

JOACHIM WIETING\*

## TIEFENWASSERBELÜFTUNG BEI TALSPERREN

Der Sauerstoffmangel ist im Wasser mancher Talsperren schon so groß, daß dieses mit  $O_2$  künstlich angereichert werden muß. Diesem Zweck dient Tiefenwasserbelüftung, die mit verschiedenen Belüftungsaggregaten durchgeführt werden kann. Der Verfasser charakterisiert Strahlpumpenbelüfter der Bauarten „Sosa“ und „Schönbrunn“, die in den Speicherbecken der DDR eingesetzt worden sind und vergleicht deren Arbeitsweise mit Belüftern anderer Bauarten.

### 1. EINFÜHRUNG

Die künstliche Belüftung ist eine erfolversprechende Methode, um den Sauerstoffhaushalt von Standgewässern mit vertretbarem Aufwand zu verbessern und die natürliche Selbstreinigungsfunktion wirkungsvoll zu unterstützen. Die Belüftung von Tiefenwasser bei temperaturgeschichteten Talsperren und Seen hat sich in zahlreichen Testanlagen als die günstigste Möglichkeit erwiesen, wenn alle Maßnahmen der Abwasserreinigung erschöpft waren und die Restbelastung das Selbstreinigungsvermögen des Gewässers überschritten hatte. Um eine brauchbare Wasserqualität mittels Belüftung zu erreichen, ist ein erheblicher finanzieller Aufwand erforderlich. Die Gewässerbelüftung mittels Druckluft und frei aufsteigendem Blasenschleier in einem Zylinder hat zu zahlreichen, unterschiedlichen technischen Prinzipien geführt [1] bis [12].

Abweichend von dem in den meisten Ländern angewendeten Belüftungsprinzip wurde in der DDR, beginnend im Jahre 1968, die Strahlbelüftung mit Pumpenförderung [13,14] entwickelt. Diese Entwicklungsrichtung wurde gewählt, um durch Wasser-Luft-Gemische einen hohen Förderstrom in der Belüftungsanlage nach dem Mammut-Prinzip und damit einen hohen Sauerstoffeintrag zu erzielen. Weitere Gesichtspunkte waren: Längere Lebensdauer von Kreiselpumpen gegenüber Kompressoren, geringere Betriebs- und Wartungskosten beim Pumpenbetrieb, geringere Lärmentwicklung und Störanfälligkeit von Pumpen gegenüber Kompressoren und keine Ölverschmutzung in dem zu belüfteten Wasser.

## 2. WIRKUNGSWEISE DER TIEFENWASSERBELÜFTER MIT HOHLSTRAHLDÜSE

Durch den Belüfter wird hypolimnetisches Wasser mit Hilfe von Pumpen auf eine bestimmte Höhe über den Wasserspiegel gefördert und tritt nach Passieren einer Luftaufnahmestrecke in ein senkrecht unter den Wasserspiegel führendes Rohr ein. In vorbestimmter Tiefe wird das Gemisch um  $180^\circ$  gelenkt und in ein Steigrohr geleitet. Nach dem Passieren des Steigrohrs und dem Ausscheiden der Luftblasen erfolgt das Rückströmen des mit Sauerstoff angereicherten Wassers durch einen zwischen dem Steig- und Mantelrohr gebildeten Ringraum in das Hypolimnion, ohne daß eine Zerstörung der temperaturabhängigen Schichtung des Wassers eintritt (Bild 1).

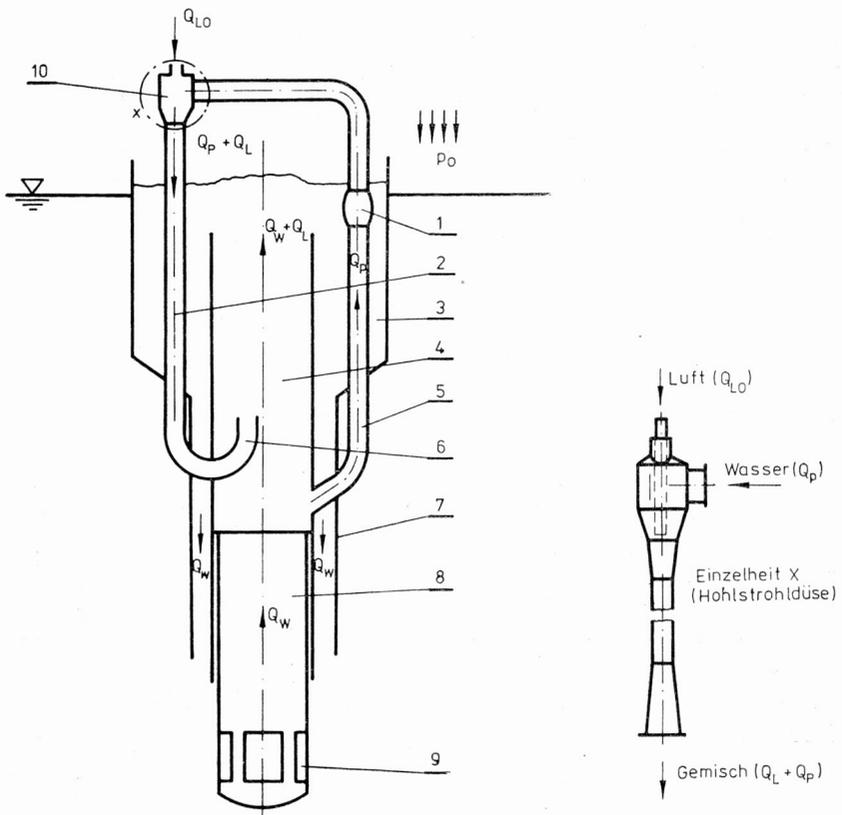


Bild 1. Systemskizze des Belüftungsaggregates Typ „Schönbrunn“

1 – Pumpen, 2 – Blasenführungsrohr, 3 – Anlagenkopf, 4 – Zentralrohr, 5 – Pumpensaugleitungen, 6 – Einleitungskrümmen,  
7 – Mantelrohr, 8 – Teleskoprohr, 9 – Eintrittsöffnungen

Rys. 1. Szkic agregatu napowietrzającego typu „Schönbrunn“

1 – pompy, 2 – przewód banieczek, 3 – głowica, 4 – rura centralna, 5 – przewody ssące pomp, 6 – krzywak wlotowy, 7 – rura osłonowa, 8 – rura teleskopowa, 9 – otwory wlotowe

Luft – powietrze, Wasser – woda, Einzelheit X – jednostka X, Hohlstrahldüse – strumienica, Gemisch – mieszanina

Die seit Anfang der siebziger Jahre im Einsatz befindlichen Belüftungsanlagen Typ „Sosa“ und Typ „Schönbrunn“ weisen gleiche Pumpen, Belüfter, Durchmesser in den Ansaugleitungen sowie Blasenführungsrohren auf und münden in gleicher Tiefe in das Zentralrohr ein. Der Unterschied besteht darin, daß im Typ „Schönbrunn“ vier Pumpen, Pumpensaugleitungen und Blasenführungsrohre und im Typ „Sosa“ davon jeweils nur ein Stück installiert ist. Bei einem Querschnittsverhältnis der durchströmten Flächen von 4:1, stellt der Typ „Schönbrunn“ das arithmetische Vielfache des Typs „Sosa“ dar.

Die geschlossene Darstellung der hydraulischen Parameter der Belüftungsanlage ist möglich und wurde in [15] näher beschrieben. Unter der Voraussetzung homogener Durchmischung und isothermer Gasausdehnung, wobei für die Dichte- und Druckverteilung mit einem Mittelwert gerechnet wurde, ergab sich eine gute Übereinstimmung der errechneten Werte mit den Meßdaten. Nach weiterführenden Untersuchungen in [16] und [17] ist es unter Berücksichtigung der realen Dichte- und Druckverteilung in einem beliebig von Wasser-Luft-Gemisch durchströmten vertikalen Rohr möglich, unter Zuhilfenahme der elektronischen Datenverarbeitung die Leistungskurven, bei denen sowohl die Kompressibilität der Luft als auch die Strömungsverluste berücksichtigt werden, vorauszuberechnen.

### 3. LEISTUNGSPARAMETER DER BELÜFTER „SOSA“ UND „SCHÖNBRUNN“

Zur Leistungsermittlung wurden umfangreiche Versuche an Prototypen unter realen Einsatzbedingungen durchgeführt. Der Förderstrom wurde mit Meßfüßeln im Zentralrohr unmittelbar hinter den Eintrittsöffnungen und zum Vergleich im Mantelrohr (Kreisringfläche) sowie im Bereich des austretenden Wasserstromes durchgeführt. Die Umwälzleistung beträgt beim Typ „Sosa“ knapp 2000 m<sup>3</sup>/h und beim Typ „Schönbrunn“ maximal 9200 m<sup>3</sup>/h.

Der angesaugte Luftstrom durch die Hohlstrahldüsen wurde gemessen und beträgt ca. 90 m<sup>3</sup>/h · Düse. Der Sauerstoffeintrag wurde mit einem temperaturkompensierten Feldmeßgerät ermittelt. Parallel dazu sind Wasserproben nach der klassischen Methode auf Sauerstoffgehalt (Winkler) und Sulfid untersucht worden. Die Meßwerte wurden im Bereich der Eintrittsöffnungen im Teleskoprohr, entlang des Zentralrohres und des Mantelrohres bis zur Ausmündung ins Hypolimnion gewonnen. Bei 50 prozentigem Sauerstoffdefizit und 10°C ergibt sich beim Typ „Sosa“ ein Eintrag von 3,7 kg O<sub>2</sub>/h, eine Sauerstoffausnutzung von 13,5% und beim Typ „Schönbrunn“ 2,09 mg/l bzw. 19,27 kg O<sub>2</sub>/h und 18,6%. Der Sauerstoffertrag bezogen auf die Pumpennennleistung beträgt 0,5 kg/kWh bzw. 18,6 kg/kWh.

### 4. BETRIEB UND WARTUNG DER DDR-BELÜFTUNGSANLAGEN

Das Antriebsorgan der Belüfter, die Unterwasserpumpe, ist wartungsarm und geräuscharm im Lauf. Hinsichtlich des Dauerbetriebes liegen unterschiedliche Erfahrungen vor. Bei einer Dauerbeanspruchung spielt die Aggressivität des Wassers und die Fahrweise

der Pumpen eine Rolle. Ein intermittierender Betrieb der Pumpen (Ausnutzung des billigen Nachtsromes) garantiert eine höhere Lebensdauer. Der Einsatz des glasfaserverstärkten ungesättigten Polyesterharzes hat sich für große Bauteile und in aggressiven Medien als günstig erwiesen. Von Vorteil sind geringe Transport- und Montagemasse gegenüber Stahl. Die Materialkosten und Vorfertigung von Wickelkernen sowie Formen überschreiten dagegen herkömmliche Anlagen. Die Endfertigung der Anlage muß in einer überdachten, heizbaren und belüfteten Fertigungsstätte (Länge: 40 m, Breite: 20 m, Höhe: 16 m) erfolgen.

Durch die schwimmende Anordnung der Belüfter besteht im Winter die Gefahr des Ein- und Zerstrierens sowie die Beschädigung durch Treibeis bzw. abtriftendes Eis bei Wasserspiegelschwankungen. Da ein Winterbetrieb vom Prinzip her nicht erforderlich ist, bieten sich Möglichkeiten der Winterfestmachung, wie Absenken des Aggregates in horizontaler oder senkrechter Lage auf 1 bis 2 m unter Wasserspiegel bzw. auf den Gewässersgrund oder ein Herausnehmen an Land, an. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, daß ein Absenken der Anlage trotz vorhandenen Steges zu erheblichen Schwierigkeiten beim Aufschwimmen führt. Das Herausnehmen an Land stellt theoretisch die günstigste Lösung dar, erfordert jedoch eine gesonderte Slipanlage, Abstellplatz und Hebezeuge. Bei der praktischen Handhabung am Typ „Schönbrunn“ zeigte es sich, daß eine sachgemäße Lagerung auf der Slipanlage beim Herausfahren schwer durchführbar ist und es zu empfindlichen Schäden kommen kann. Ein Dauerbetrieb während der gesamten Frostperiode hat sich demgegenüber, auch bei extremen Minusgraden, als die günstigste Lösung erwiesen. Neben einer strahlenförmigen Eisabweiserkonstruktion mit Holzplanken bietet oberflächlich abströmendes, wärmeres Tiefenwasser über Anbohrungen im Anlagenkopf einen ausreichenden Schutz vor Eis. Ein jährlicher Korrosionsschutz der Stahlteile, Austausch von Pumpen- und Flanschdichtungen sowie die ständige Überprüfung der Schwimmkörper gehören zum Instandhaltungsprogramm. Pro Anlage werden nach einer Analyse der notwendigen Wartungsarbeiten 2,6 Arbeitskräfte benötigt. Die Lebensdauer der Tiefenwasserbelüfter wird mit 10 bis 15 Jahren veranschlagt.

## 5. VERGLEICHENDE BETRACHTUNGEN AN TIEFENWASSERBELÜFTUNGSVERFAHREN

Der internationale Trend in der Belüftung weist eine Zugabe von Druckluft bzw. Sauerstoff im Tiefenwasser auf. Die im einzelnen entwickelten Verfahren basieren auf einem Sauerstoffeintrag über Diffusoren und Düsen, der Ausnutzung des Lufthebeprinzips und der Erzeugung eines Gemisches, dessen Entgasung in gesonderten Behältern sowie der Rückleitung des belüfteten Tiefenwassers ins Hypolimnion. Dabei wird in der Literatur zwischen „Full Air Lift Designs“ (Druckluft wird an der tiefsten Stelle des Belüfters zugegeben, das Gemisch steigt bis zur Seeoberfläche auf), „Partial Air Lift Designs“ (Gemisch wird nicht bis zur Seeoberfläche geführt, sondern in der Anlage separiert und die Luft gesondert an die Atmosphäre geleitet) und „Downflow Air Injektion“ (Wasser und

Druckluft werden mittels Pumpenantrieb in einem abwärtsgerichteten Strom zum Gewässergrund gebracht) unterschieden. Zu den erst genannten Verfahren gehören das Wahnbach — Verfahren [2] bis [5], der Hamlock-Belüfter [9] und die Belüfter vom TULINGESJÖN sowie JÄRLASJÖN, Schweden [10]. Der bekannteste Vertreter des „Partial Air Lift Design“ ist der Limnox-Belüfter [6] bis [8]. Von SPEECE sind zwei Gedankenmodelle des

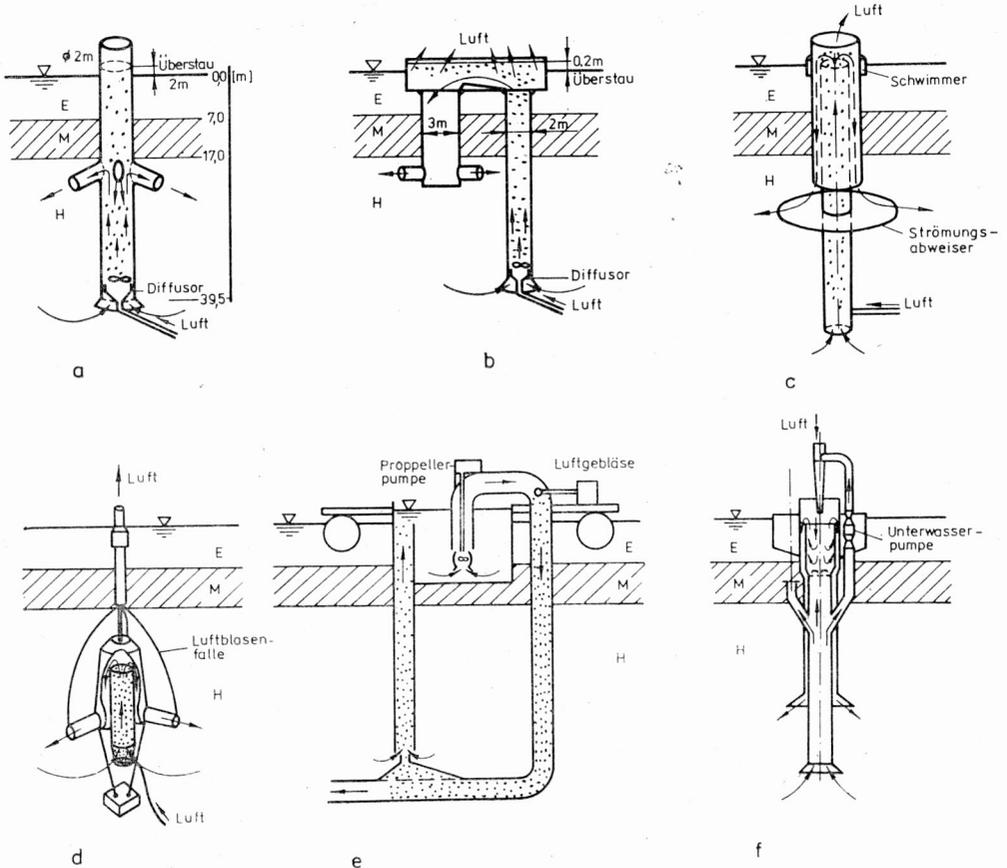


Bild 2. Schematische Darstellung von Tiefenwasserbelüftungssystemen (E — Epilimnion, M — Metalimnion, H — Hypolimnion)

a) TW-Belüfter Wahnachtalsperre 1967 nach [2], b) TW-Belüfter Wahnachtalsperre 1975 nach [4], c) Hemlock-Seenbelüfter nach [9], d) Limnox-TW-Belüfter nach [7], e) U-Rohr-Belüfter n. SPEECE nach [11], f) Versuchsanlage zur TW-Belüftung an der Rappbodetalsperre

Rys. 2. Schematy systemów do głębokiego napowietrzania wody (E — epilimnion, M — metalimnion, H — hypolimnion)

a) urządzenie napowietrzające typu Wahnbach 1967 [2], b) urządzenie napowietrzające typu Wahnbach 1975 [4], c) urządzenie napowietrzające do jezior typu Hemlock [9], d) urządzenie napowietrzające typu Limnox [7], e) urządzenie napowietrzające w kształcie litery U, f) doświadczalne urządzenie do głębokiego napowietrzania na zaporze Rappbode  
Überstau — spięzzenie, Diffusor — dyfuzor, Luft — powietrze, Schwimmer — pływak, Strömungsabweiser — odbojnica strug, Luftblasen-falle — pułapka pęcherzyków powietrza, Propellerpumpe — pompa przepelnieniowa, Unterwasserpumpe — pompa podwodna, Luftgebläse — dmuchawa powietrza

Vergleichende Betrachtungen der Leistungsdaten ausgewählter Tiefenwasserbelüftungssysteme  
 Porównawcza charakterystyka parametrów technicznych wybranych urządzeń do wglębne napowietrzania

Hypolimnion- belüfter	Wirkprinzip	Einsatzort
System Wahnbach-Tal- sperrenverband [1]	Drucklufteintrag über Diffusoren, Mischluftförderung, Steigrohr bis zum Entgasungsbehälter, Rückleitung über Fallrohr ins Hypolimnion	TS Wahnbach, BRD [2] TS Wahnbach, BRD [3], [18] TS Klincava, ČSSR Hamlocksee, USA [9]
Limnox-System	Drucklufteintrag in einem am Gewäs- sergrund untergetauchten Gerät, ange- saugtes Tiefenwasser direkt im Belüfter mit Sauerstoff angereichert direkte Rück- leitung ins Hypolimn., Luftrückführung erfolgt über Schläuche zur Oberfläche	Wagingersee, BRD [8] Wacabucsee, USA [7]
U-Rohr-Belüfter nach Speece	Wasserförderung mit Propellerpumpe aus Schwimmbehälter, Luftspeisung durch Gebläse, Gemisch gelangt ins Hypolimn., Luftrückführung erfolgt über ein als Mischluftheber ausgebil- detes Steigrohr, das den Schwimmbehäl- ter mit hypolimn. Wasser füllt	(Computermo- dell) [10] bis [12]
Tiefenwasserbelüfter mit Hohlstrahldüse Typ „Rappbodevorsperre“ Typ „Sosa“ Typ „Schönbrunn“	Förderung von Tiefenwasser durch Teleskoprohr u. abzweigende Pumpen- saugrohre mittels Unterwasserpumpe, Belüftung über Hohlstrahldüse in Blasenführungsrohre, Gemisch im zen- tralen Steigrohr bewirkt eine 3fach höhere Sekundärförderung, Rückleitung über Mantelrohr u. Austrittsschirm ins Hypolimnion	Rappbode-Vor- sperre DDR [13] TS Sosa, DDR [14] TS Schönbrunn und TS Bleiloch, DDR [15]
Tiefenwasserbelüfter mit Multidiffusor (DDR WP B 01 F) 209 376)	Drucklufteintrag im mittleren Tiefen- bereich d. Förderrohres, durch Multi- diffusor starke Reduzierung d. Gesch- windigkeit u. hohe Gasverweilzeit, Aufstieg d. Gemisches bis zum Entga- sungsbehälter, Rückleitung über Fallrohr ins Hypolimnion	Rechenmodell mit labormäßigen Aufsättigun- gsuntersuchungen

<sup>1</sup> Abweichend vom Typ „Sosa“ und „Schönbrunn“ erfolgte die Belüftung durch Tauchstrahl mit Einstrahlung in einen

<sup>2</sup> Durchsatz auf  $p_i$  an der Einleitungsstelle bezogen.

<sup>3</sup> Bezogen auf  $V_L$  bei dem Druck  $p_i$  an der Einleitungsstelle.

<sup>4</sup> Energiebedarf auf die Nennleistung des Pumpenantriebs bezogen (Zuschlagsfaktor auf die Nennleistung von ca. 1,2 für

Tafel 1

(Sauerstoffeintrag auf biologisch abbaubares Abwasser mit 50% Defizit bezogen)  
 wód (zdolność natleniania odniesiono do ścieków biologicznie rozkładalnych i 50% deficytu tlenu)

Fördermenge Luft [m <sup>3</sup> /h] ( $p \approx 1$ bar)	Wasserdurch- satz [m <sup>3</sup> /h]	Sauerstoff- eintrag [kg/h]	Sauerstoff- ertrag [kg/kWh]	Sauerstoff- ausnutzung [%] ( $p \approx 1$ bar)
924 (240) <sup>2</sup>	7200	23	0,72..0,84	8,9 (36) <sup>3</sup>
1680 (420) <sup>2</sup>	13000	65	1,08	13,8 (50) <sup>3</sup>
(60) <sup>2</sup> (168..252) <sup>2</sup>	1450 ?	1,5 ?	0,11 ?	(8,0) <sup>3</sup> ?
(60..350)	bis 1000	3,3..6,0	0,29..0,39 (Tiefe 16m)	6..8
(240) <sup>2</sup>	900	8,4	0,38..0,57 (Tiefe 10m)	12,5 <sup>3</sup>
540	2160	32 (bei einem Defizit von ca. 90%)	1,35	20,8
100	490	1,72..1,96	0,61..0,68 <sup>4</sup>	5,8..6,6
96	450 primär	3,7	0,5 <sup>4</sup>	13,5
360	1560 gesamt	19,5	0,69 <sup>4</sup>	18,6
	1350 primär			
	9200 gesamt			
420	4380	12,4	1,06	19,5

Reaktionsbehälter.

Angabe d. theoret. Leistung).

„Downflow Air Injection“ bekannt [11]. Weitere Belüftungssysteme, vor allem mechanische Einrichtungen, sind in [12] beschrieben. Insgesamt sind 21 Entwicklungen bekannt, von denen 12 bereits in Anlagen getestet wurden.

In Bild 2 sind die bekannten Verfahren dargestellt und in der Tafel 1 die Einsatzorte mit den Leistungsparametern. Von den drei wesentlichsten Arten der Tiefenwasserbelüftung ist das System Wahnbach (Bild 2a) durch eine einfache Konstruktion und niedrige Wartungskosten gekennzeichnet. Nachteilig wirkt sich aus, daß nur der untere Teil des zylindrischen Rohrs bis zum Flüssigkeitsaustritt für Sauerstoffübergang und Förderung ausgenutzt wird und der Blasenaustieg in der ruhenden Flüssigkeit für Förderung und Sauerstoffübergang ohne Einfluß ist. Die Entspannungsarbeit wird nicht vollständig ausgenutzt (analog Limnox-System). Bei der geringen Kontaktzeit der Blasen beträgt die Ausnutzung  $\eta_{02} \lesssim 0,3$ . Die erwähnten Nachteile werden durch die Konstruktion nach Bild 2b beseitigt. Lediglich der hohe Gegendruck, der auch bei dieser Konstruktion für den Luftertrag erforderlich ist, wirkt sich negativ auf den Sauerstofftrag und damit auf die Betriebskosten aus.

Bei dem U-Rohr-Belüfter nach SPEECE handelt es sich um ein Computermodell, dessen hohe Leistungsdaten noch einen experimentellen Nachweis bedürfen. Nachteilig ist, daß der errechnete hohe Wirkungsgrad nur mit großem Energieeinsatz (Pumpe und Gebläse) zu erzielen ist. Die hohe Koaleszenz, die im Gegenstrom Blase-Flüssigkeit vorherrscht, bewirkt trotz langer Kontaktzeit eine relativ geringe Gasausnutzung.

Mit den Anlagen „Sosa“ und „Schönbrunn“ wurden bisher wesentliche volkswirtschaftliche Ergebnisse bei der Verbesserung der Rohwasserqualität in Trinkwassertalsperren, Rappbodevorsperre (Einsatz ab 1971), TS Sosa (Einsatz ab 1973/74), TS Schönbrunn (Einsatz ab 1975/76) und bei der Mehrfachnutzung der Brauchwassertalsperre Bleiloch (Einsatz ab 1976) erzielt. Nachteile sind die gering geförderte Gasmenge (Gaseintrag in den Fallrohrleitungen mit etwa  $\dot{V}_{\hat{G}} = \dot{V}_{\hat{G}} / (\dot{V}_{\hat{G}} + \dot{V}_{\hat{L}}) \approx 0,2$  aus Stabilitätsgründen begrenzt), die starke Koaleszenz im Abstrom und der damit verbundene relativ geringe Stoffübergang.

Um den großen Bedarf an Belüftern für Talsperren, Seen und Tagebaurestlöchern mit Tiefen über 10 bis 20 m abzudecken, gilt es neben den gegenwärtig produzierten Typen Belüfter zu entwickeln, die einen relativ einfachen Aufbau besitzen, transportabel sind und hohe Sauerstoffausnutzungsraten besitzen. Der Belüfter soll neben dem Einsatz in geschichteten Gewässern auch in Standgewässern bei Destratifikation eingesetzt werden.

## 6. DRUCKLUFT-TIEFENWASSERBELÜFTER MIT MULTIDIFFUSOR NACH [18]

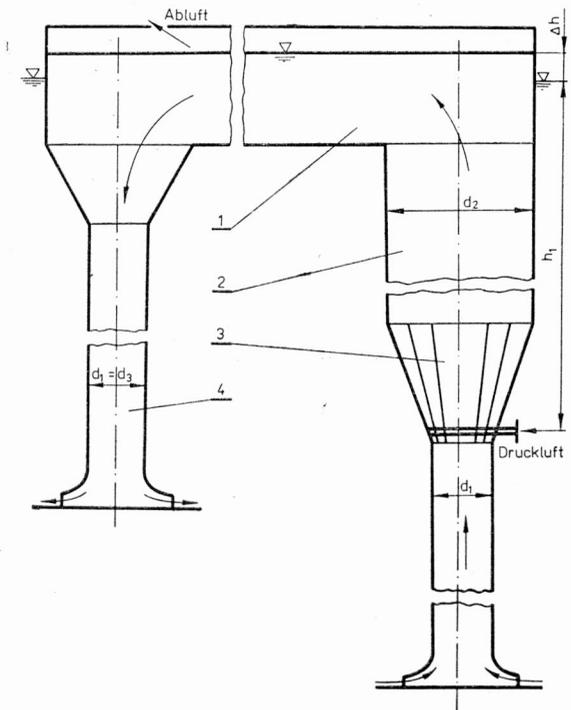
Nach dem in Bild 3 vorgeschlagenen Belüfter [19] erfolgt die Förderung des Tiefenwassers durch Drucklufteinspeisung im mittleren Tiefenbereich des Förderrohres über seitlich gelochte Rohre oder Filterrohre. Unmittelbar nach der Gaseinspeisung erweitert sich der Rohrquerschnitt in Form eines Multidiffusors auf etwa das Vierfache. Bei einer Belüftung

Bild 3. Belüftungsvorrichtung mit Multidiffusor im Schnitt für geschichtete Gewässer

1 — Entgasungsbehälter, 2 — Förderrohr, 3 — Multidiffusor, 4 — Abströmrohr

Rys. 3. Przekrój wielodyfuzorowego urządzenia napowietrzającego w wodach uwarstwionych

1 — zbiornik odgazowania, 2 — przewód tłoczny, 3 — multidyfuzor, 4 — przewód odpływu  
Abluft — powietrze odlotowe, Druckluft — powietrze sprężone



von Schichtgewässern kann die Rückführung des Sauerstoff angereicherten Wassers sowohl durch koaxial angeordnete Rohre in Kompaktbauweise (Tiefenwasserbelüfter mit Hohlstrahldüse) als auch bei einer strömungstechnisch günstigeren Gestaltung über zwei getrennte Rohre mit gleichem Durchmesser erfolgen [4]. Im letzteren Fall wird gegenüber einer koaxialen Ausführung bei gleichem Strömungsquerschnitt der Materialaufwand um ca. 20% und der Druckverlust um ca. 25% gesenkt. Wird das Gas in 8 m Tiefe eingespeist, so kann bei gleicher adiabater Verdichterleistung im Vergleich zu einer Einspeisung in 35 m Tiefe, wie sie z.B. beim Wahnbach — Belüfter vorliegt (Bild 2a), die 2,9 fache Luftmenge gefördert werden. Mit dem nachgeschalteten Multidiffusor wird die Flüssigkeitgeschwindigkeit stark gemindert und eine lange Gasverweilzeit erreicht, die einer vergleichsweise tieferen Gaseinleitungsstelle entspricht. Von Vorteil ist weiterhin, daß der Gaseintrag im Förderrohr bei hohen Geschwindigkeiten erfolgt und damit eine gute Dispergierung der Gasblasen erreicht wird.

Zur Dimensionierung der vorgeschlagenen Belüftungseinrichtung werden folgende Beziehungen angesetzt:

Kupplungsleistung zum Einspeisen der Luft in der Tiefe  $h_1$

$$P_k = p_0 \cdot \dot{V}_{g0} / \eta_v \cdot \kappa / \kappa - 1 \cdot [(p_1 / p_0)^{\kappa - 1 / \kappa} - 1], \quad (1)$$

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1 + \Delta p .$$

Hubleistung der Gasblasen beim Aufstieg von  $h_1$  auf  $h_2$  ( $h_2 = 0$ )

$$P_H = \frac{p_0 \cdot \dot{V}_{g0}}{1 + v_s/\bar{w}_L} \ln \left[ \frac{1 + (\bar{w}_L + v_s)/\dot{V}_{g0} \cdot A}{1 + (\bar{w}_L + v_s)/\dot{V}_{g0} \cdot A} \cdot \frac{p_1/p_0}{p_2/p_0} \right] \quad (2)$$

$\dot{V}_{g0}$  — Ansaugluftmenge ( $10^\circ\text{C}$  und  $p_0$ )  $p_0 \dot{V}_{g0} = p_N \dot{V}_N$  ( $t \approx 0^\circ\text{C}$ ),

$w_L = \dot{V}_L/A$  Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit auf den Förderquerschnitt  $A$  bezogen,

$v_s$  — Schlupfgeschwindigkeit.

Umwälzleistung

$$P_u = (\Sigma \zeta \cdot \rho_L / 2 \bar{w}_L^2 + \Sigma \zeta \cdot \rho_L \bar{w}_L^2 / 2(1 - \varphi_g)) \cdot \dot{V}_L \quad (3)$$

Mit  $\zeta_{ges.} = 2\zeta_{Einlauf} + \lambda \cdot L/d + \zeta_{Diffusor} + \zeta_{Austritt} + \zeta_{Kasten} = 2,4$

läßt sich die Umwälzmenge durch Gleichsetzen von  $P_u = P_H$  ermitteln. Durch den Stoffübergang, der im Gleichstrom erfolgt, verringert sich der Partialdruck des Sauerstoffs entsprechend der Gasausnutzung

$$p_{O_2} = p \cdot \psi_{O_2A} = 0,21(1 - \eta_{O_2})/1 - 0,21\eta_{O_2} \cdot p \quad (4)$$

Andererseits gilt für die übergehende Sauerstoffmenge

$$\dot{m} = \dot{V}_{g0} \cdot \eta_{O_2} \cdot 0,3 \quad (5)$$

Bei Entspannung bis an die Flüssigkeitsoberfläche ( $p \approx 1$  bar), einer Sättigungskonzentration  $C_L^* = 13 \text{ g/m}^3$  (bei  $p_{O_2} = 0,1$  at,  $t \approx 4^\circ\text{C}$ ) und einer Eintrittskonzentration  $C_{LE} = 2 \text{ g/m}^3$  lassen sich aus einer iterativen Lösung der Gl. (4) und (5) Wertepaare für eine maximal mögliche Aufsättigung  $C_{max} = C_{LA}^* - C_{LE}$  mit  $C_{LA}^* = 13 \cdot \psi_{O_2A}/0,21 \text{ g/m}^3$  mit dem Gasausnutzungsgrad  $\eta_{O_2}$  ermitteln, bei denen ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Aus durchgeführten Aufsättigungsversuchen im Labor der Ingenieurhochschule Köthen wurde ermittelt, daß eine Auslegung im Bereich  $\dot{V}_L/\dot{V}_g = 10 \dots 40$  zu erfolgen hat, wo die günstigsten Ausnutzungsgrade zu erzielen sind.

In der Tafel 2 sind die Ergebnisse der Variantenrechnung aufgetragen. Die Gegenüberstellung zeigt, daß ein Einblasen in geringerer Wassertiefe (Zeile 3) in einem zylindrischen Rohr bezüglich des Stoffübergangs keine Verbesserung gegenüber dem Wahnbach — System bringt. Dagegen ergibt ein zylindrisches Rohr  $d_1 = 1,5$  m mit Erweiterung auf  $d_2 = 3$  m ausgezeichnete Ergebnisse als Folge der verlängerten Kontaktzeit (Zeile 4). Eine Verkleinerung auf  $d = 1/2,5$  m (Zeile 5) bewirkt eine starke Reduzierung der Umwälzmenge und des Stoffübergangs. Das von 1 m auf 2,5 m erweiterte Rohr sollte daher nur mit ca.  $420 \text{ Nm}^3/\text{h}$  begast werden.

Den Rechnungen wurde eine Blasengröße  $d_B = 4$  mm zugrunde gelegt, desweiteren die Erkenntnis, daß der Gasausnutzungsgrad unabhängig vom Druck ist. Bei der Anwendung einer Frittenbegasung sind kleinere Blasen möglich, zumal durch die Verzögerung die Koaleszenz drastisch gesenkt wird [20]. Endgültige Aussagen über die Sauerstoffeintragsleistung sind nach der Durchführung von Versuchen möglich. Dabei ist es bei der Verwendung von

Tafel 2

Vergleichswerte von Tiefenwasserbelüftern auf der Basis rechnerischer Werte (auf 85% Defizit bezogen

$$P_{\text{ad.}} = 15,1 \text{ kW}, P_K = 25 \text{ kW}, v_s = 0,2 \text{ m/s}$$

Porównawcza charakterystyka urządzeń do głębokiego napowietrzania wody. Wartości obliczone teoretycznie przy następujących założeniach: deficyt tlenu 85%,  $P_{\text{uż}} = 7 \text{ kW}$ , moc zainstalowana  $P_K = 25 \text{ kW}$ ,  $v_s = 0,2 \text{ m/s}$

Belüfter Typ	Einspei- sung ( $h_1$ ) m	$\dot{V}_{g0}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$d_1$ m	$d_2$ m	$v_{L1}$ m/s	$\dot{V}_L$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_L/\dot{V}_g$ —	$t_g$ s	$\text{O}_2$ ( $d_B =$ 4 mm)	$\dot{m}_{\text{O}_2}$ kg/h	C g/l
System Wahn- bach Talsper- renverband [2]	35	289	1,5	1,5	1,29	8194	29,3	11,4	0,18	16	1,9
System Wahn- bach Talsper- renverband [3]	35	289	1,5	1,5	1,73	10992	26,1	18,4	0,22	19	1,7
Zylindrisches Rohr	8	850	1,5	1,5	1,75	11132	13,1	4,1	0,06	15	1,3
Zylindrisches Rohr m. Er- weiterung	8	850	1,5	3,0	1,59	10170	11,9	12,5	0,16	40	3,95
Rohr m. Er- weiterung	8	850	1,0	2,5	2,00	5652	6,65	14,4	0,13	33	5,8
Rohr m. Er- weiterung	8	422*	1,0	2,5	1,55	4380	10,3	16,7	0,17	21	4,8

\*  $P_{\text{ad}} = 7 \text{ kW}$ ,  $P_K = 11,6 \text{ kW}$

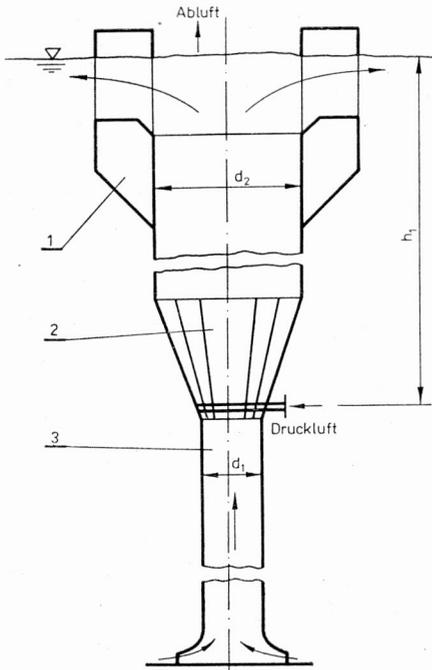


Bild 4. Belüftungsvorrichtung mit Multidiffusor im Schnitt für den freien Austritt des belüfteten Wassers im Bereich der Wasseroberfläche

1 — Schwimmkörper, 2 — Multidiffusor, 3 — Förderrohr

Rys. 4. Przekrój wielodyfuzorowego urządzenia napowietrzającego ze swobodnym wypływem napowietrzanej wody w pobliżu jej zwierciadła

1 — pływak, 2 — multidyfuzor, 3 — przewód tłoczny  
Abluft — powietrze odlotowe, Druckluft — powietrze sprężone

Filtern möglich, diese von oben einzuführen, wobei der Multidiffusor vertikale Schlitzte erhält, die jedoch seine Funktionsfähigkeit nicht wesentlich einengt.

Mit dieser Konzeption könnte der Sauerstoffeintrag bei gleicher aufgewendeter elektrischer Leistung gegenüber den gegenwärtig in der DDR produzierten Tiefenwasserbelüftern um über 50% gesteigert werden. Um die Baumaterialien des produzierten Typs „Sosa“ weitgehend zu verwenden, ist eine solche Anlage in der Kombination Steig- und Fallrohr  $d_1 = 1$  m und eine Erweiterung auf  $d_2 = 2,5$  m vorzusehen. Als Druckluftherzeuger wird ein Rootsgebläse mit  $\Delta p \approx 0.85$  at und  $\dot{V} = 450$  Nm<sup>3</sup>/h vorgeschlagen.

Ist eine Belüftung von flachen Gewässern erforderlich, so bietet sich durch konstruktive Änderungen an der vorgeschlagenen Belüftungsvorrichtung ein weiteres Einsatzgebiet an. Bei dieser Variante strömt das Gemisch bereits im Steigrohr im Bereich der Wasseroberfläche in das freie Wasser aus (Bild 4). Damit entfallen sämtliche Einrichtungen zur Rückführung des belüfteten Wassers ins Hypolimnion. Mit dieser konstruktiv einfachen Lösung, die eine transportable Belüftung ermöglicht, wird der Einsatzbereich erweitert. Er reicht von Brauchwasserreservoirs, Tagebaurestlöcher bis zur Belüftung größerer Fischteiche.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Zeit sind 3 wesentliche Arten von Tiefenwasserbelüfter bekannt. Die Vor- und Nachteile der Systeme Wahnbach/Limnox, U-Rohr-Belüfter nach SPEECE und die Belüftung nach der Hohlstrahldüse mit den Typen „Sosa“ und „Schönbrunn“ werden dargelegt. Wobei besonders die Leistungsparameter der in der DDR produzierten Anlagen gewertet, die Einsatzbereiche und die dabei erzielten Ergebnisse mit einer Interpretation des Betriebes sowie der Wartung eingehend erläutert werden. Bei einem erheblichen Bedarf an Belüftern allein in der DDR gilt es, unter weitgehender Verwendung der Baumaterialien der gegenwärtig produzierten Belüfter eine strömungstechnisch günstig gestaltete Einrichtung mit einem optimalen Sauerstoffeintrag im Gewässer einzusetzen. Nach einer dargelegten Konzeption könnte gegenüber herkömmlichen Anlagen der Materialaufwand um 20% gesenkt und der Sauerstoffeintrag um über 50% gesteigert werden. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Belüften von Oberflächengewässern läßt sich durch 2 vorgeschlagene Varianten, Belüftung von Tiefenwasser und Vorrichtung für freien Austritt des belüfteten Wassers an der Wasseroberfläche, der Einsatzbereich wesentlich erweitern. Er reicht von der Belüftung intensiv bewirtschafteter Fischseen bis zu Tagebaurestseen.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Arbeitskreis künstliche Belüftung von Oberflächengewässern: Die künstliche Belüftung von Oberflächengewässern*, Arbeitsblatt AW 161, Jan. 1971, ZfGW-Verl. GmbH Frankfurt/Main.
- [2] BERNHARDT H., HÖTTER G., *Archiv f. Hydrobiologie*, 63 (1967), S. 404 bis 428.
- [3] BERNHARDT H., *Progress in Water Technology*, 7 (1875), S. 483 bis 495.

- [4] BERNHARDT H., WILHELMS A., Verh. Internat. Verein. Limnol., 19 (1975), S. 1957 bis 1959.
- [5] BERNHARDT H., *Ten years experience of reservoir aeration*, presented at the Sept. 9-13, 1974, 7th. Internat. Conference on Water Pollution Research, held at Paris, France.
- [6] RIPL W., Chemie-Ing. Technik, 44(1972), S. 1168.
- [7] FAST A. W., DORR V. A., ROSEN R. J., Water Resources Research, 11 (1975), S. 287 bis 293.
- [8] BUCKSTEEG K., HOLLFELDER F., Gas-u. Wasserfach/Wasser. Abwasser, 119 (1978), S. 65 bis 72.
- [9] FAST A.W., MOSS B., WETZEL R.G., Water Resources Research, 9 (1973), S. 624 bis 647.
- [10] BENGSSON L. et. al., *Restaurering av sjör med kulturbetingat hypolimniskt*, Limnologiska Institution, Lund Universitet, Centrala Fysiklaboratoriet, Atlas Copo AB, 1972.
- [11] SPEECE R.E., Jour. AWWA, Jan. 1971, S. 6 bis 9.
- [12] FAST A.W., LORENZEN M.W., Journal of Environmental Engineering Division, 102 (1976) Dez. EE 6, S. 1161-1173.
- [13] WILINSKI E., *Technische und ökonomische Probleme der Erhaltung und Wiederherstellung des natürlichen Reaktionsvermögens stehender Gewässer durch Maßnahmen der künstlichen Belüftung*, Diss. TU Dresden, 1974.
- [14] KLAPPER H., WILINSKI E., GLASS K., Acta Hydrochim. Hydrobiol., 3 (1975), S. 505 bis 510.
- [15] WIETING J., WWT, 29 (1979), S. 14 bis 17.
- [16] PREISSLER G., Acta Hydrophysica, Bln., 23 (1978), S. 345 bis 355.
- [17] PREISSLER G., Wiss. Zeitschrift TU Dresden, 27 (1978), S. 1375 bis 1382.
- [18] LIEPE F., WIETING J., *Druckluft-Tiefenwasserbelüfter mit Multidiffusor*, WWT, 29 (1979).
- [19] LIEPE F., WIETING J., *Vorrichtung zum Belüften von Oberflächengewässern*, DDR Wirtschaftspatent (WP B 01 F/209 376 vom 29.11.1978).
- [20] MEUSEL M., LIEPE F., Chem. Technik, 30 (1978), s. 535.

## WGŁĘBNE NAPOWIETRZANIE WÓD W ZBIORNIKACH ZAPOROWYCH

Bardziej znane są aktualnie trzy rozwiązania urządzeń do wgłębnego napowietrzania wód w zbiornikach zaporowych. Równie znane są ich zalety i wady, które autor opisuje, podając jednocześnie opis i zasady działania strumienicowych urządzeń typu „Sosa” i „Schönbrunn”. Dokładniej referuje się działanie tych urządzeń stosowanych do napowietrzania wód w zbiornikach zaporowych NRD. Autor dowodzi, że możliwe jest dalsze usprawnienie ich pracy, prowadzące do zmniejszenia zużycia materiałów o około 20% przy równoczesnym podwyższeniu zdolności natleniania o ponad 50%. Wskutek pewnych modyfikacji konstrukcyjnych — dwie z nich autor przytacza — rozszerza się zakres stosowania tych urządzeń: od napowietrzania jezior z intensywną gospodarką rybną po jeziora powstałe po kopalniach odkrywkowych.

## DEEP AERATION OF WATER IN STORAGE RESERVOIRS

At present 3 essential kinds of hypolimnion aeration systems are known. The advantages and the disadvantages of the system Wahnbach/Limnox and U-Tube Hypolimnion Aeration after SPEECE and aeration with a hollow jet nozzle with aerator types “Sosa” and “Schönbrunn” are discussed. The capacity of oxygen input obtained, the working ranges, the benefits of hypolimnetic aeration and the results of expended activities and the experiences from a long operation of the “Sosa” and “Schönbrunn” units are briefly described and compared with the other systems.

In view of the urgent need of hypolimnetic aerators in the GDR, it is necessary to develop a new kind of apparatus, which has small streaming loss and, consequently, a bigger oxygen intake than aerators using

the hollow jet nozzle. With the proposed invention it is possible to diminish the material cost by about 20% and to increase the oxygen intake by about 50% in comparison with the other aerators produced in the GDR.

It is possible to produce the aerators of 2 types: hypolimnion aerator maintaining the thermal stratification and another aerator which eliminates the terminal stratification of the reservoir by the aerated water streaming out of the unit and into the reservoir near its surface. With these two possibilities the field of the proposed aeration systems has been widened. Benefits range from domestic water supply by dams to the aeration of reservoirs formed in brown coal mining open pits, to fish-breeding and stocking reservoirs.

### ПОДПОЧВЕННАЯ АЭРАЦИЯ ВОДЫ В ЗАПОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

В настоящее время более известными являются три решения устройств для подпочвенной аэрации воды в запорных водохранилищах. Известны также их преимущества и недостатки, которые автор описывает, приводя одновременно описание и принципы действия струйных устройств типа „Sosa” и „Schönbrunn”. Более подробно описывается действие этих устройств, применяемых для аэрации воды в запорных водохранилищах ГДР. Автор доказывает, что возможным является дальнейшее улучшение их работы, которое ведёт к уменьшению расхода материалов примерно на 20% при одновременном повышении степени насыщенности воды кислородом свыше 50%. Вследствие некоторых конструкционных модификаций — две из них приводит автор — расширяется диапазон применения этих устройств: начиная с аэрации озёр с интенсивным рыбным хозяйством вплоть до озёр, образовавшихся после карьеров.