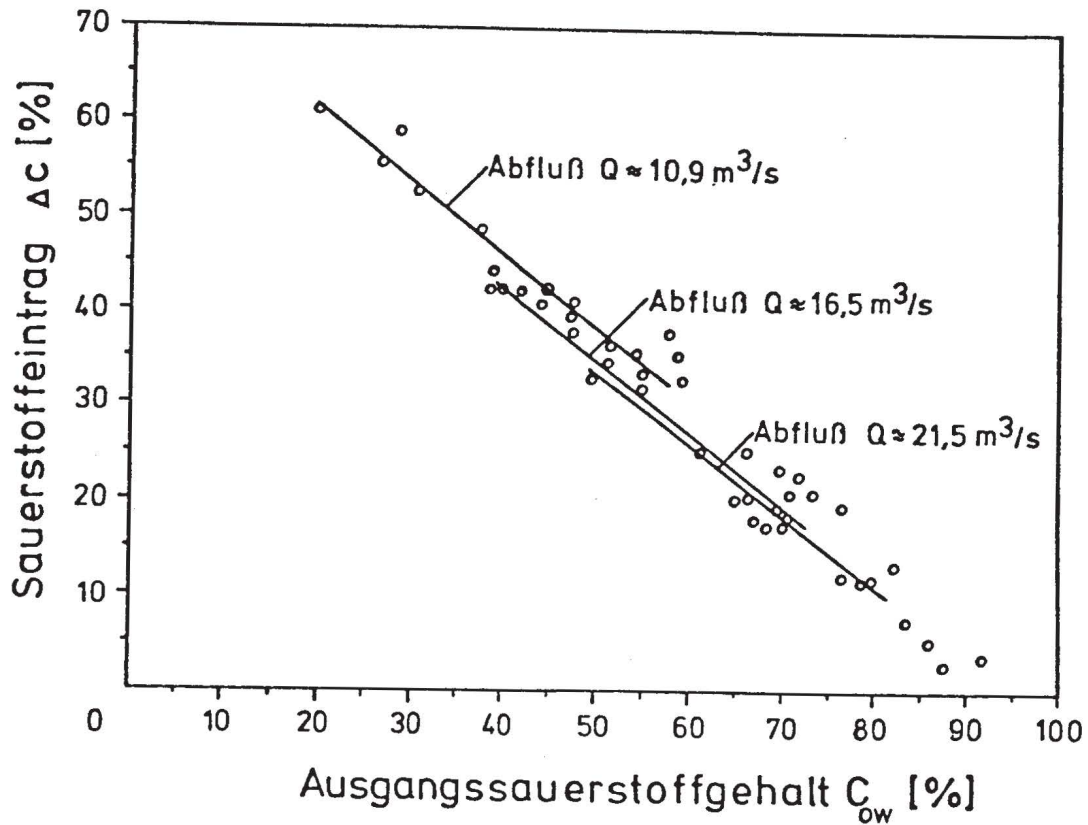


Bild 4: Das Wehr Wendlingen mit Sprungnasen in Betrieb ( $Q \approx 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $B = 52 \text{ m}$ )  
(Foto aus Hutarew [3])





Die Kennwerte vom Wehr Wendlingen (B = 52 m)					
Ausgangssauerstoffgehalt im Oberwasser C <sub>ow</sub> in % des zugehörigen Sättigungswertes C <sub>s</sub>	50	40	30	20	10
Sauerstoffeintrag in kg/h bei 20° C, 1,013 bar, 20 m <sup>3</sup> /s	216	260	305	356	407
Energieaufwand in kW N = η · 9,81 · Q · H (η = 1)			745		
Sauerstoffertrag in kg/kWh	0,29	0,35	0,41	0,48	0,55

Bild 5: Naturmeßdaten zum Sauerstoffeintrag am Wehr Wendlingen (aus Hutarew [3] )

weitere Klärung der Modellgesetzmäßigkeiten des Sauerstoffeintrags wären solche Messungen von großem Interesse gewesen.

### 3.3 Sauerstoffeintrag an Wehranlagen

Natur- und Modellversuche zum Sauerstoffeintrag an Wehranlagen haben unsere grundlegenden Modellgesetzmäßigkeiten (siehe Abschnitt 3.1) generell bestätigt. Bei Wehranlagen in Flüssen trifft man jedoch in der Regel nicht die extrem einfache Konfiguration an, die unseren Überlegungen zugrunde gelegt wurde, so daß hierfür zusätzliche Einflußgrößen zur Beschreibung der Geometrie berücksichtigt werden müssen. Die wichtigsten Parameter sind:

- a) Wehrgeometrie in Strömungsrichtung: hier ist neben dem scharfkantigen, belüfteten Wehr von allem die rundkronige Wehrform zu nennen, bei der der Strahl auf dem Überfallrücken anliegt und demnach nur an seiner Oberseite Luft in das Unterwasserpolster einträgt. Die Ausbildung der Wehrgeometrie hat wesentlichen Einfluß auf die Eintragswirkung, wie beispielsweise auch die Untersuchungen am Wendlinger Wehr (Sprungnase) gezeigt haben.
- b) Wehrgeometrie im Querschnitt: Je nachdem, ob ein Rechteckwehr, ein Dreieckwehr oder eine andere Querschnittsform vorliegt, bildet sich eine andere Geometrie des Überfallstrahls aus. Mit entscheidend für den Sauerstoffeintrag ist der Umfang des überfallenden Strahls beim Eintauchen in das Unterwasserpolster, der von der Strahlform und damit vom Querschnitt des Wehres abhängt und beispielsweise für ein Dreieckwehr eine andere Größe aufweist als für ein Rechteckwehr oder auch durch Strahlstörer erheblich verändert werden kann.

Novak [11] hat gezeigt, daß verschiedene Querschnittsgeometrien hinsichtlich ihrer Sauerstoffeintragswirkung ver-

glichen werden können, wenn der Vergleich auf der Basis des maßgeblichen Strahlumfangs im Eintauchquerschnitt erfolgt.

- c) Tiefe und Geometrie des Unterwasserbeckens: Hierzu wurden von Novak[11] umfangreiche Versuche durchgeführt. Diese haben in Übereinstimmung mit den Naturbeobachtungen von Hanisch[12] gezeigt, daß die Unterwasserbedingungen den Sauerstoffeintrag wesentlich mit beeinflussen. Es konnte eine optimale Unterwassertiefe ermittelt werden, bei der die Eintragswirkung am größten ist. Bei größeren Tiefen wird die den Stoffübergang fördernde Turbulenz der Wasserströmung im Unterwasserbecken kleiner, und bei geringeren Wassertiefen wird die mittlere Aufenthaltszeit der Blasen im Wasser stark reduziert, was jeweils eine Abminderung des Sauerstoffeintrags nach sich zieht.

Neben den hydromechanischen Größen müssen zudem beim Vergleich verschiedener Anlagen die jeweiligen Unterschiede in Wasserbeschaffenheit, Temperatur und Sauerstoffdefizit der Anströmung beachtet und kompensiert werden, wie dies in Kap. 2 dargestellt wurde.



#### 4. LUFTBLASENSCHLEIER IN FLIESSGEWÄSSERN

##### 4.1 Parameterdarstellung der Eintragswirkung

Unsere experimentellen Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag durch Luftblasenschleier in einer Querströmung sind im zweiten Fortschrittsbericht des Forschungsvorhabens ausführlich dargestellt. Die Untersuchungen umfaßten folgenden Parameterbereich:

- Gaszugabe durch Düsenrohre mit Düsendurchmessern von 0,4 bis 1,0 mm bei verschiedenen Düsenabständen und Düsenorientierungen, sowie durch poröse Filterplatten mit mittleren Porendurchmessern von 40 bis 180  $\mu\text{m}$ ;
- Luftdurchsätze pro Breitereinheit von 3 bis 53  $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$
- Querströmungsgeschwindigkeiten von 2,5 bis 15  $\text{cm/s}$
- Wassertiefe von 50 cm

Außerdem wurden Versuchsreihen mit reinem Sauerstoffgas durchgeführt, in denen der Wirkungsgrad dieser technischen Alternative ermittelt wurde.

Die Ergebnisse unserer Experimente sind zusammen mit den aus der Literatur verfügbaren Natur- und Labordaten in Bild 6 dargestellt. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Literaturangaben mit unseren Meßwerten. Hierbei ist die Sauerstoffausnutzung pro Höheneinheit ( $\eta/H$ ) aufgetragen, d.h. die pro Zeiteinheit und pro Meter Wassertiefe eingetragene Sauerstoffmasse bezogen auf die pro Zeiteinheit eingeblasene Sauerstoffmasse. Diese macht beim Einblasen von Luft 21 % des Volumenstroms aus, während sie bei "reinem" Sauerstoffgas nahezu 100 % erreicht. Bild 7 zeigt die Meßergebnisse mit Luft und Sauerstoffgas im direkten Vergleich.

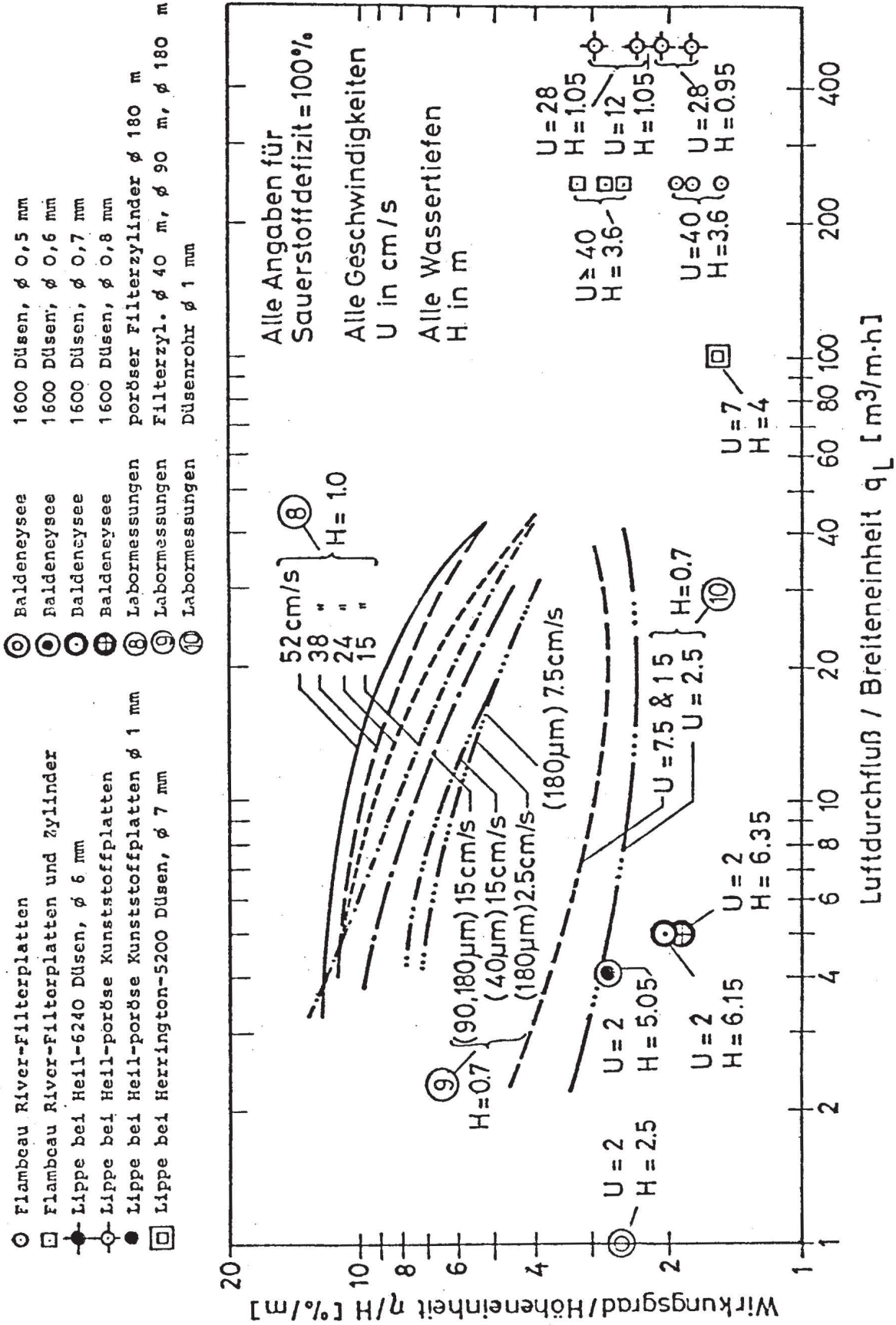


Bild 6: Sauerstoffeintrag durch zweidimensionale Luftblasenschleier in einer Querströmung

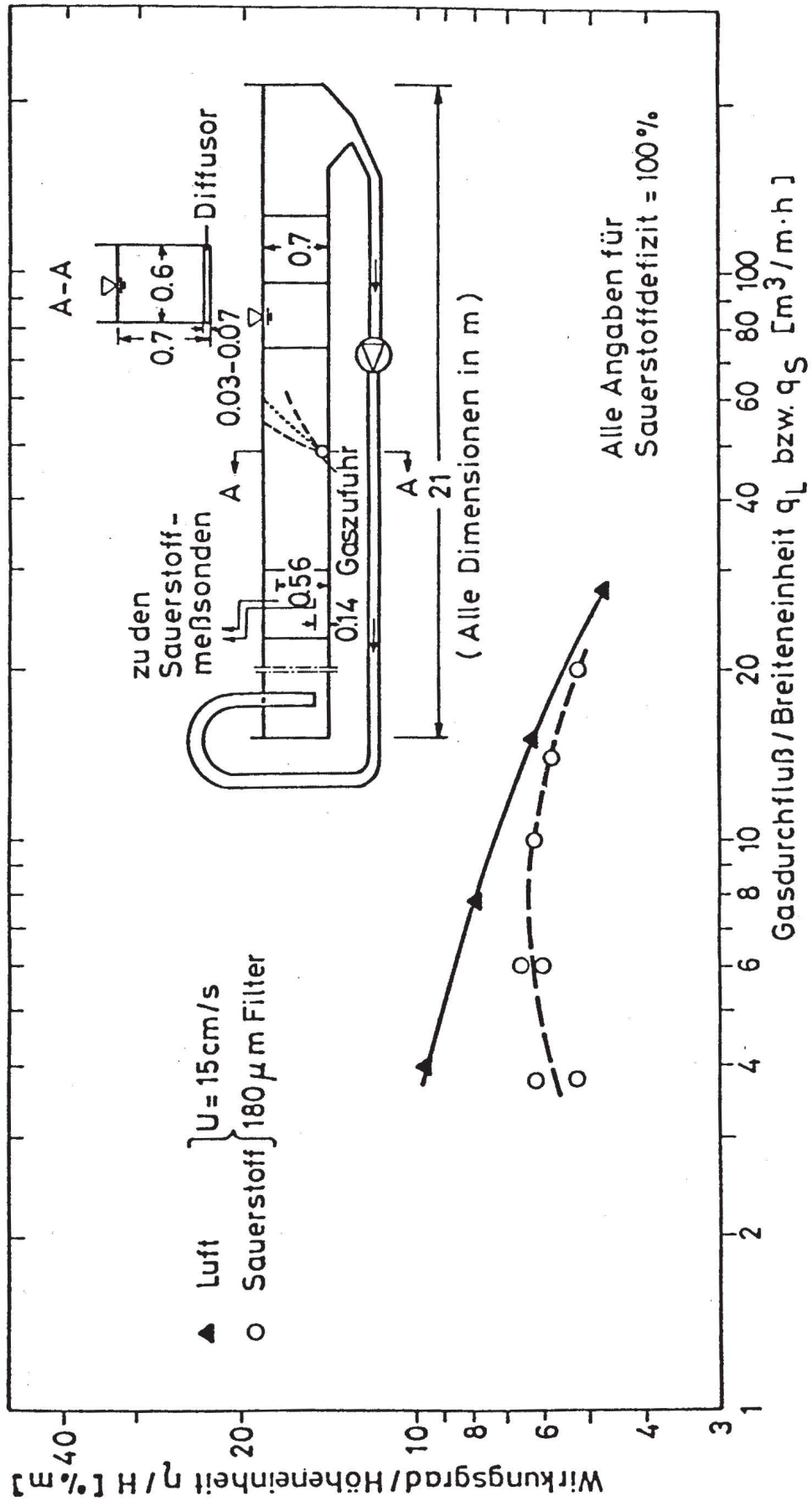


Bild 7: Vergleich der Eintragungswirkung bei Verwendung von Luft und Sauerstoffgas



#### 4.2 Sauerstoffeintrag durch Luftblasenschleieranlagen

Aus den Untersuchungen ergeben sich folgende allgemeine Schlußfolgerungen:

- Der Sauerstoffeintrag von Luftblasenschleiern in Fließgewässern hängt primär vom Luftdurchsatz, von der Wassertiefe und von der Strömungsgeschwindigkeit ab (Bild 6). Die Sauerstoffausnutzung ( $\eta/H$ ) pro Höhenmeter liegt in der Größenordnung von 2 bis 13 %/m.
- Die Sauerstoffausnutzung  $\eta$  nimmt mit der Aufenthaltszeit der Gasblasen und damit mit der Wassertiefe  $H$  linear zu. Sie wächst mit zunehmender Querströmungsgeschwindigkeit und mit abnehmendem Luftdurchsatz (d.h. mit abnehmender Steiggeschwindigkeit des Blasenstroms).
- Feinporige Filterplatten (Porendurchmesser 40 bis 180  $\mu\text{m}$ ) zeigen wegen der Art der Blasenbildung einen signifikant höheren Sauerstoffeintrag als Düsenrohre (Düsendurchmesser 0,4 bis 1 mm). Bei kleinen Luftdurchsätzen (unter 40  $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ ) liefern sie eine 2 bis 3fache Steigung der Sauerstoffausnutzung ( $\eta/H$ ).
- Abgesehen von den Unterschieden zwischen Filterplatten und Düsenrohren hat die Art der Luftzugabe keinen nennenswerten Einfluß auf die Sauerstoffausnutzung ( $\eta/H$ ). D.h., Änderungen des wirksamen Porendurchmessers, des Düsendurchmessers, Düsenabstands oder der Düsenorientierung wirken sich auf den Sauerstoffeintrag nicht signifikant aus.
- Die Sauerstoffausnutzung ( $\eta/H$ ) pro Höheneinheit liegt für reines Sauerstoffgas in derselben Größenordnung wie für Luft, wobei sich insgesamt etwas niedrigere Zahlenwerte ergeben (Bild 7). Dies bedeutet, daß mit Hilfe von Sauerstoffgas unter sonst vergleichbaren Bedingungen erheblich größere Absolutmengen Sauerstoff in das Gewässer eingetragen werden können. Bei gleichem Gasdurchsatz der Anlage liegt der Ein-

trag für Sauerstoffgas rund 5 mal so hoch wie beim Einsatz von Luft, bzw. zur Erzielung der gleichen Eintragswirkung muß der Volumenstrom für Sauerstoffgas nur rund ein Fünftel des Luftvolumenstroms betragen. Diese Tatsache rückt den Einsatz von Sauerstoffgas zur Flußbelüftung in den Bereich der technisch und wirtschaftlich interessanten Verfahren [10].

## 5. LUFTBLASENSCHLEIER IN STEHENDEN GEWÄSSERN

### 5.1 Ergebnisse der Sauerstoffeintragsmessungen

Zum Sauerstoffeintrag durch Luftblasenschleier in stehende Gewässer wurden an einer Modellfamilie umfangreiche und systematische Messungen durchgeführt, die im dritten Fortschrittsbericht zum Forschungsvorhaben im Einzelnen beschrieben sind.

Als Modellfamilie dienten drei zylindrische Standrohre unterschiedlichen Durchmessers, in die am Boden mittig Luft durch eine Düse (Durchmesser  $d$ ) eingeblasen wurde. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Sauerstoffausnutzung  $\eta$  beeinflußt wird von der Wassertiefe  $H$ , dem Luftdurchsatz  $Q_a$ , dem Zylinderdurchmesser  $D$  und dem Sauerstoffdefizit im Behälter. Bei vollständigem Defizit gilt demnach

$$\eta = f(H; Q_a; D; \rho_w; g; \mu_w) \quad (17)$$

Die Messungen zeigen, daß im allgemeinen die Sauerstoffausnutzung  $\eta$  zunimmt mit zunehmender Wassertiefe, zunehmendem Zylinderdurchmesser, und abnehmendem Luftdurchsatz, obwohl die experimentellen Ergebnisse zum Teil erhebliche Abweichungen zeigen (insbesondere für den mittleren Rohrdurchmesser) und nicht vollständig systematisch sind. Nichtsdestotrotz wurde eine Korrelationsrechnung für alle verfügbaren Meßdaten durchgeführt.

Die oben genannte Beziehung für die Sauerstoffausnutzung läßt sich mit Hilfe einer Dimensionsanalyse überführen in folgende dimensionslose Darstellung:

$$\eta = f\left(\frac{H}{D}; \frac{D}{\sqrt[5]{Q_a^2/g}}; Re \equiv \frac{Q_a}{D(\mu_w/\rho_w)}\right) \quad (18)$$



Ausgehend von der Überlegung, daß Zähigkeitseffekte in diesem Fall eine zweitrangige Rolle spielen dürften, wurde folgende Ausgleichsfunktion angesetzt:

$$\eta = A_1 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{A_2} \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[5]{Q_a^2/g}}\right)^{A_3} \quad (19)$$

Die Zahlenwerte der empirischen Koeffizienten  $A_1$  bis  $A_3$  wurden durch eine Ausgleichsrechnung (kleinstes Fehlerquadrat) über alle Meßpunkte ermittelt zu

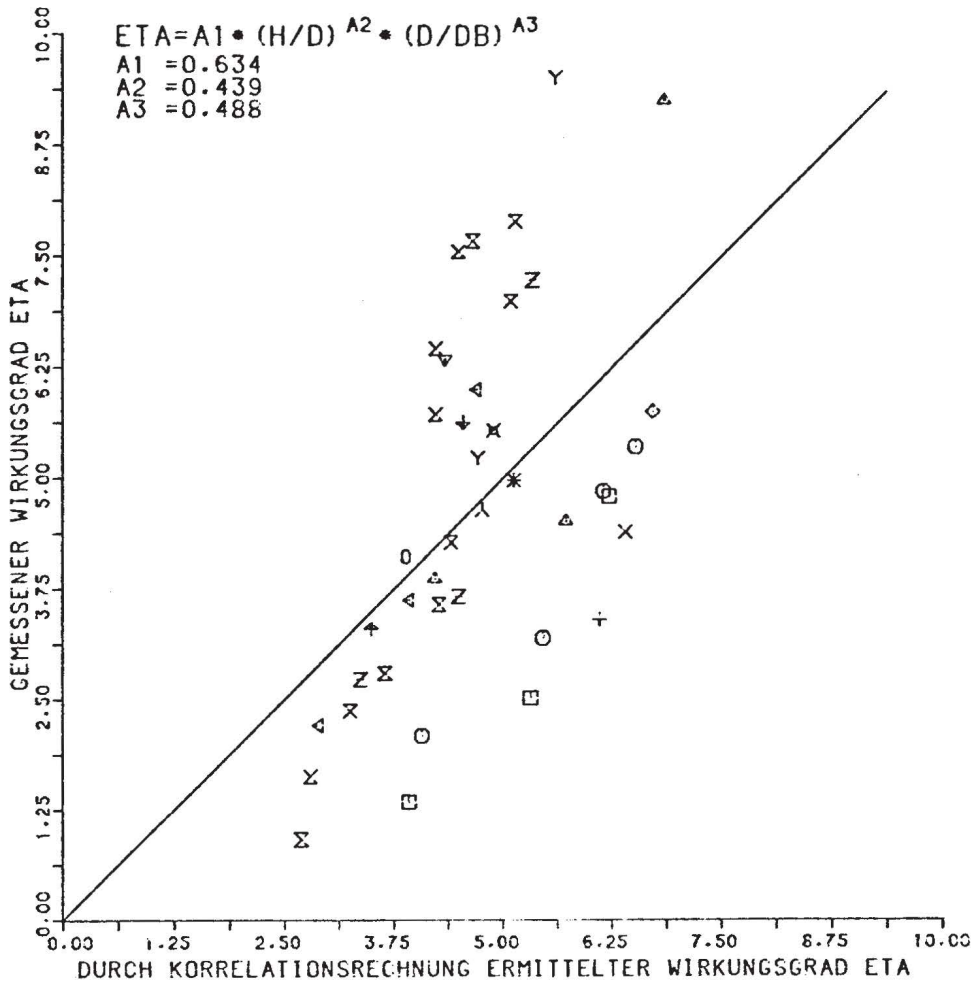
$$\begin{aligned} A_1 &= -0.634 \\ A_2 &= +0.439 \\ A_3 &= +.0488 \end{aligned} \quad (20)$$

In Bild 8 ist das Ergebnis dieser Korrelationsrechnung aufgetragen. Der Vergleich zwischen den Meßwerten und den jeweiligen Rechenwerten nach dem obigen Ansatz (oberes Diagramm) zeigt insgesamt nur eine schwache Übereinstimmung und läßt erhebliche Abweichungen der Ergebnisse untereinander erkennen, welche den (unberücksichtigt gebliebenen) Einfluß der Reynoldszahl widerspiegeln.

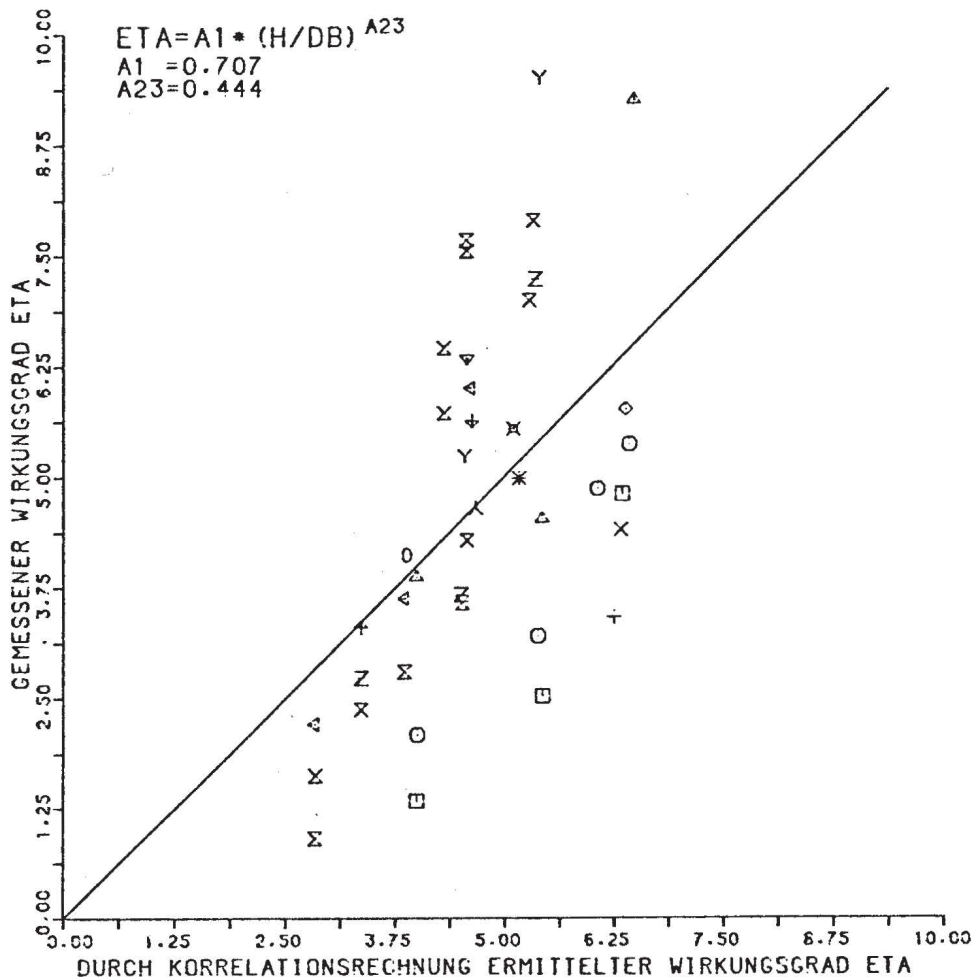
Interessanterweise zeigt sich jedoch deutlich, daß die beiden Koeffizienten  $A_2$  und  $A_3$  annähernd gleich groß sind. Dies weist darauf hin, daß der Rohrdurchmesser  $D$  in der hier gewählten dimensionslosen Darstellung von untergeordneter Bedeutung ist. Wenn man in der Tat in Gl. (19) die Koeffizienten  $A_2$  und  $A_3$  gleichsetzt, dann erhält man

$$\eta = A_1 \cdot \left(\frac{H}{\sqrt[5]{Q_a^2/g}}\right)^{A_{23}} \quad (21)$$

Im unteren Teil von Bild 8 ist das Ergebnis der Korrelation nach Gl. (21) dargestellt: die Streuung der Meßwerte entspricht dem allgemeineren Ansatz nach Gl. (19). Damit wird bestätigt, daß der vereinfachte Ansatz (Gl. 21) zulässig ist und somit der Rohrdurchmesser  $D$  nur sekundären Einfluß auf die Ergebnisse hat.



QA	D	
0.03	0.14	⊠
0.03	0.29	⊙
0.03	0.63	△
0.04	0.14	+
0.04	0.29	X
0.04	0.63	◇
0.08	0.63	⊕
0.09	0.14	X
0.09	0.29	Z
0.09	0.63	Y
0.11	0.14	⊗
0.11	0.29	*
0.11	0.63	⊗
0.21	0.14	▽
0.21	0.29	↓
0.21	0.63	∧
0.22	0.14	⊗
0.22	0.29	X
0.22	0.63	△
0.56	0.63	0



QA	D	
0.03	0.14	⊠
0.03	0.29	⊙
0.03	0.63	△
0.04	0.14	+
0.04	0.29	X
0.04	0.63	◇
0.08	0.63	⊕
0.09	0.14	X
0.09	0.29	Z
0.09	0.63	Y
0.11	0.14	⊗
0.11	0.29	*
0.11	0.63	⊗
0.21	0.14	▽
0.21	0.29	↓
0.21	0.63	∧
0.22	0.14	⊗
0.22	0.29	X
0.22	0.63	△
0.56	0.63	0

Bild 8: Korrelation der Sauerstoffeintragsdaten in Standzylindern unterschiedlicher Größe

Bei der Blasenbildung an Einzeldüsen ergibt sich ein Gemisch von Blasen, deren repräsentativer Durchmesser mit dem Luftdurchsatz wächst: Nach Kobus [1] gilt

$$d_B \text{ proportional } \sqrt[5]{Q_a^2 / g} \quad (22)$$

Der Nenner in Gl. (21) ist somit proportional zum repräsentativen Blasendurchmesser des erzeugten Blasenstroms, während der Zähler mit der Wassertiefe H eine typische Längenabmessung des Gewässers darstellt.

Trotz der großen Streuung der Meßwerte lassen die vorliegenden experimentellen Untersuchungen den Schluß zu, daß gemäß Gl. (21) der Wirkungsgrad des Sauerstoffeintrags durch eine Düsenanlage in ruhendem Wasser konstant bleibender Beschaffenheit primär abhängt vom Verhältnis der Gewässerabmessung zum repräsentativen Blasendurchmesser, unabhängig vom jeweiligen Durchmesser der Düsen.

## 5.2 Messung der Blasengrößen

Zur näheren Erforschung der beobachteten Strömungsanomalien wurden in einer Reihe von Zusatzversuchen Blasengrößenmessungen im aufsteigenden Blasenschwarm durchgeführt. Hierzu wurde in stehendem Wasser von 70 cm Tiefe ein Blasenstrom bekannter Größe durch poröses Filtermaterial mit mittleren Porendurchmessern von 40, 90 und 180  $\mu\text{m}$  eingeleitet und die jeweilige Blasengrößenverteilung in 50 cm Höhe über dem Zugabefilter gemessen.

Die Meßtechnik zur Bestimmung der Blasengrößenverteilung wurde von B. Barczewski [7] entwickelt. Da es sich hierbei um ein Verfahren handelt, das erstmals eine zuverlässige Messung der Blasengrößen ermöglicht, sei das Meßprinzip hier kurz beschrieben. Bild 9 zeigt eine Prinzipskizze des Geräts, dessen Sonde im Strömungsbereich aus einem Glastrichter von 18 mm Öffnungsweite besteht, der sich auf einen inneren Durchmesser von 2 mm verjüngt. Im anschließenden 2 mm Rohr sind zwei Lichtleiter im Abstand von 10 mm angebracht.



Zur Messung wird nun Wasser-Luftgemisch bei einer bekannten Geschwindigkeit mit Hilfe einer Wasser-Luft-Pumpe durch das Rohr gesaugt. Die durch das Rohr fließenden Luftblasen füllen den gesamten Rohrquerschnitt und durchfließen das Rohr in der Form ausgedehnter, zylindrischer Blasen mit einer kleinen Krümmung an beiden Enden. Die Zeit  $\Delta t$ , die benötigt wird, um die Entfernung  $s$  zwischen den beiden Lichtleitersonden zu durchqueren, wird elektronisch gemessen. Dies ergibt die Blasengeschwindigkeit  $V_1$  im Rohr. Gleichzeitig wird die Blasenlänge  $L$  aus der Zeit  $\Delta t_1$  der Unterbrechung einer Lichtschranke elektronisch bestimmt. Das Blasenvolumen  $V_b$  kann dann berechnet werden gemäß

$$V_b = L \cdot \frac{\pi d^2}{4} = V_1 \cdot \Delta t_1 \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \frac{s}{\Delta t} \cdot \Delta t_1 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (23)$$

Hieraus erhält man den äquivalenten Blasendurchmesser  $d_b$  (Durchmesser einer Kugelblase gleichen Volumens) zu

$$d_b = \left( \frac{6}{\pi} V_b \right)^{1/3} = \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{s}{\Delta t} \cdot \Delta t_1 \cdot d^2 \right)^{1/3} \quad (24)$$

Der berechnete Blasendurchmesser wird in einem Vielkanal-analysator über eine Meßzeit von 30 bis 60 Minuten, d.h. über mehrere tausend Einzelmeßwerte, gespeichert. Die resultierende Blasengrößenverteilung kann dann auf einem X-Y-Schreiber dargestellt werden, wie dies in den Bildern 10 und 11 gezeigt ist. Aus diesen Ergebnissen kann nun der häufigste Blasendurchmesser bestimmt werden, dessen Größe sowohl vom Luftdurchsatz als auch von der Art der Luftzugabe (Porengröße des Filters) abhängt. Die jeweils beobachteten häufigsten Blasendurchmesser sind in Bild 12 tabellarisch zusammengestellt.

Die Blasengrößenmessungen zeigen die zunächst unerwartete Tendenz, daß bei gleichem Luftdurchsatz das feinporige Filtermaterial größere Luftblasen erzeugt als die grobporigen Filterplatten. Dies hat seine Ursache in Koaleszenz- und Zerfallerscheinungen im unmittelbaren Zugabebereich, welche stark von Zähigkeits- und Oberflächenkräften beeinflusst werden.



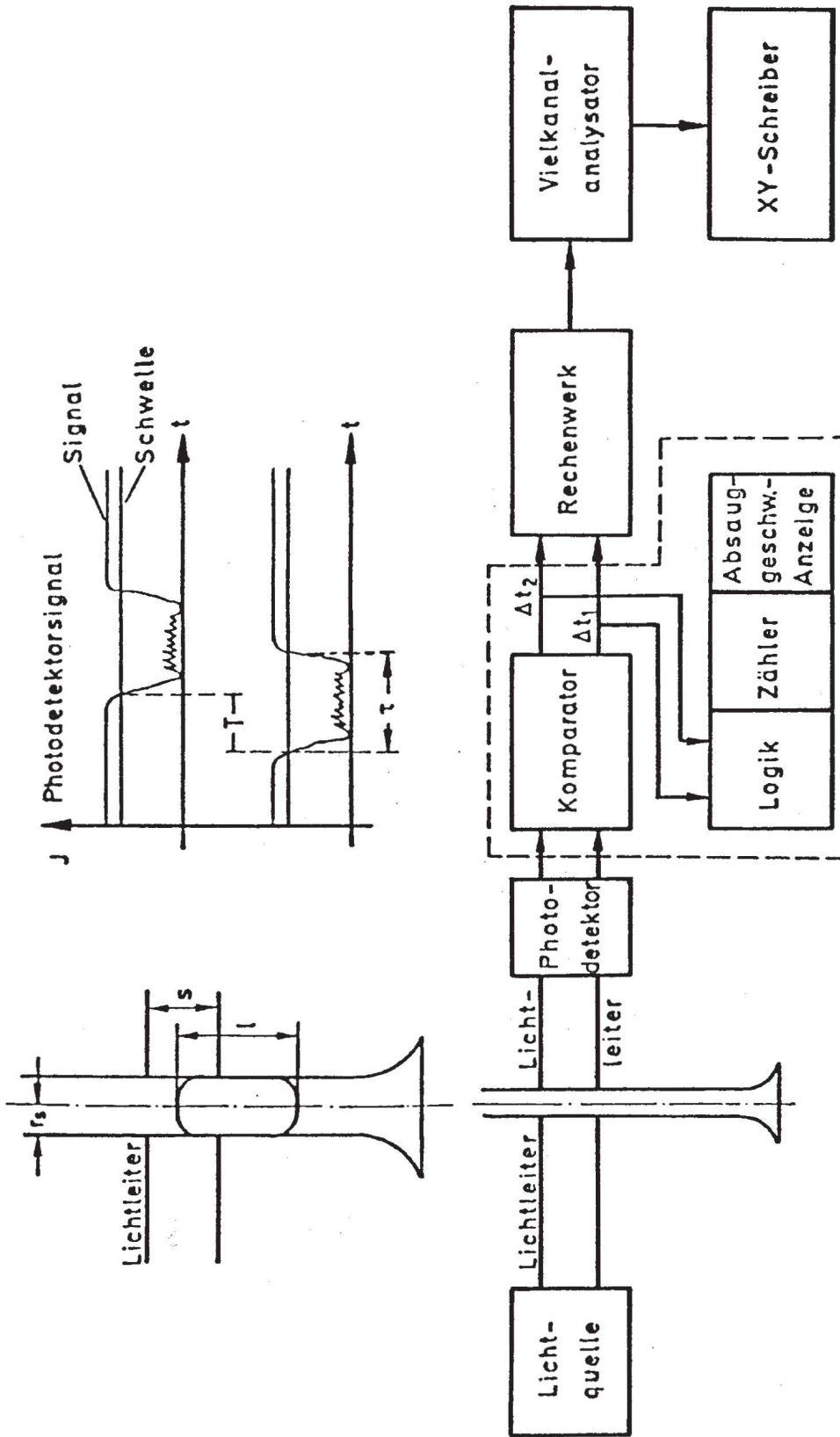
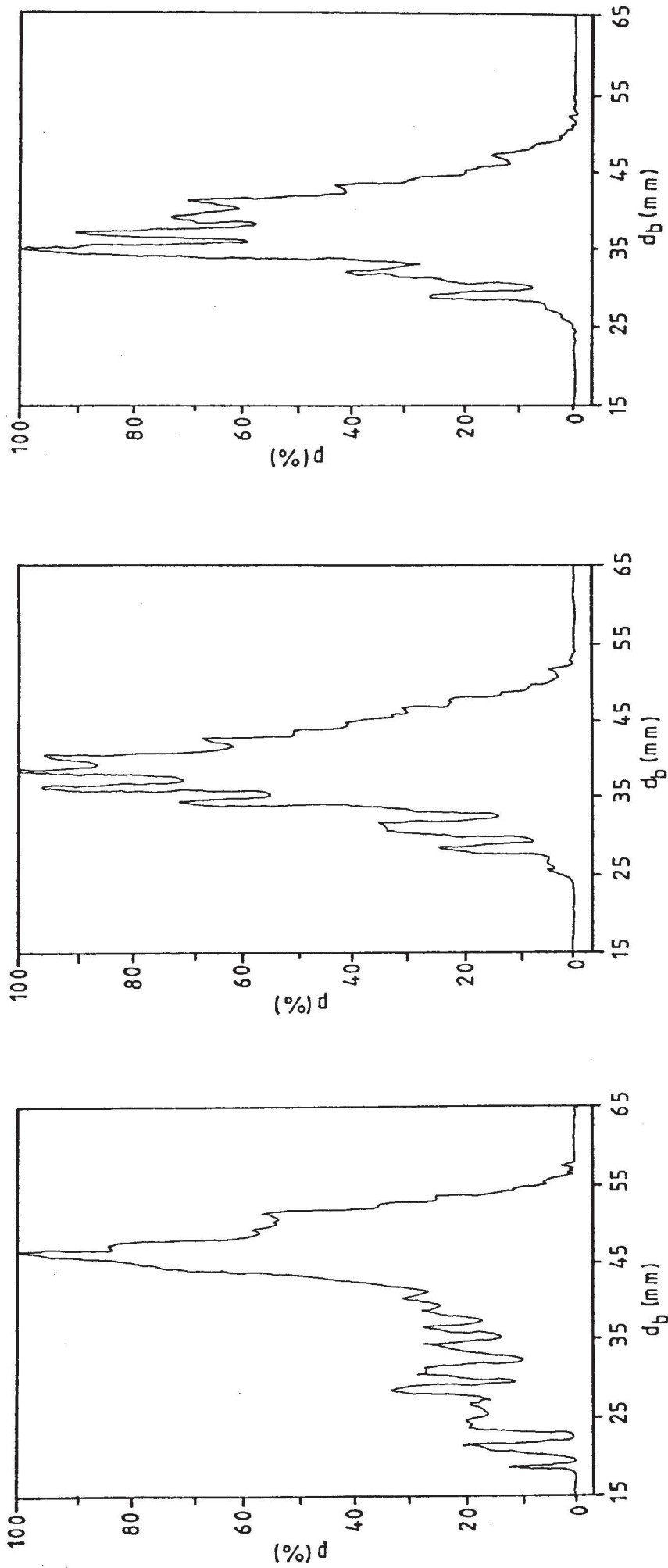


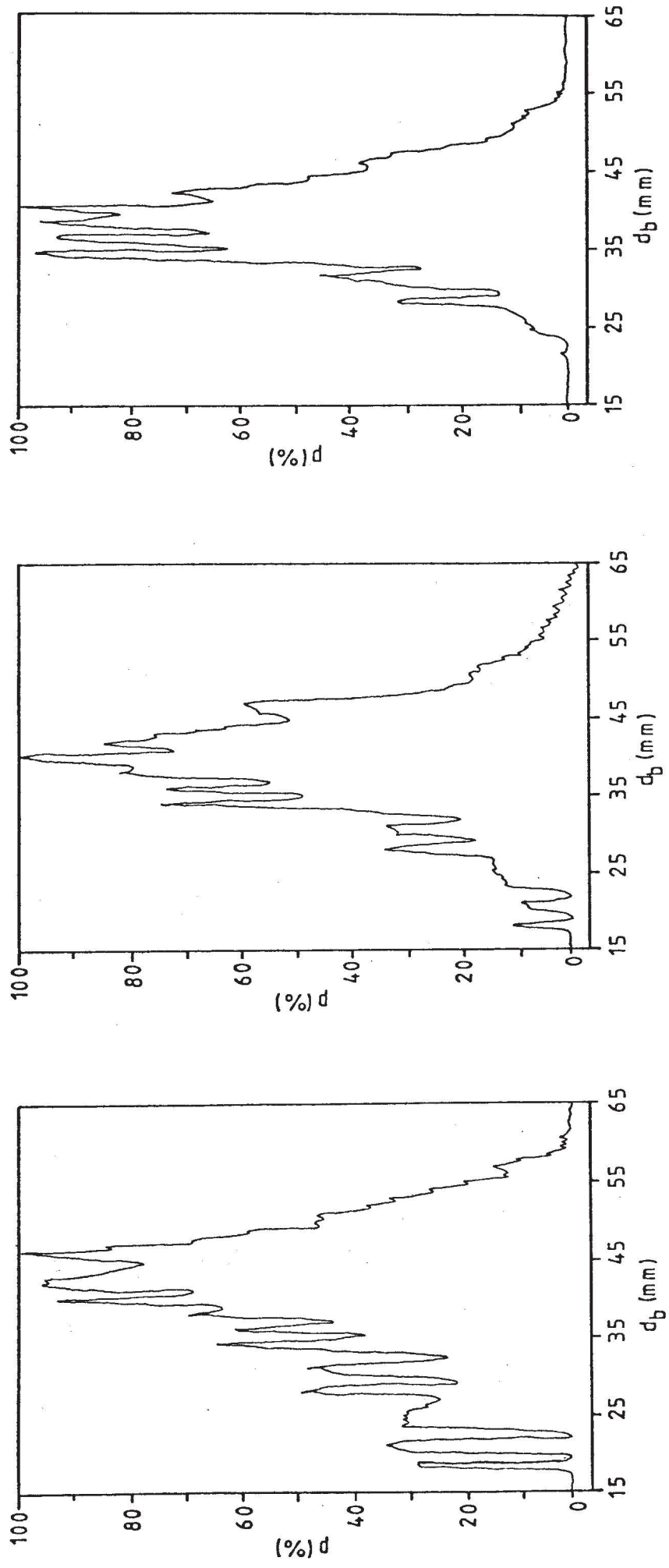
Bild 9: Prinzip der elektrooptischen Blasengrößenmessung mit Absaugsonden  
(aus Barczewski, [7] )



a) 40 µm Filter  
b) 90 µm Filter  
c) 180 µm Filter

( $p$  = Zahl der Blasen als Prozent des maximalen Wertes)

Bild 10: Blasengrößen-Häufigkeitsverteilung bei  $q_a = 4 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$  für verschiedene Filtermaterialien



a) 40 µm Filter

b) 90 µm Filter

c) 180 µm Filter

( $p$  = Zahl der Blasen als Prozent des maximalen Wertes)

Bild 11: Blasengrößen-Häufigkeitsverteilung bei  $q_a = 15 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$  für verschiedene Filtermaterialien

Filtermaterialien ( $\mu\text{m}$ )	Luftdurchfluß pro Breiten- einheit ( $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ )	Häufigste Blasen- durchmesser (mm)
40	4	4,7 - 5,1
40	15	4,0 - 4,7
90	4	3,4 - 4,2
90	15	3,4 - 4,7
180	4	3,4 - 4,0
180	15	3,4 - 4,2

Bild 12: Vergleich der Blasendurchmesser bei verschiedenen Filtermaterialien

Insgesamt unterstützen diese Blasengrößenmessungen unsere ursprünglich getroffene Annahme, daß die resultierenden mittleren Blasendurchmesser in erster Linie abhängig sind vom Luftdurchsatz und nur sekundär von den Details der Luftzufuhr (Filterporen- oder Düsendurchmesser) beeinflußt werden.

### 5.3 Erkenntnisse aus der Modellfamilienuntersuchung

Die Korrelation der Untersuchungsergebnisse an drei verschiedenen großen Standzylindern hat verdeutlicht, daß eine direkte Übertragung von Modellergebnissen auf Naturabmessungen derzeit noch nicht oder allenfalls größenordnungsmäßig erfolgen kann. Die angesetzte Korrelation kann noch nicht befriedigen; vielmehr zeigen die Ergebnisse, daß unter Umständen den Zähigkeitseffekten (Reynoldszahl) hier doch eine wesentliche Bedeutung zukommen kann.

Dies wird aus den Beobachtungen bei mittlerem Zylinderdurchmesser ( $D = 29 \text{ cm}$ ) deutlich. Dort stellten sich bei kleinen Luftdurchsätzen ( $0.03 \text{ l/s}$ ) deutlich größere Blasen-



durchmesser ein als bei entsprechend größeren Luftströmen (0,09-0,22 l/s), was sich auch in den Sauerstoffeinträgen widerspiegelt. Der Grund für diese Anomalie dürfte in der Turbulenzintensität zu suchen sein, die durch die Blasenbewegung erzeugt wird: bei kleinen Durchsätzen und geringer Turbulenz koaleszieren die Blasen im Düsenbereich, während sie bei höher werdendem Durchsatz und damit zunehmendem Turbulenzgrad zunehmend zerfallen. Diese Effekte werden quantitativ durch die Reynoldszahl der Blasenströmung erfaßt, die in der bisherigen Analyse als sekundär betrachtet worden war.

Interessanterweise wurde diese Anomalie weder bei dem kleinen Zylinder (Durchmesser 14 cm) noch beim großen (Durchmesser 63 cm) beobachtet. Es ist daher denkbar, daß die Strömung im kleinen Rohr in unseren Experimenten stets bei Reynoldszahlen erfolgte, die einem "laminaren" Blasenschwarm entsprechen, und die Experimente im großen Rohr stets großen Reynoldszahlen mit voll turbulentem Blasenschwarm entsprechen, während im mittleren Zylinder gerade kritische Verhältnisse im Übergangsbereich vorherrschten. Diese Vermutungen bedürfen jedoch noch der weiteren Klärung, die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht weiter verfolgt werden konnte.

LITERATURHINWEISE

- 1 Rao, N.L.S., Kobus, H., Herausgeber: "Self-Aerated Free Surface Flows", Heft 10, Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1975.
- 2 Markofsky, M., Kobus, H.: "A Unified Presentation of Weir-Aeration Data", ASCE Journal of the Hydraulics Division, April 1978.
- 3 Hutarew, A.: "Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehaltes in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren", Mitteilungsheft Nr. 41 des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1977.
- 4 Markofsky, M., Kobus, H.: "On the Modeling of Artificial Reoxygenation", Proceedings, IAHR-Kongress, Baden-Baden, 1977.
- 5 Markofsky, M.: "On the Reoxygenation Efficiency of Diffused Air-Aeration", IAWPR-Conference on Aeration, Amsterdam, September 1978.
- 6 Markofsky, M.: "On the Scaling of Laboratory Oxygenation Studies", Proceedings, 26<sup>th</sup> ASCE Hydraulic Division Conference, August 1978.
- 7 Barczewski, B.: "Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen, Mitteilungsheft Nr. 45 des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, 1979.
- 8 Kobus, H.: "Zur Problematik der Erfassung des künstlichen Sauerstoffeintrags", Kap. 1 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980.
- 9 Markofsky, M.: "Flußwasserbelüftung mit Druckluft und Sauerstoff", Kap. 4 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980
- 10 Hollweg, U.: "Eintragsversuche mit Sauerstoffgas in Flüssen", Kap. 5 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980.

- 11 Novak, P.: "Luftaufnahme und Sauerstoffeintrag an Wehren und Verschlüssen", Kap. 6 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980.
- 12 Hanisch, H.: "Naturmessungen über den Sauerstoffeintrag an verschiedenen Wehrformen", Kap. 7 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980.
- 13 Hutarew, A.: "Sauerstoffeintrag an einem Wehr in Modell und Natur", Kap. 8 in "Natur- und Modellmessungen zum künstlichen Sauerstoffeintrag in Flüsse", Mitteilungsheft Nr. 49 des DVWK, 1980.