

**Nr. 39    Mitteilungen  
der Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie**

an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich  
Herausgegeben von Prof. Dr. D. Vischer

---

**Flussbelüftung**

**Methoden der Sauerstoffanreicherung,  
Einsatz von Wasserturbinen**

Peter Volkart

Zürich, 1979

## Vorwort

In manchen Flüssen verursacht die Abwasserbelastung ein Sauerstoffdefizit, das aus ökologischer Sicht als unzulässig bezeichnet und deshalb behoben oder wenigstens gemindert werden muss. Dabei ist selbstverständlich in erster Linie an eine Reduktion der Abwasserbelastung durch den Bau wirksamer Kläranlagen zu denken und erst in zweiter Linie an einen künstlichen Sauerstoffeintrag; denn dieser packt ja das Uebel nicht an der Wurzel, sondern ist nur Symptombekämpfung. Dennoch wird er heute vielerorts in Erwägung gezogen. Es sind bereits einige bemerkenswerte Anwendungsformen bekannt. Zu diesen zählen neben dem direkten Sauerstoffeintrag alle Massnahmen, die unter den Begriff der künstlichen Flussbelüftung fallen: die Kaskadenbelüftung, die Oberflächenbelüftung, die Druckluftbelüftung usw. Sie finden ihre Entsprechung teilweise in der Ausrüstung der Belüftungsbecken von Kläranlagen und können von diesen her verstanden werden. Der Einsatz von Turbinen bestehender Wasserkraftanlagen stellt eher eine Sonderlösung dar, die der näheren Erläuterung bedarf.

Aufgrund einer Anregung und im Auftrag der Maschinenfabrik Escher-Wyss AG, Zürich, hat Dr. Peter Volkart die vorliegende Mitteilung verfasst. Sie hält das Ergebnis eines Literaturstudiums und einer Umfrage bei europäischen Kraftwerksgesellschaften fest und zeigt die Möglichkeiten des Einsatzes von Wasserturbinen zur Flussbelüftung auf. Sie vermittelt eine Uebersicht über die heute durchgeführten Grossversuche und setzt diese in Bezug zu den Versuchen mit anderen Belüftungsmassnahmen. Als Vergleichswert dient dabei unter anderem der spezifische Energieaufwand, das heisst die Anzahl Kilowattstunden, die für den Eintrag eines Kilogramms Sauerstoff in einen Fluss aufgebracht werden muss.

Abschliessend danken wir den im Text erwähnten Amtsstellen und Kraftwerksgesellschaften, die uns ihre wertvollen Messdaten zur Verfügung gestellt haben, sowie Prof. Dr. h.c. Arnold Hörler und Dr. Erwin Märki für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Prof. Dr. D. Vischer

## ZUSAMMENFASSUNG

Es werden die verschiedenen Verfahren zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes von Flüssen untersucht. Besonderes Schwergewicht liegt auf den Wasserturbinen als Belüftungselemente. Aus der Literatur können einzelne Zahlenwerte entnommen werden, welche die zur Belüftung aufzuwendende Leistung (kWh) in Beziehung zur aufgenommenen Sauerstoffmenge ( $\text{kg O}_2$ ) setzen. Darüber hinaus sind weitere Beurteilungskriterien und Vorschläge zur Weiterentwicklung erarbeitet worden.

Von den verschiedenen physikalischen und chemischen Parametern der Sauerstoffaufnahme erweisen sich das Sättigungsdefizit und die lokale Strömungsturbulenz (Grenzflächenerneuerung der Luftblasen) als dominierend. Es werden folgende Verfahren näher beleuchtet: Turbinen-, Druckluft-, Wehr-, Kaskaden-, Oberflächen- und Reinsauerstoffbelüfter.

In der Bilanz stellt sich die Turbinenbelüftung mit den zur Zeit verfügbaren Daten als wirksam und relativ wirtschaftlich heraus. Beschränkungen erwachsen ihr dadurch, dass sie örtlich gebunden und vom Wasserzufluss abhängig ist.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
VERWENDETE SYMBOLE	5
1. EINFUEHRUNG	7
2. SAUERSTOFFHAUSHALT	8
2.1 Notwendiger Mindestgehalt an Sauerstoff in Flüssen	10
2.2 Parameter der Sauerstoffaufnahme	11
2.2.1 Physikalische Parameter Sauerstoffdefizit D, Sauerstoffsättigung S	11
2.2.2 Hydrodynamische Parameter	15
2.2.3 Biologie	17
2.2.4 Weitere Einflüsse auf die Wasseroberfläche	18
3. WANN IST KUENSTLICHE BELUEFTUNG ANGEZEIGT ?	18
4. METHODEN DER FLUSSWASSERBELUEFTUNG	20
4.1 Turbinenbelüftung	20
4.1.1 Prinzip	20
4.1.2 Belüftungswirkung der Turbinen ohne Luftbeigabe	21
4.1.3 Ueberdruckbereich	29
4.1.4 Unterdruckbereich	31
4.1.5 Tabelle Turbinenbelüftung	36
4.2 Druckluftbelüftung	38
4.2.1 Prinzip	38
4.2.2 Typen	38
4.2.3 Tabelle Druckluftbelüftung	40
4.3 Wehre, Sohlenstufen	42
4.3.1 Tabelle Wehre, Ueberfälle	50
4.4 Oberflächenbelüfter	49
4.5 Verwendung reinen Sauerstoffs	52
4.6 Weitere Verfahren	53

4.6.1	Tabelle ausgewählter weiterer Belüftungsverfahren	55
5.	SCHLUSSBETRACHTUNGEN	57
5.1	Uebersichtstabelle	57
5.2	Vergleich der Systeme zur Flussbelüftung	60
5.2.1	Vergleich bezüglich der Eintragsleistung: kWh/kg O <sub>2</sub>	60
5.2.2	Vergleich bezüglich der Wasserführung	61
5.2.3	Vergleich bezüglich des Einsatzortes	62
5.2.4	Stellung der Turbinenbelüftung bezüglich der anderen bekannten Verfahren	63
6.	AUSBLICK AUF WEITERE ENTWICKLUNGSMOEGlichkeiten	64
6.1	Testen weiterer Eingabestellen	64
6.2	Systematische Untersuchungen über Laufruhe, Eigenfrequenzen, Wirkungsgradänderungen, Kavitation und Rost	65
6.3	Feineres Anpassen bekannter und neuer Luftzu- fuhrsysteme an die verschiedenen Turbinentypen	65
6.4	Quantitative Angaben, welche Randbedingungen ein bestimmtes Turbinenbelüftungsverfahren technisch ausschliessen oder unwirtschaftlich erscheinen lassen	66
6.5	Suchen von Kombinationsmöglichkeiten mit Zweitsystemen	66
	ALPHABETISCHES LITERATURVERZEICHNIS	67

VERWENDETE SYMBOLE

B	m	Breite des Ueberfalles
BSB <sub>5</sub>	mg/l	5-tägiger biochemischer Sauerstoffbedarf
C	mg/l;ppm	Konzentration
C <sub>0</sub>	mg O <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O	Sauerstoffkonzentration im Oberwasser
C <sub>S</sub>	mg O <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O	Sättigungskonzentration (Fig. 1, Seite 13)
C <sub>t</sub>	mg O <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O	Eintrittskonzentration zur Zeit t
C <sub>U</sub>	mg O <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O	Sauerstoffkonzentration im Unterwasser
D	mg O <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O	Sättigungsdefizit = C <sub>S</sub> - C <sub>t</sub>
D,Ø	m	Innendurchmesser
D <sub>B</sub>	m	mittlerer Luftblasendurchmesser
H	m	totale Fallhöhe (Turbine, Ueberfall, Kaskade)
H <sub>A</sub>	m	Fallhöhe bis zum "Aufreisspunkt" bei Ueberfällen
K	%/s	Absorbtionskoeffizient der Einzelblase im Wasser
K <sub>L</sub>	s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Beiwert für Turbulenz und Temperatur
K <sub>2</sub>	s <sup>-1</sup>	Wiederbelüftungskonstante
L	m	allgemeine Länge. Spezielle Kaskadenlänge in Fließrichtung
N	-	Stufenzahl bei Kaskaden
Ow	-	Oberwasser
P	kW	Leistung

$Q_L$	$m^3/s$	Luftmenge
$Q_W$	$m^3/s$	Wassermenge, Abfluss
$S$	-	Sättigungsgrad = $C_t/C_S$
$T$	$^{\circ}C$	Temperatur
$U_w$	-	Unterwasser
$W$	-	Wirkungsgrad
$a$	-	Beiwert für den Grad der Wasserverunreinigung
$b$	-	Beiwert für den Wehrtyp
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$h$	$m$	Dicke des überfallenden Strahles am Wehr
$h_W$	$m$	Wassertiefe
$k_h$	$1/m$	Fallhöhenkonstante für verschmutztes Wasser
$k_{h15}$	$1/m$	Fallhöhenkonstante für Reinwasser bei $15^{\circ} C$
$pH$		pH-Wert (chem. Hydroniumionen-Konzentration)
$q$	$m^3/s \quad m$	spezifischer Abfluss
$r$	-	$C_S/(C_S - C_U)$
$t$	$s$	Zeit
$\alpha$	-	Beiwert für den Detergentiengehalt
$\rho_w$	$kg/m^3$	Dichte des Wassers
$\tau$	$^{\circ}C^{-1}$	Turbulenzbeiwert

## 1. EINFUEHRUNG

Die vorliegende Arbeit ist das Resultat eines vertieften Literaturstudiums zum Thema der Flussbelüftung. Als zentrales Problem wurde die Frage nach den technischen Möglichkeiten des künstlichen Sauerstoffeintrages in Fliessgewässer gestellt. Untersucht werden vor allem mögliche Installationen für den Einsatz in Flüssen, welche der Erzeugung elektrischer Energie, der Schifffahrt oder als Vorfluter für Abwasser oder Kühlwasser dienen. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Wasserturbinen (Kaplan-, Rohr- und Francisturbine) als mögliche Belüftungselemente. Anlagen, wie sie einerseits in der Abwasserreinigung und andererseits in tiefen, stehenden Gewässern wie natürlichen Seen oder Staubecken zur Anwendung gelangen, werden zu Vergleichszwecken am Rande erwähnt. Ein wesentliches Ziel bildet die Zusammenstellung der Grundlagen, welche die Gegenüberstellung verschiedener Methoden bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit ermöglicht. Dazu eignet sich am besten ein Vergleich zwischen Energiebedarf (kWh) und erzieltm Sauerstoffeintrag ( $\text{kg O}_2$ ). Die Investitions- und Betriebskosten werden der örtlich und zeitlich ändernden Preise wegen nur an einzelnen Beispielen in die Betrachtungen miteinbezogen.

Die im Jahre 1978 bereits vorliegende Literatur findet ihre Schwerepunkte vorwiegend in den Gebieten Gewässerbiologie, Verfahrenstechnik und Beschreibung einzelner gebauter Anlagen mit meist sehr speziellen Randbedingungen. Publikationen, welche sich mit Turbinen als mögliche Belüftungselemente befassen, beziehen sich meist nur auf wenige Grundartikel. Aus diesem Grunde wurden im Verlaufe der Ermittlungen zu diesem Bericht zusätzlich gegen hundert Amtsstellen und Kraftwerkgesellschaften um Messdaten und praktische Erfahrungen angefragt.

Im Bericht wird vorerst kurz auf die unterschiedlichen, teils simultan verlaufenden Vorgänge im Fliessgewässer eingegangen, welche die Sauerstoffbilanz des Wassers beeinflussen. Eingehender wird dann der funktionelle Zusammenhang einzelner Parameter wie Temperatur, Turbu-



lenz etc. mit der Sauerstoffaufnahme beleuchtet, bevor anschliessend auf die einzelnen Belüftungsbauwerke und -maschinen eingegangen wird. Diese werden ja im Prinzip dazu verwendet, die sich teilweise entgegenlaufenden Einflüsse optimal zur Belüftung auszunützen. Schliesslich liefert eine umfangreiche tabellarische Zusammenstellung von ausgeführten und berechenbaren Systemen eine weitere Grundlage für die Beurteilung konkreter Projekte.

## 2. SAUERSTOFFHAUSHALT

Der aktuelle Sauerstoffgehalt an einer bestimmten Stelle eines Fließgewässers wird bestimmt durch das Wechselspiel vielfältiger physikalischer und biochemischer Vorgänge. Der Sauerstoff kann einerseits an der etwa ebenen Wasseroberfläche aus der Atmosphäre aufgenommen werden. Seine Eindringungsrate ist näherungsweise nach Streeter (1926) berechenbar. Bekannt ist auch, dass andererseits durch Verwirbelung des strömenden Wassers an Wehren, Ueberfällen, Schleusentoren etc. Sauerstoff aus mitgerissenen Luftblasen ins Strömungsinere diffundieren kann. Im weiteren vermögen Algen und Unterwasserpflanzen je nach Chlorophyllgehalt des Wassers und je nach den Belichtungsverhältnissen mittels der Photosynthese Sauerstoff zu produzieren. Der Einfluss der Algen ist in diesem Zusammenhang vor allem in den sogenannten alpha- und betamesosaproben\* Fließgewässern zu beachten.

Verbraucht wird der vorhandene Sauerstoff einmal durch die biochemische Sauerstoffzehrung, dann wieder auch durch Algen und Unterwasserpflanzen sowie infolge der Sedimentation der im Wasser gebildeten oder gelösten Schmutzstoffe und nicht zuletzt durch die Zersetzung von Bodenschlamm und durch Oxidation der aus dem Schlamm aufgewirbelten Zersetzungsprodukte. Bei der Sauerstoffzehrung (biologische Selbst-

\*alphamesosaprob = stark verunreinigt (Wassergüteklasse III):  $O_2$ -Zehrung meist über 50 %, Fischsterben möglich etc.

betamesosaprob = mässig verunreinigt (Wassergüteklasse II):  $O_2$ -Zehrung meist unter 50 %, Lebenszone vieler Fische etc.

reinigung) werden in der ersten Abbaustufe zuerst die Kohlenstoffverbindungen und in einer späteren zweiten Stufe auch die Stickstoffverbindungen oxydiert. Diese Nitrifikation geschieht durch autotrophe Bakterien, welche ihren Energiebedarf durch Oxydation von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )- und Nitrit ( $\text{NO}_2^+$ )-Ionen decken. Die zweite Abbaustufe setzt erst nach mehrtägiger Verweilzeit der Schmutzstoffe im Fluss ein und ist nur für Wassertemperaturen über  $10^\circ\text{C}$  von Bedeutung.

Zur Sedimentation von Schmutzstoffen ist zu bemerken, dass sich die entsprechenden Feststoffpartikeln bei Fließgeschwindigkeiten unter etwa 20 cm/s, also beispielsweise in gestauten Flussabschnitten, als Schlamm absetzen. Sie werden bei Geschwindigkeiten über etwa 30 - 45 cm/s, beispielsweise nach Oeffnen eines Wehres, wieder aufgewirbelt und zehren Sauerstoff aus darüberliegenden Wasserschichten. Vor allem in langsam fließenden und eher seichten Gewässern ist auch der Respiration der im Bodenschlamm lebenden Bakterien sowie der Diffusion organischer und anorganischer (z.B.  $\text{H}_2\text{S}$ ) Bestandteile vom Schlamm ins Wasser Beachtung zu schenken.

Schon die vorangehende geraffte Beschreibung der Sauerstoffaustauschvorgänge lässt erahnen, dass die exakte rechnerische Bestimmung der einzelnen  $\text{O}_2$ -Raten nur unter vereinfachenden Annahmen möglich ist. In der Praxis wird der Sauerstoffhaushalt eines Fließgewässers ja weitgehend beeinflusst durch nicht immer genau erfassbare oder vorauszusehende Vorgänge, wie die Einleitung von geklärtem oder ungeklärtem Abwasser oder Kühlwasser thermischer Kraftwerke, durch die Auswirkungen der Schifffahrt und ihrer Bauwerke und durch regulierten Einstau und Turbinierung an Flusskraftwerken. In diesen, der Theorie nur ungenügend zugänglichen Einzelfällen, ist es vor der Wahl eines künstlichen Belüftungssystems wohl unumgänglich, über längere Zeit den  $\text{O}_2$ -, aber auch den  $\text{BSB}_5$ -Gehalt\* des Gewässers zu

\* $\text{BSB}_5$  = 5-tägiger biochemischer Sauerstoffbedarf. Er entspricht bei  $20^\circ\text{C}$  der 0.684-fachen Sauerstoffmenge in mg/l, die nötig ist, um die organischen Stoffe des Wassers mit Hilfe von Bakterien abzubauen, d.h. zu oxydieren. In gesunden Flüssen wird der  $\text{BSB}_5$  nicht über 4 mg/l ansteigen.

messen. Vorweggenommen sei, dass die mangelhafte Abwasserbelüftung in einer Abwasserreinigungsanlage kaum wirtschaftlich durch eine nachfolgende Flusswasserbelüftung nachgeholt werden kann.

## 2.1 Notwendiger Mindestgehalt an Sauerstoff in Flüssen

Allgemein unterscheidet man bei belasteten Gewässern zwischen dem aeroben und dem anaeroben Zustand. Im ersten Fall ist noch gelöster Sauerstoff im Wasser vorhanden, im zweiten, anaeroben Zustand, sind die einst aktiven Lebewesen abgestorben. Anaerobe Bakterien müssen den weiteren biologischen Abbau übernehmen. Sie benötigen zwar gleichfalls Sauerstoff, entziehen diesen aber den im Wasser enthaltenen Verbindungen wie Sulfaten oder Nitraten; letztlich tritt Fäulnis ein. Als ungefähren Grenzwert zwischen den beiden Bereichen wird ein Sauerstoffgehalt von 1.5 mg  $O_2$ /l angenommen. Dabei ist auch von besonderer Bedeutung, dass das Selbstreinigungsvermögen eines Flusses im aeroben Zustand wesentlich höher ist als im anaeroben Fall. Nach Albrecht und Imhoff (1973) wird beispielsweise eine bestimmte Menge organischer Verschmutzung bei 20<sup>0</sup> C im aeroben Zustand in 3 Tagen, im anaeroben Milieu dagegen erst in 7 Tagen zur Hälfte abgebaut.

Hat man zusätzlich Anforderungen der Trinkwassernutzung oder der Fischerei zu erfüllen, so genügt ein  $O_2$ -Minimalwert von 1.5 mg/l nicht mehr. Für Trinkwasser spendende Gewässer muss nach Bernhardt e.a. (1967, 1969) ein Wert von 2.0 mg  $O_2$ /l am Grund überschritten werden.

Noch höher wird der Mindestwert für das gesicherte Ueberleben der Fische angesetzt. Man kann der Literatur Minimalwerte von 3.5 bis 4.0 mg  $O_2$ /l für Weissfische und Aale und von 6.0 bis 7.0 mg  $O_2$ /l für Salmoniden wie Forelle, Lachs, Aesche etc. entnehmen. Der letzte Wert liegt nicht unweit des Sättigungswertes  $C_S$  des Wassers an Sauer-

stoff. Fische sind sehr empfindlich auf rasches Absinken des Sauerstoffgehaltes; sie sind besser in der Lage sehr niedrige Werte zu überleben, wenn eine genügend lange Anpassungszeit zur Verfügung steht. Entsprechend können tote Fische ein Indikator für das jähe Absinken des Sauerstoffgehaltes, beispielsweise wegen Abwasseranfall, Kühlwasserschwall oder Ausfall eines Belüftungselementes sein.

Weitere Folgen der Unterbelüftung können sein:

- unzulässige Geschmacksveränderung des Trinkwassers durch anaerobe Faulprozesse.
- Störender Wassergeruch durch Schwefelwasserstoff.

## 2.2 Parameter der Sauerstoffaufnahme

Der Sauerstoffhaushalt im Fliessgewässer wird durch eine Vielzahl meist gegenseitig abhängiger Einflussgrössen geregelt. In der Folge werden die Parameter im einzelnen näher untersucht, da sie letztlich als Kriterien in der Beurteilung verschiedener Belüftungsmethoden und -systeme dienen.

### 2.2.1 Physikalische Parameter

#### Sauerstoffdefizit $D$ , Sauerstoffsättigung $S$

Triebkraft des Stoffaustausches bildet das Konzentrationsgefälle zwischen der Sättigungskonzentration von Sauerstoff in Wasser  $C_S$  ( $\text{mg O}_2/\text{l H}_2\text{O} = \text{ppm}$ ) und der Eintrittskonzentration  $C_t$  zur Zeit  $t$ .

Der physikalische Sauerstoffeintrag, als kinetische Reaktion erster

Ordnung angenommen, gehorcht der Gleichung

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_S - C_t)$$

resp. 
$$\frac{dD}{dt} = -K_2 \cdot D$$

C	mg/l	Sauerstoffkonzentration im Wasser
C <sub>S</sub>	mg/l	Sättigungskonzentration des Sauerstoffes im Wasser (Figur 1)
C <sub>t</sub>	mg/l	Sauerstoffkonzentration zur Zeit t
t	s	Zeit
D	mg/l	Sauerstoffdefizit (C <sub>S</sub> - C <sub>t</sub> )
K <sub>2</sub>	s <sup>-1</sup>	Wiederbelüftungskonstante. Sie kann im Fluss = K <sub>L</sub> · h <sub>W</sub> gesetzt werden. K <sub>L</sub> ist eine zwischen den Werten 0.1 und 0.8 liegende, temperatur- und turbulenzabhängige Grösse (Reissig e.a. (1976)), h <sub>W</sub> die Wassertiefe.

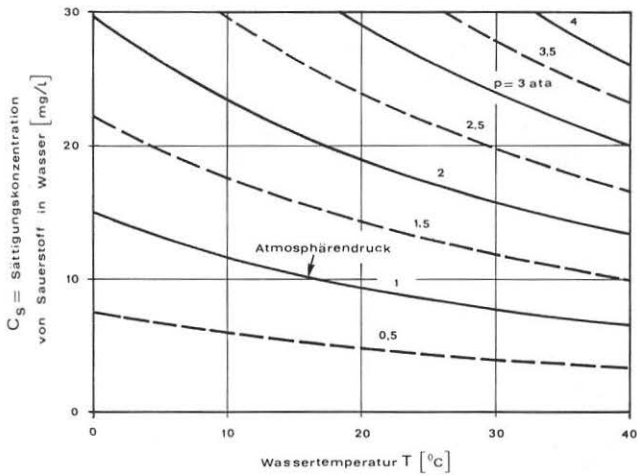
Die einfache Integration führt auf die Beziehung

$$D(t) = D(t=0) \cdot e^{-K_2 \cdot t}$$

Die angeschriebenen Gleichungen besagen im Wesentlichen, dass die Sauerstoffaufnahme überproportional mit steigendem Sauerstoffdefizit D zunimmt. Entsprechend sinkt der Belüftungswirkungsgrad stark, wenn man sich der Sättigungskonzentration C<sub>S</sub> nähert. Häufig ist in diesem Zusammenhang auch der folgende Ausdruck anzutreffen:

S — Sättigungsgrad =  $C_t / C_S = (1 - D/C_S)$

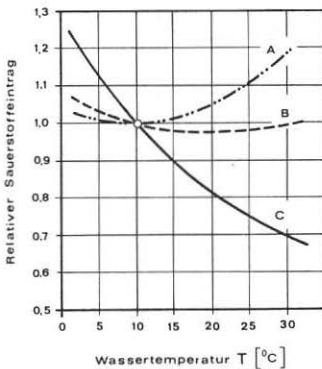
In Figur 1 ist der Bereich der Sättigungskonzentration  $C_S$  von Flusswasser in Funktion der Temperatur  $T$  und des Druckes  $p$  dargestellt. Es ergibt sich, dass das Wasser bei niedrigen Temperaturen und höheren Drücken mehr Sauerstoff aufzunehmen vermag. Bei  $10^{\circ}\text{C}$  und Atmosphärendruck beträgt der Wert für  $C_S$  11.0 bis 12.0 mg  $\text{O}_2/\text{l H}_2\text{O}$ . Dieser Wert verringert sich beispielsweise bei einem Salzgehalt des Wassers von 20 % auf 8.5 bis 9.5 mg/l (lineare Abhängigkeit).



Figur 1 : Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser

## Temperatur T

Die Temperatur beeinflusst zwei gegenläufige Teilvorgänge der Sauerstoffaufnahme. Einmal nimmt, wie in Figur 1 gezeigt, die Sättigungskonzentration  $C_S$  mit steigender Temperatur T ab, was ja einer Reduktion des Aufnahmewirkungsgrades entspricht, andererseits steigt an den vorhandenen Kontaktflächen zwischen Wasser und Belüftungsgas die Diffusionsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur. Wenn nun die Belüftungspartikel in Form von Gasblasen derart künstlich beschleunigt werden, dass sich ihre Kontaktflächen zum Wasser häufig erneuern (Turbulenz), dann überwiegt der Einfluss von  $C_S$ . Verbringen diese Blasen dagegen längere Zeit ungestört im Wasser, so kommt der reine Diffusionsvorgang vermehrt zum Tragen. Entsprechend ergibt sich das Diagramm nach Imhoff und Albrecht (1972) in Figur 2, welches den prinzipiellen Zusammenhang zwischen relativer Sauerstoffsättigung und Temperatur für drei Klassen von Belüftungsmethoden darstellt.



- A = natürliches Gewässer  
(Diffusion)
- B = Druckluftbelüfter  
(Turbulenz + Diffusion)
- C = mechanische Belüfter :  
Turbinen, Kreisel, Walzen  
(Turbulenz)

Figur 2 : Relative Sauerstoffaufnahme für verschiedene Belüftungssysteme

Als Grundlage wird der Sauerstoffeintrag bei  $10^{\circ}\text{C} = 1.0$  gesetzt. Es ist daraus ersichtlich, dass im praktisch ungestörten natürlichen Gewässer mit Sauerstoffaufnahme durch den Wasserspiegel (Kurve A) mit steigender Temperatur mehr Sauerstoff aufgenommen werden kann. Bei aufsteigenden Blasenschleiern (Kurve B) ist die Temperatur kaum von Bedeutung. Für Rührwerke, insbesondere also auch bei Turbinenbelüftung, nimmt der Sauerstoffeintrag mit erhöhter Wassertemperatur dagegen eindeutig ab (Kurve C).

#### Druck p

Hoher Druck erhöht die Reaktionsfähigkeit und führt, wie in Figur 1 bereits erläutert, zu höheren Sättigungskonzentrationen  $C_S$ .

### 2.2.2 Hydrodynamische Parameter

#### Turbulenz

Der Lösungsvorgang des Sauerstoffgases in Wasser unterteilt sich prinzipiell in drei Teilvorgänge:

1. Die  $\text{O}_2$ -Gasmoleküle diffundieren durch den stationären Gasfilm, der sich in der Grenzzone zwischen Flüssigkeit und Gas bildet.
2. Der Uebergang der Gasmoleküle in die flüssige Phase wird vollzogen.
3. Diese Moleküle werden ins Innere der Flüssigkeit transportiert.

Sowohl theoretische Näherungsansätze - beispielsweise Wilderer e.a. (1969) - als auch exakte Messresultate bei Pasveer (1955) zeigen, dass sich die erste Phase des Sauerstofflösungsvorganges, also die schnelle Absättigung der Grenzfläche, sehr rasch, die anschließende



Diffusionsstufe dagegen zunehmend verlangsamt abspielt. Pasveer hat gezeigt, dass an der Kontaktfläche selbst die Sättigung bei nur 1/1000 Sekunde Kontaktzeit möglich ist, während in einer Tiefe von  $4 \cdot 10^{-3}$  mm nur noch ein Sättigungsmass von 5 % erzielt wird. Nach 1/100 Sekunde beträgt die Sättigung in  $4 \cdot 10^{-3}$  mm nur 50 % und bei  $10 \cdot 10^{-3}$  mm noch immer erst 5 %. Daraus folgt, dass es wirksamer ist, die Kontaktflächen immer wieder zu erneuern, als sie über längere Zeit ungestört zu belassen. Erhöhte Turbulenz vergrößert somit den Sauerstoffeintrag von Blasen ins Wasser deshalb, weil sie die Teilvorgänge, welche  $O_2$ -gesättigte Grenzflächenschichten ins Wasser transportieren oder dank welchen neue Wassermoleküle an die Phasengrenzfläche gelangen, stark beschleunigt. Massgebend sind letztlich die turbulenten Schwankungen an den Phasengrenzflächen. In diesem Sinne tragen steileres Sohlengefälle, höhere, geometriebedingte örtliche Geschwindigkeit und grössere Abflussmenge zu einem verbesserten  $O_2$ -Eintrag bei.

#### Blasen: Grösse, Verweilzeit

Nach Kobus (1969) lässt sich der Wirkungsgrad des Sauerstoffüberganges aus einer einzelnen Blase ins Wasser anschreiben als

$$W = K \cdot t \cdot \left( \frac{C_S - C_t}{C_S} \right)$$

W		Wirkungsgrad
K	% /s	Absorptionskoeffizient der Einzelblase (in Schwärmen abgemindert)
t	s	Zeit
$C_S$	mg/l	Sättigungskonzentration
$C_t$	mg/l	momentane Sauerstoffkonzentration im Wasser

Der Absorptionskoeffizient  $K$  nimmt mit zunehmendem Blasendurchmesser  $D_B$  ab und beträgt im Flusswasser beispielsweise für  $D_B = 1 \text{ mm}$  6.0 und für  $D_B = 5 \text{ mm}$  2.0. Andererseits nimmt die Steiggeschwindigkeit einer Blase im ruhenden Wasser unter dem Einfluss des Auftriebes bei grösseren Durchmessern zu, was die Aufenthalts- und somit die Reaktionszeit im Wasser verkürzt. Es ergibt sich zum Schluss, dass ein bestimmtes Belüftungsvolumen besser auf viele kleine als auf wenige grosse Blasen verteilt wird, da sich dann bei den erwähnten Einflüssen ein höherer Wirkungsgrad ergibt. Im übrigen ist die Sauerstoffaufnahme direkt proportional zur Oberfläche der Blasen.

### 2.2.3 Biologie

Durch die rein physikalische Belüftung aus der Luft kann Sauerstoff nur bis zum Sättigungswert  $C_S$  aufgenommen werden. Dieser Wert kann durch Assimilation der Algen und Unterwasserpflanzen noch zusätzlich überschritten werden. Im ruhenden Zustand (Stau) kann auch starke Uebersättigung durch die Flora entstehen (Makro- und Mikrophyten). Wesentliche Voraussetzungen dafür sind hoher Gehalt an Chlorophyll und intensiver Lichteinfall, also Einflüsse, welche durch menschlichen Eingriff primär nicht beeinflusst werden können. Diese biogene Belüftung ist vor allem in den wasserwirtschaftlich eher kritischen Monaten April bis Oktober, nicht aber im Winter, von Bedeutung.

Folgende Parameter erhöhen zudem die biogene Sauerstoffanreicherung:

- niedrige Temperatur (Aktivität aber geringer)
- hohe Fliessgeschwindigkeit
- geringe Flusstiefe
- grosse Flussbreite
- häufige Niederwasserführung

## 2.2.4 Weitere Einflüsse auf die Wasseroberfläche

### Wind

Nach Downing e.e. (1955) trägt der Wind über der Wasserfläche erst ab einer Geschwindigkeit von 3 m/s (Windstärke 2) zum erhöhten Sauerstoffeintrag bei (Oberflächenvergrößerung, Ueberschlagen). Steigende Wellenhöhe und -frequenz vergrössert die Aufnahme desselben.

### Oelfilm

Oelfilme der Dicke  $10^{-6}$  bis  $10^{-3}$  cm sind praktisch ohne Einfluss. Die Eintragsrate verringert sich erst ab Filmstärke von 0.1 mm an; eine Oelschicht von 1.0 mm - immerhin 1 Liter Oel pro  $m^2$  - reduziert die  $O_2$ -Aufnahme auf rund einen Drittel.

### Luftfeuchtigkeit

Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit ist nur bei der natürlichen Belüftung ohne künstlich erhöhte Turbulenz von Bedeutung. Geringere Feuchtigkeit der Luftschicht bewirkt eine höhere Verdunstung und somit steigende Salzkonzentration an der Oberfläche. Da die schwereren salzhaltigen Schichten absinken, hat hohe Luftfeuchtigkeit eine Verlagerung dieser natürlichen Umwälzung und ein verzögertes Erneuern der Grenzflächen und somit letztlich eine geringere Sauerstoffaufnahme zur Folge.

## 3. WANN IST KUNSTLICHE BELUEFTUNG ANGEZEIGT ?

Aus der Schau der massgebenden Einflussgrössen geht hervor, dass einige ungünstige Parameterkombinationen in der Natur durchaus

auftreten können. Ziel der künstlichen Belüftung wird es dann sein, die für den Sauerstoffhaushalt kritischen Verhältnisse rasch und wirksam zu bekämpfen. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Zufluss- und Betriebsbedingungen des Gewässers voraus. Noch besser sind wohl permanente Stationen, deren Messwerte die notwendige Zeitreserve vor Inbetriebnahme der Belüftungsanlagen verschaffen.

Ein durch Belüftung zu behebender Sauerstoffmangel ist vor allem in folgenden Fällen zu erwarten:

- Bei rascher Abkühlung und starker, Licht absorbierender Bewölkung kann die Assimilation innert 24 Stunden zusammenbrechen. Der Mindestgehalt an Sauerstoff für das gesicherte Ueberleben der Fische oder zur Erhaltung des aeroben Zustandes kann dann schlagartig unterschritten werden.
- Im Winter lässt die biogene Sauerstoffproduktion erheblich nach. Dieser Zustand verschlimmert sich noch beträchtlich, wenn Vereisung die Aufnahme aus der Atmosphäre verhindert. Hiervon sind nicht zuletzt eingestaute Flussabschnitte betroffen.
- Die stossweise Belastung mit Schmutzstoffen gefährdet vor allem Lebewesen und Wasserpflanzen, welche sich meist nicht rasch genug anpassen können.
- Die Beigabe grösserer Mengen von entlüftetem, warmem Kühlwasser stört das Sauerstoffgleichgewicht erheblich. Je nach Wasserführung ist es angezeigt, den Kühlwasserstrom bereits vor dem Einleiten in den Fluss zu belüften.
- Bei extremer Niedrigwasserführung sinkt der Gehalt an vorhandenem Sauerstoff ab, weil natürliche Turbulenzen wegfallen, die Oberfläche stark verkleinert ist und Bodenschlamm aufgewirbelt wird, ohne dass gleichzeitig auch der Zustrom von Schmutzstoffen entsprechend zurückgehen würde.
- Starke Erwärmung durch Sonneneinstrahlung und rascher biochemischer Abbau von Schmutzstoffen.
- Abfluss von Seen mit  $O_2$ -armem Tiefenwasser, das während den Zirkulationszeiten an die Oberfläche verfrachtet wird

In den folgenden Kapiteln wird nunmehr auf die verschiedenen Belüftungsmethoden eingegangen. Als Belüftungsmedien können an sich beigegeben werden:

- Luft an Kontaktflächen oder in Blasenform,
- Gasförmiger oder flüssiger Sauerstoff,
- Ozon,
- kaltes oder angereichertes Wasser.

Daraus ergeben sich nachstehende Belüftungsmethoden:

1. Turbinenbelüftung,
2. Druckluftbelüftung,
3. Wehr- und Kaskadenbelüftung,
4. Oberflächenbelüftung,
5. Beigabe reinen Sauerstoffes,
6. Weitere Verfahren wie: Venturidüsen, Schachtbelüfter, Versprühanlagen, Tiefwasserbelüfter etc.

#### 4. METHODEN DER FLUSSWASSERBELUEFTUNG

##### 4.1 Turbinenbelüftung

###### 4.1.1 Prinzip

Der Turbine eines Flusskraftwerkes kann die zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes erforderliche Luft entweder vor dem Laufrad im Ueberdruckbereich oder unmittelbar nach dem Laufrad im Unterdruckbereich durch Einblasen beigegeben werden. Die von der Turbine angeregte

Strömungsturbulenz trägt zur Durchmischung und Erneuerung der Blasen bei, welche beim Wiederaufsteigen im Unterwasser zusätzlich durch Diffusion Sauerstoff ans Wasser abgeben. Mit zunehmender eingeblasener Luftmenge nimmt wohl der Sauerstoffeintrag zu, der Wirkungsgrad des Sauerstoffüberganges sowie der Turbine weisen dagegen sinkende Tendenz auf. Der generelle Vorteil dieser Belüftungsart liegt vorerst einmal darin, dass der Fluss an einer Stelle erfasst werden kann, wo die gesamte Wassermenge durchfliessen muss. An Sperrstellen stehen zudem Installationen und Personal zur Verfügung. Ein Nachteil besteht vor allem bei langen Stauhaltungen darin, dass der Ort der Belüftung im Längenprofil fixiert ist und die Apparate nicht mobil sind.

#### 4.1.2 Belüftungswirkung der Turbinen ohne Luftbeigabe

Da der Einbau von Staustufen zur Energiegewinnung den Sauerstoffhaushalt eines Fließgewässers verschlechtert, stellt sich die Frage, ob nicht der Verursacher dieser neuen Situation allein schon durch das Umwälzen und Aufwirbeln des Wassers beim Turbinivorgang allenfalls wieder zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes beiträgt. Als positive Beiträge zur Belüftung können das Umwälzen der Wasserschichten und die Blasenaufnahme im auftauchenden Unterwasserstrudel angenommen werden. Es ist aber auch zu beachten, dass dem Wasser im Unterdruckbereich des Saugrohres sogar Sauerstoff entzogen werden kann, und dass das Aufwirbeln von Bodenschlamm die biogene Zehrung erhöhen könnte.

Dieses Problem wurde bis anhin nicht eingehend untersucht. Immerhin ist es gelungen, einige der eher seltenen Messreihen aufzuspüren, welche den Sauerstoffvergleich im Ober- und im Unterwasser ermöglichen.

In der Tabelle auf Seite 23 sind Werte des Kraftwerkes Bremgarten-

Zufikon, welches an der Reuss (Schweiz) liegt, eingetragen. Trotz unterschiedlicher Wasserführung und einem weiten Temperaturbereich liegen die Sauerstoffgehalte nahe der Sättigungsgrenze. Es ergibt sich vorerst, dass sich die  $C_t$ -Werte nach dem Passieren der Turbinen nicht wesentlich verändern. Ein nur schwacher Trend weist auf eine geringfügige Sauerstoffanreicherung beim Turbinieren hin. Entsprechend fallen auch Messungen an der Mosel (Deutschland) aus. Daten aus den vier Werken Müden, Frankel, Neef und Enkirch ergeben zu 60 % minim höhere Sauerstoffwerte im Unterwasser. Die Werte liegen nahe dem Umschlag zum anaeroben Zustand ( $C_t = 1$  bis  $4$  mg/l; Ende August mit Temperaturen von  $19.5$  bis  $23^{\circ}$  C).

KW BREMGARTEN-ZUFIKON AN DER REUSS (SCHWEIZ)

OW = KW Zufikon (Oberwasser)  
 UW = Bremgarten, Steg (Unterwasser)

Wassermenge $Q_w$ $m^3/s$	Wassertemperatur T $^{\circ}C$	Sauerstoffgehalt $C_t$ $mg\ O_2/l$	Sauerstoffsättigung $C_t$ %	BSB <sub>5</sub> $mg\ O_2/l$
50	3.7	11.0 = OW 11.6 = UW	87	1.7
	3.9		92	2.5
45	3.8	11.4 11.3	91	2.3
	3.8		105	3.4
45	7.4	13.0 12.3	113	4.2
	7.0		106	3.3
85	12.6	9.8 10.1	97	3.8
	12.7		100	3.7
200	12.8	9.9 10.1	99	2.5
	13.0		100	3.0
145	20.6	8.8 9.0	102	2.0
	20.4		104	1.9
175	14.8	9.3 9.5	96	2.6
	14.8		98	3.7
90	19.7	7.8 7.7	90	2.8
	19.3		88	2.2
115	14.6	8.7 8.7	91	2.1
	14.4		90	2.3
53	6.4	10.7 10.8	91	1.1
	6.4		92	1.3
80	4.6	10.9 10.9	89	2.4
	4.7		88	2.2



Wassermenge $Q_w$ $\frac{3}{m^3/s}$	Wassertemperatur T $^{\circ}C$	Sauerstoffgehalt $C_t$ $mg\ O_2/l$	Sauerstoffsättigung $C_t$ %	BSB <sub>5</sub> $mg\ O_2/l$
47	2.7	11.9	92	2.8
	2.8	12.6	98	3.4
90	5.6	10.4	86	1.9
	5.6	10.6	95	2.3
95	8.5	10.7	96	2.3
	8.3	10.6	95	3.1
205	6.5	11.4	97	1.9
	6.5	11.6	99	1.9
220	12.6	11.5	114	3.3
	12.5	11.4	113	2.9
245	15.2	9.4	99	2.1
	15.2	9.5	100	1.9
260	16.8	8.6	93	2.9
	16.8	8.5	92	2.0
205	17.6	9.0	99	2.8
	17.4	8.7	96	2.8
65	13.4	9.0	90	1.7
	12.9	8.8	88	1.6
63	12.6	9.3	92	2.2
	12.4	9.4	93	2.2
105	7.1	10.3	88	1.4
	7.2	10.9	92	1.3
70	5.8	10.7 = OW	90	2.2
	5.8	10.9 = UW	92	2.3

Einige weitere Messwerte österreichischer Donaukraftwerke ergeben sich aus der nachstehenden Zusammenstellung.  
Die Sauerstoffmessungen erfolgten ca. 100 m vor und 1000 bis 2500 m nach Turbinendurchgang.

Name Kraftwerk	Turbinen	Wassermenge Nenn-/Max- $\frac{3}{m^3/s}$	Fallhöhe m	Sauerstoffgehalt nach mg/l		Zeitraum
				vor mg/l	nach mg/l	
Kw Aschach	4 Kaplan vertikal	510/625	15.0	9.4	9.2	Frühjahr 1964
				10.9	12.0	Herbst 1964
				9.2	9.1	Herbst 1965
				9.9	9.9	Herbst 1966
Kw Ybbs- Persenbeug	6 Kaplan vertikal	350 und 388 372 und 394	10.6	10.2	10.0	Frühjahr 1961
				8.4	8.4	Herbst 1962
				9.7	9.6	Herbst 1963
				9.2	9.2	Herbst 1965
				9.6	9.6	Herbst 1966

Schliesslich seien noch einige Daten am Rheinstau des Kraftwerkes Laufenburg zusammengestellt (Flussmitte):  
 Das Kraftwerk ist mit 10 horizontalen Doppelzwillings-Francis turbinen ausgerüstet. Die Messungen erfolgten  
 im Oberwasser in Tiefen von 0.3 bis 12.5 m\*, im Unterwasser dagegen an der Oberfläche\*\*.

Wassermenge m <sup>3</sup> /s	Temperatur °C		Sauerstoffgehalt mg/l		BSB <sub>5</sub> mg/l		pH		Zeitpunkt / Umwelt	
	vor*	nach**	vor*	nach**	vor*	nach**	vor*	nach**		
390	12.1	11.9	7.32-	7.23	7.66	1.05	0.97	7.55	7.57	Okt. 1962/Hochnebel
450	11.1	11.0	7.59-	7.34	7.77	1.53	2.15	7.58	7.60	Nov. 1961/bedeckt, lange trocken
1040	3.2	3.4	7.90		7.90	2.55	2.11	7.90	7.90	Jan. 1962/wolkig, z.T. sonnig
1080	5.1	5.2	12.34-	12.78	12.35	2.40	3.10	5.10	5.20	Febr. 1961/schön, warm
1100	19.8	20.4	8.23-	8.29	8.15	1.48	2.03	7.85	7.85	Juli 1962/warm, sonnig, Wind
1185	5.4	5.4	11.84-	12.53	12.40	3.18	4.17	7.92	7.95	April 1962/Regen, W-Wind
1195	13.0	13.2	10.24-	9.96	10.40	2.20	2.00	8.00	8.00	Mai 1961/sonnig, N-Wind
1225	17.4	17.6	8.96-	9.28	10.19	1.33	2.19	7.90	7.90	Aug. 1961/sonnig, vorher trocken

Obschon die zitierten Beispiele Unterschiede des Maschinentyps sowie bezüglich Wassermenge, Temperatur, Anfangs-sauerstoffgehalt, BSB<sub>5</sub> oder pH-Wert mitberücksichtigten, ist kein systematischer Zusammenhang mit der O<sub>2</sub>-Konzentrationsänderung ersichtlich.

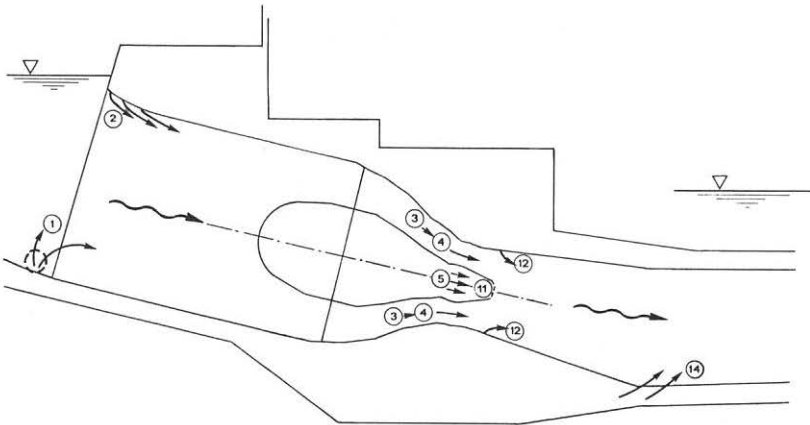
Es lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass das Wasser die Turbinen ohne nennenswerte Veränderung des Sauerstoffgehaltes passiert. Somit reichen Wasserturbinen ohne zusätzliche Belüftungsvorrichtung nicht aus, um die Sauerstoffengpässe eines Flusses wirksam zu beheben.

### Turbinenbelüftung mit Luftbeigabe

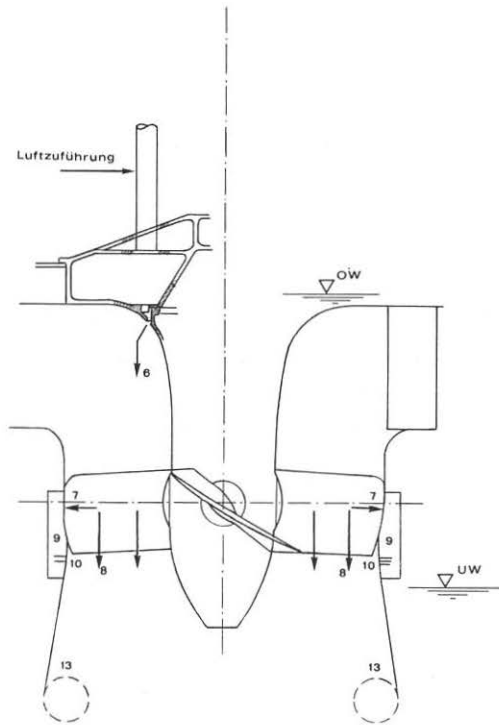
Die Literaturdurchsicht ergibt Hinweise auf mögliche Einspeisungsstellen der Luft:

Raney e.a. (1973), Wagner (1955 und 1958), Wolff (1966), Escher Wyss (1969 und 1972).

Die Schemata der Figuren 3 und 4 zeigen Vertikalschnitte durch eine Propellerturbine (Kaplanturbine) und durch eine Rohrturbine; die technisch relevanten und möglichen Belüftungsstellen sind eingetragen und in Fließrichtung numeriert. Eine tabellarische Gegenüberstellung ausgeführter Turbinenbelüftungsanlagen folgt auf Seite 36 .



Figur 3 : Mögliche Stellen zur Luftzuführung (Schema)



Figur 4 : Mögliche Stellen zur Luftzuführung (Schema)

#### 4.1.3 Ueberdruckbereich

##### Stelle 1 : vor Turbine

Nach diesem sogenannten Verfahren nach Von Wolff wird Luft vor der Turbine, meist nach dem Rechen, durch poröse Rohre an der Sohle eingebracht. Der erhöhte Druck in grosser Wassertiefe begünstigt den Sauerstoffeintrag aus den Luftblasen, erfordert aber auch zusätzliche Leistung in Form eines Kompressors oder Gebläses. Die Blasenschwärme finden beim Passieren der Turbine günstige Turbulenzverhältnisse vor und weisen bis zu ihrem Wiederauftauchen im Unterwasser eine lange Verweilzeit auf. Eine gewisse Reduktion der Lösungsrate ist im Unterdruckbereich nach dem Laufrad möglich, da hier Luft in Form von feinsten Bläschen wieder ausgeschieden werden kann.

Das Verfahren nach Von Wolff benötigt zwar zusätzliche Installationen und Apparate, welche gewartet werden müssen, weist aber den Vorteil auf, dass keine Veränderungen an der Turbinenanlage selbst vorgenommen werden müssen, was auch den nachträglichen Einbau in bereits bestehende Stauanlagen erlaubt. Dieses Verfahren kann an allen in Niederdruckkraftwerken gebräuchlichen Turbinen angewandt werden. Bei vertikaler Achse wird der gesamte Wasserstrahl gleichmässig in den Belüftungsvorgang einbezogen, ohne dass sich die Kavitationsgefahr erhöht. Bei horizontal- oder schrägachsigen Turbinen ist eine rotationssymmetrische Belüftung nicht zu gewährleisten. Die Luft hat die Tendenz, sich an höher gelegenen Stellen mit geringerem statischen Druck anzusammeln. Dies reduziert die Belüftungswirkung, schafft an der sowieso meistgefährdeten Stelle neue Kavitationskeime und kann zu pulsierenden Ablösungen am Laufrad führen.

##### Stelle 2 : Oberkante Einlauf

Die Beigabe vor der Turbine gegen nur geringen statischen Wasserdruck spart zwar Kompressorleistung, erschwert aber das dosierte Ausblasen.

Der günstige Einfluss des Druckes auf den Lösungsvorgang fällt weg. Bei nicht vertikalachsigen Anlagen wird die unter 1 angeführte Gefahr des lokalen Luftansammelns wohl derart dominierend, dass dieses Verfahren auszuschliessen ist.

Stelle 3 : Ende der Birnenstützrippe

Dieses Verfahren steht und fällt vermutlich mit den Möglichkeiten, die Zuleitungen und das Luftgebläse rationell zu plazieren und zu unterhalten. Diese Methode ist möglicherweise dann interessant, wenn bei Rohrturbinen die Luft nur im tieferliegenden Halbraum zugeführt wird. Es ist kein wesentlicher Wirkungsabfall zu erwarten.

Stelle 4 : Leitschaufelvorderkanten

Es gelten in etwa die Aussagen zur Stelle 3. Dazu kommt aber, dass im Ueberdruckbereich, unmittelbar vor den rotierenden Elementen, die Druckwechselwirkungen zwischen Belüftungsströmung und Turbinenrad intensiviert werden. Bei hohen Wassermengen und entsprechend grösserer Luftmenge wird der Turbinenwirkungsgrad wohl zusätzlich absinken.

Stelle 5 : Ringspalt zwischen Hals und Nabe

Es gelten die unter 4 gemachten Aussagen.

Stelle 6 : Abschaltspalt am Turbinenhals

An sich besticht die Idee, bereits vorhandene Oeffnungen als Belüftungsöffnungen zu verwenden. Der Abschaltspalt als Kreisring der Breite von etwa 8 cm weist aber eine viel zu grosse Austrittsfläche auf; es entstünden nicht die gewünschten feinen Blasenschwärme sondern Luftpakete, welche auch die Laufruhe der Turbine stören könnten. Wenn es gelingt, diesen Kreisspalt mit einem feinporigen Material genügend abzudecken -

ein nicht ganz leichtes Experiment an einer wenig zugänglichen Stelle - so scheint eine wirksame Sauerstoffanreicherung möglich.

#### 4.1.4 Unterdruckbereich

Im Unterdruckbereich nach der Leitradenebene strömt die Luft durch einen Bypass teilweise von selbst ein. Dies bewirkt allerdings einen teilweisen Abbau des Unterdruckes und somit des Turbinenwirkungsgrades, welcher in Relation zur Ersparnis an Kompressorleistung zu setzen ist. Turbulenz und Verweilzeit sind hier prinzipiell kleiner als bei den Ueberdrucksystemen. Wohl sind die reinen Installationskosten niedriger, der nachträgliche Einbau während des Betriebes ist aber kaum möglich. Es ist auch zu erwähnen, dass die Sogwirkung und damit der Belüftungswirkungsgrad mit sinkender Wassermenge abnimmt. Anreicherung infolge Sauerstoffengpass bei Niedrigwasser ist dann ausgeschlossen.

#### Stelle 7 : Laufradspalt

Die Leitschaufeln sind innen hohl. Die Luft würde an der Stelle mit der grössten Umfangsgeschwindigkeit austreten. Es bleibt abzuwarten, ob die Luftzugabedosierung den labilen Druckverhältnissen im Spalt zwischen Schaufel und Gehäuse gerecht werden kann. Praktische Erfahrungen liegen keine vor. Dies wohl auch deshalb, weil ein nachträglicher Einbau zu aufwendig wäre.

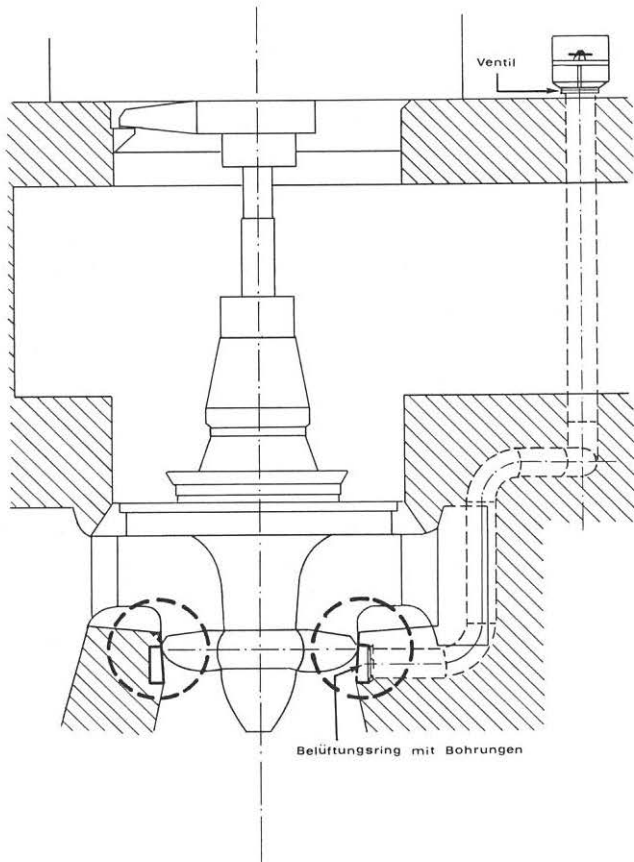
#### Stelle 8 : Aus Laufradflügel

Wenn aus turbinenbetrieblicher Hinsicht zu verantworten, ist durch dieses System der wohl höchste Belüftungswirkungsgrad der verschiedenen Turbinenbelüftungen zu erwarten. Die Blasenverteilung unmittelbar nach der Laufradenebene ist maximal, die Turbulenz an den Blasenrenzflächen noch wirksam und die Verweilzeit bis zum Wiederauftauchen



im Unterwasser der ersten, schnelleren Diffusionsphase noch angepasst.  
Ein praktischer Versuch könnte sich lohnen.

Stelle 9 : Durchbohrter Belüftungsring knapp unter der Laufradebene



Figur 5 : Luftzuführung durch Belüftungsring

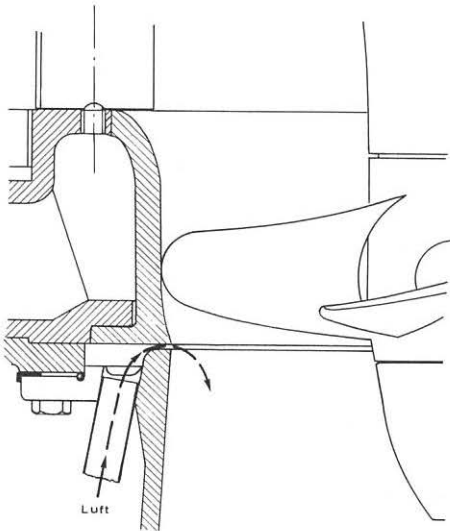
Dieses nach Wagner (1958) beschriebene Voith-Wagner-System wurde erstmals am Neckar bei Poppenweiler, unterhalb Stuttgart, gemäss Figur 5 eingebaut. Es zeigte sich, dass die angesaugte Luftmenge vom Betriebspunkt der Turbine und vom Drosselzustand des Luftventils abhängt. Bei konstanter Luftzugabe nimmt der Leistungsabfall mehr als linear mit dem Wasserdurchfluss zu. So investiert man beispielsweise für 1000 l angesaugte Luft

bei  $Q_w = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  200 kW

bei  $Q_w = 33 \text{ m}^3/\text{s}$  500 kW.

Desgleichen steigt auch bei konstantem  $Q_w$  der Belüftungsaufwand in kWh/kg  $\text{O}_2$  mit zunehmender Luftmenge. Diese prinzipiellen Zusammenhänge gelten auch für die anderen Turbinenbelüftungssysteme.

Stelle 10 : Luftzuführungsspalt unterhalb der Laufradebene

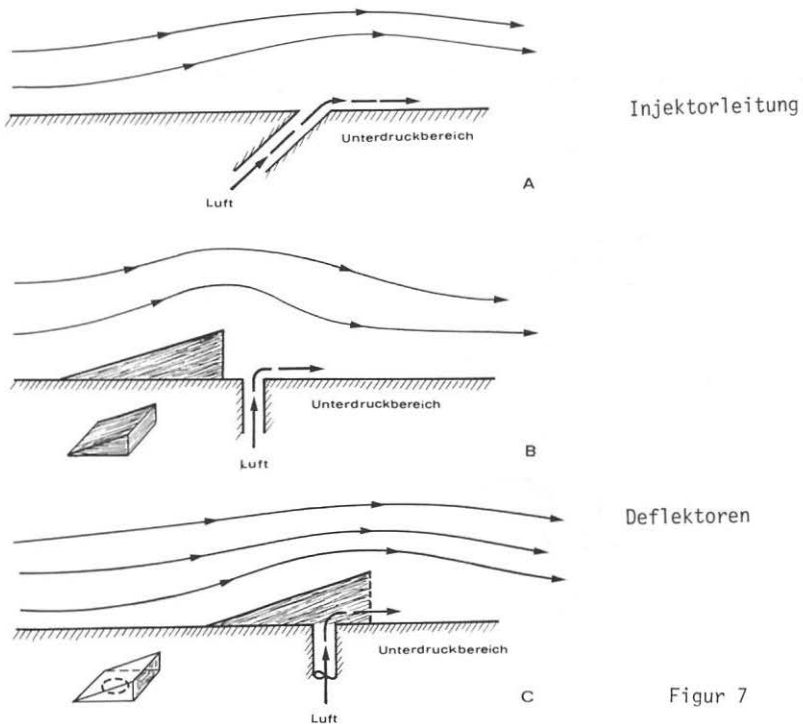


Figur 6 : Luftzuführungsspalt

Nach Wagner (1955) wurden Versuche an einer Kaplankleinturbine durchgeführt. Beste Resultate ergaben sich mit einem in Einzelöffnungen unterteilten Ringspalt von 2 mm. Bei Gewährleistung einer gleichmässigen Luftdosierung ist die Laufruhe der Turbine gewährleistet. Es ist zu erwarten, dass der Turbinenwirkungsgrad erst bei hohen Luft-raten merklich abnimmt. Dieser Uebergang findet bei einem Verhältnis von  $Q_L/Q_w$  von 1 bis 2 % statt.

#### Zusätzliches Anbringen von Schikanen

Es ist möglich, im Unterdruckbereich, in der Gegend der Einleitungsstelle (10), zusätzliche Störelemente anzubringen, welche die lokale Druckdifferenz zur Atmosphäre noch vergrössern.



Angaben hierzu sind bei Raney e.a. (1973 und 1977) zu finden. Bei den beschriebenen Systemen handelt es sich um eine schräg zugeführte Injektorleitung (A), einen gegen die vertikale Wasserströmung gestellten Keil mit nachfolgendem Lufteinlass (B) sowie um einen entsprechenden Hohlkeil mit innen angeordneter Austrittsöffnung (C). Öffnungen und Keil werden meist viermal über dem Umfang angeordnet.

Beispielsweise konnte die Sauerstoffeintragsrate in den Turbinen des Long Martin Dam in den USA zusätzlich erhöht werden. Angaben über die Wirkungsgradveränderung sind nicht erhältlich.

#### Stelle 11 : Am Haubenaustritt

Von Turbinenfachleuten wird eine wesentliche Verschlechterung des Turbinenwirkungsgrades befürchtet. Dieses Verfahren zeigt keine offensichtlichen Vorteile gegenüber anderen.

#### Stelle 12 : Engster Saugrohrquerschnitt

Es bestehen über den Wirkungsgrad ähnliche Befürchtungen wie bei 11. Günstig ist dagegen, dass der Luftaustritt direkt aus dem Gehäuse erfolgen kann. Die hohe Strömungsgeschwindigkeit an der engsten Stelle hält die Blasen etwas stark an der Wand.

#### Stelle 13 : Ringleitung im Saugrohr

Im Prinzip wird hier eine Möglichkeit aufgeworfen, Luft ins Saugrohr zu bringen, ohne Turbine und Gehäuse zu verändern. Der entstehende "Ueberzahn" hat aber bereits ohne Belüftung einen Wirkungsgradverlust zur Folge, welcher an einer Francisturbine zu 1 % gemessen wurde. Da bei Kaplan turbinen der Saugrohr rückgewinn gegenüber der Gesamtfallhöhe verhältnismässig noch grösser ist, sind dort die Verhältnisse noch ungünstiger. Bei Belüftung wird dann noch zusätzlich Unterdruck abgebaut.

4.1.5 Tabelle Turbinenbelüftung

Name Kraftwerk Gewässer	Turbinen	Belüftungseinrichtung	Leistung kg O <sub>2</sub> /h	Energie- bedarf kWh/kg O <sub>2</sub>	Literatur	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /s	H m	P(Turb) kW
Pixley Dam Flambeau River	2 Francis horizontal	2 Eingabepunkte vis- à-vis; nach Laufrad	257	0,70	Scott e.a. 1960	12,0	6,4	600
Rat Rapids Wisconsin	4 Francis horizontal	4-inch Leitung um 180°	356	1,13		9,6	6,1	320
Rotschild Wisconsin	Francis	-	-	0,41		49,9	6,1	800
Port Edwards Wisconsin	Francis		504	1,65		12,2	5,2	375
Kimberly Fox River	4 Propeller	4-inch Leitung Laufrad	191	0,67		34,5	2,7	900
Rapide Croche Fox River	Propeller	"	538	0,69		29,5	2,4	800
Flambeau River (Zufl. Missis- sippi)	Kaplan			0,49	Raney e.a. 1973			
Poppenweiler Neckar	2 Kaplan				Wagner 1958	30	6,92	1803 (P. Ausbau)
Baldene untere Ruhr	Kaplan	Wagner.Voith (Ringspalt: Posi- tion 9)	120	0,98	Wagner 1965			Gesamtkosten 0,15 DM (1955)/kg O <sub>2</sub> bei 30 Be- triebstagen im Jahr

4.1.5 Tabelle Turbinenbelüftung (Fortsetzung)

Name Kraftwerk Gewässer	Turbinen	Belüftungseinrichtung	Leistung kg O <sub>2</sub> /h	Energie- bedarf kWh/kg O <sub>2</sub>	Literatur	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /s	T °C	Q <sub>L</sub> /Q <sub>w</sub>
Poppenweiler Neckar	2 Kaplan	Rohrkreisring an- schliessend an Lauf- radebene, D(Laufrad): 2410 mm, 400 Belüft. bohrungen à 15 mm 50 und 100 m nach Staustufe dieselben Werte	40- 93 69-207 151-330 131-430 72/102 324 65-209 207 245	0,45-1,0 0,87-1,37 1,05-1,70 1,87-2,23 0,78/1,06 3,03 0,15-0,53 0,53 0,61	Wagner 1958	12,3 19,4 26,2 33,0 19,4 33,2 20,0 20,5 23,5	17 17 17 17,1 17,7 17,7 14,7 14,8 14,8	1,5-5,8 1,4-8,0 1,3-9,4 7,03 7,09 9,22 0,4-2,3 2,3 2,1
Mettlach Saar	Kaplan	Wolff: Rohr 4m ge- loch, 9m unter Normalstau, Aus- trittsfläche 2,51m <sup>2</sup> (auf Dammbalkenzange) (Ausgangskonzentra- tion = 2,0 ± 0,5 mg/l		0,39 0,74 0,66 1,00 1,67 0,71 1,56 0,71	Wolff 1966	25,5 17,7 21,1 25,5 9,0 17,7 26 25,5 25,5	10,5 11 11 11 24 26 24,5 24,5	0,98 1,41 1,19 0,98 2,78 1,41 0,98 0,98
	Kaplan D-Saug- rohr = 6,10 m	8 Deflektoren 152 mm hoch 305 mm breit 300 angestellt	150	ca 0,60	Raney 1977			Turbine verliert 2% Leistung. Von 1,7 auf 3,2 mg/l, Aufnahme- wirkung 40%

#### Stelle 14 : Nahe Unterwasser

Zu nahe dem Unterwasserspiegel gelegene Systeme haben an sich bereits nichts mehr mit Turbinenbelüftung zu tun. Die Drall- und Turbulenzwirkung der Turbine ist abgeschwächt, der auftauchende Wasserstrahl erhöht die Steiggeschwindigkeit der Blasen und verkürzt deren Aufenthaltszeit gegenüber einem reinen Druckluftbelüfter.

### 4.2 Druckluftbelüftung

#### 4.2.1 Prinzip

Dieses Verfahren besteht darin, Druckluft ins Fließgewässer derart einzupressen, dass die aufsteigenden Luftblasen möglichst wirksam Sauerstoff ans Wasser abgeben. Die Luft muss mit Ventilatoren, Gebläsen oder Kompressoren eingebracht werden. Aehnliche Anlagen sind auch bekannt als Oelsperren in Häfen, als Salzwasserrückhalt in Mündungsgebieten von Strömen, als Druckdämpfer bei Unterwassersprengungen und vor allem als Belüftungsvorrichtungen in der Abwassertechnik. Im letzten Fall finden sie Verwendung zur Belüftung des Abwassers vor dem Vorklärbecken, zur Vorbehandlung in Öl- und Fettfängen, zur Entschäumung mechanisch vorgeklärten Abwassers, zur Schlammförderung oder zur Sauerstoffversorgung in biologischen Anlagen.

#### 4.2.2 Typen

Bei der Druckluftbelüftung in Flachgewässern unterscheidet man analog zur Klärtechnik folgende drei Untergruppen:

- Feinblasige Belüftung: sie wird durch Filterplatten oder Filterkerzen erzeugt, welche Porenweiten der Größenordnung 1/10 mm aufweisen.

- Mittelblasige Belüftung: hier finden Düsensschläuche und gelochte Rohre mit Lochweiten bis 5 mm Verwendung.
- Grobblasige Belüftung: der Austritt erfolgt direkt aus den Verteilrohren.

Basierend auf der Betrachtung der einzelnen Einflussgrößen zur Sauerstoffaufnahme folgt, dass der Austrittsort der Luftblasen möglichst tief unter dem Wasserspiegel liegen sollte, da hier grosser Druck und lange Verweilzeit während des Blasenanstieges gewährleistet sind. Weil Blasenschleier einen hydraulischen Widerstand für ein Fließgewässer bedeuten, sind sie möglichst dort einzusetzen, wo sie den Fluss über die gesamte Breite belüften, ohne dass also grosse Teile des Wassers dem Blasenstrom ausweichen können. Als beste Eingabestellen eignen sich deshalb in der Regel die Unterwasser unmittelbar nach einer Staustufe. Meist ist hier auch Stromanschluss und Zufahrt vorhanden. Eine Beeinträchtigung des Turbinenwirkungsgrades besteht nicht mehr. Bei der Platzierung der Belüftungselemente in Form von horizontalen Rohren, Schläuchen, Matten usw. ist zu beachten, dass diese nicht auf der Flussole aufliegen dürfen, da sie sonst zusätzlich Schlamm aufwirbeln, der wiederum Sauerstoff zehrt. Die Druckluftbelüfter ruhen deshalb meist auf Trägern oder Schwimmern. Nicht bewährt haben sich Vertikalrohre; diese bedürfen wie Rechenstäbe vermehrt der Reinigung.

In grober Näherung kann man sagen, dass der spezifische Leistungsbedarf von Luftblasenschleiern für 100 % Defizit bei 1.5 bis 3.5 kWh/kg  $O_2$  zu erwarten ist. Die Wirksamkeit einer Anlage hängt wesentlich davon ab, wie die Anordnung der Austrittsöffnungen und der Ausblasdruck gewählt und den wechselnden Flusswassermengen angepasst werden können. Wie bereits dargelegt, sind bei gleicher Luftmenge kleine Blasen wirksamer als grosse. Kleine Blasen werden mittels kleinster Austrittsöffnungen und unter geringem Ueberdruck erzeugt. Theoretisch ideal wären Düsen mit geringen Durchsätzen und ausreichenden Abständen. Da man derart aber kaum die notwendige Gesamtluftmenge ausblasen kann, muss man in der Praxis eine dichtere Anordnung der Oeffnung und einen



4.2.3 Tabelle Druckluftbelüftung

Ort Gewässer	Typ	Technische Daten	kg O <sub>2</sub> /h	kWh/kg O <sub>2</sub>	Bemerkung
Flambeau River	Filterplatten feinblasig dito + Filter- zylinder	24 m <sup>2</sup> Filter Tiefe 3,60 m Ø 10 mm, L = je 1 m Tiefe 3,6 m	26,0 - 20,5 43,2 - 36,1	1,74 - 2,20 1,05 - 1,25	
Heil Lippe	Düsen grobblasig  Kunststoff- platten feinblasig  Kunststoff- platten	6240 Düsen Ø 6 mm Elemente 24 x 1 m Tiefe 0,95 m  porös Tiefe 1,05 m  Ø 1 mm Tiefe 1,05 m	28,4 - 32,6 41,4 - 52,0 42,4	1,74 - 1,52 1,20 - 0,95 1,17	
Herringen Lippe	Düsen- schläu- che mittel- blasig	5200 Düsen Ø 1 mm 10 Elemente 25x6 m Tiefe 4 m	21,8	3,45	
Baldeneysee	Düsen- schläu- che, mittelblasig	1500 Düsen auf 150 m Ø 0,5 - 0,7 mm Tiefe 2,50 - 6,35 m	28 (Mittel)	1,45 (Mittel)	
Passaic River Delaware River	Druckschläuche an Floss	Tiefe 1,2 m	25,2	0,74 0,84 2,78	Raney e.a. 1973 Raney e.a. 1973 Goldberg 1973

4.2.3 Tabelle Druckluftbelüftung (Fortsetzung)

Ort Gewässer	Typ	Technische Daten	kg O <sub>2</sub> /h	kWh/kg O <sub>2</sub>	Bemerkung
ARA	Kreisel	D = 45 cm D = 240 cm	0,3 110,0	0,36 0,41	Klapper 1976 "
ARA	in Rundbecken	D = 3,6 m		0,34 - 0,42	Böhnke 1969
Fischintensivanlage	Rohrgitterkaskade			3,42 - 3,66 bei geringem Sättigungsdefizit	Knösche e.a. 1972
Schwimmende Belüftungsbrücke			30	1,62	(Bsp)
Wahnbach	Umwälzung Hypolymnion		23	1,20	(Bsp)
Talsperre	völlige Umwälzung		16	2,40	(Bsp)

höheren Durchsatz in Kauf nehmen. Es ist aber zu vermeiden, dass Blasketten bei feinblasiger Belüftung oder grosse Einzelluftpakete bei grobblasiger Belüftung entstehen. Die Druckluftbelüftung ist im Prinzip ein mobiles Verfahren und kann entlang des ganzen Gewässers eingesetzt werden. Da häufig an- und abgestellt werden muss, ist die Verstopfungsgefahr vor allem bei den sonst wirksameren Feinblasen nicht ausser acht zu lassen.

### 4.3 Wehre, Sohlenstufen

An gestauten, regulierten oder an durch Bodenschwellen stabilisierten Flüssen finden sich feste oder bewegliche Ueberfallwehre, Dach- oder Steilwehre sowie ein- oder mehrstufige Sohlenstufen (Kaskaden), die einen erheblichen Beitrag zur Anhebung des Sauerstoffgehaltes des Wassers leisten können. Ein eigenes konzipiertes Wehr erreicht einen beachtlich hohen Wirkungsgrad. Im weiteren gehören einerseits Gefälleknicks, die einen Wassersprung bewirken, und andererseits auch Schiffahrtsschleusen zu dieser Kategorie von Belüftungseinrichtungen. An einer Schleuse sprüht während des Oeffnens des Obertores ein scharfer Wasserstrahl durch die anfänglich noch enge Oeffnung, der wie eine Wasserstrahlpumpe wirkt; das Entleeren der Schleusenkammer führt wiederum zu einer intensiven Durchwirbelung des Wassers.

Die Sauerstoffaufnahme an Ueberfallwehren mit freifallendem Strahl und an Steilwehren, bei denen das Wasser beschleunigt durch eine feste Steilrampe ins Unterwasser eintaucht, lässt sich in zwei getrennte Vorgänge unterteilen. Es wird zwischen dem Sauerstoffübergang auf den überfallenden Strahl als im wesentlichen molekularen Diffusionsvorgang und der Aufnahme aus den Luftblasen im Unterwasser als turbulenten Stoffumsatzvorgang unterschieden. Entsprechend finden sich in der Literatur Angaben für die zweckmässige Gestaltung der Ueberfallkante oder des Ueberfallrückens sowie über den Ausbau des Unterwassers. Zentraler

Parameter beider Teilvorgänge ist die Fallhöhe H.

Mehrere Autoren geben Formeln oder Diagramme zur Bestimmung der Sauerstoffaufnahme bei Ueberfall- und Steilwehren an. Nach Gameson (1947) gilt für unregulierte Ueberfallwehre mit Fallhöhen zwischen 0.40 und 2.70 m die Beziehung:

$$\frac{C_S - C_0}{C_S - C_U} = 1.0 + 0.11 \cdot a \cdot b \cdot (1 + 0.046 \cdot T) \cdot H$$

$C_S$	mg/l	Sättigungskonzentration des Sauerstoffes in Wasser
$C_0$	mg/l	Sauerstoffkonzentration im Oberwasser
$C_U$	mg/l	Sauerstoffkonzentration im Unterwasser
a	-	Beiwert für den Grad der Verunreinigung 1.25 = schwach 1.00 = mittel 0.85 = stark verunreinigt
b	-	Beiwert für den Wehrtyp 1.0 = Wehr mit freiem Ueberfall 1.3 = Stufenwehr
T	°C	Wassertemperatur
H	m	Fallhöhe

Londong (1973) schlägt für Ueberfälle und Kaskaden bis 3 m Höhe die Gleichung

$$C_U - C_0 = (C_S - C_0) \cdot (1 - e^{-k_h \cdot H})$$

vor, wobei  $k_h = k_{h15} \cdot \alpha \cdot (1 + (T - 15) \tau)$

$k_h$	1/m	Fallhöhenkonstante für verschmutztes Wasser
$k_{h15}$	1/m	Fallhöhenkonstante bei 15° C für Reinwasser liegt zwischen 0.2 und 0.7 je nach Fallhöhe und Wassermenge
$\tau$	1/°C	Turbulenzbeiwert zwischen 0.01 und 0.02
$\alpha$	-	Beiwert für den Detergentiengehalt. Liegt zwischen 0.3 (wenig turbulentes Abwasser) und 0.9 (turbulentes Flusswasser)

Tebbutt e.a. (1977) drücken die Sauerstoffaufnahme an Kaskaden durch drei Kennzahlen aus:

$$\text{Flow Number} = \frac{q^{2/3}}{g^{1/3} \cdot L}$$

$$\text{Gefälle} = H/L$$

$$\text{Wiederbelüftungsfaktor} = (\ln r) \cdot (g/H)^{1/2} \cdot (1/N)$$

$$q \quad \text{m}^3/\text{m} \quad \text{s} \quad \text{spezifischer Abfluss} = Q_w/B$$

$$g \quad \text{m/s}^2 \quad \text{Erdbeschleunigung}$$

$$L \quad \text{m} \quad \text{Kaskadenlänge (Grundriss)}$$

$$H \quad \text{m} \quad \text{totale Fallhöhe über alle Stufen}$$

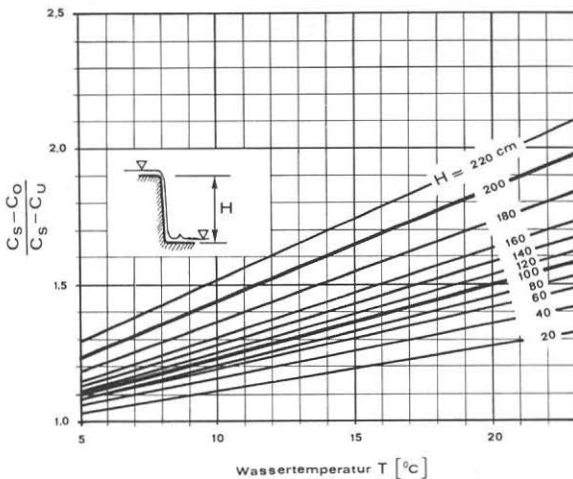
$$N \quad - \quad \text{Stufenzahl}$$

$$r \quad - \quad C_S / (C_S - C_U)$$

Es ergibt sich mit  $\rho_W =$  Dichte des Wassers ( $\text{kg/m}^3$ ) ein Verhältnis von Sauerstoffeintrag zu Leistungsverlust von

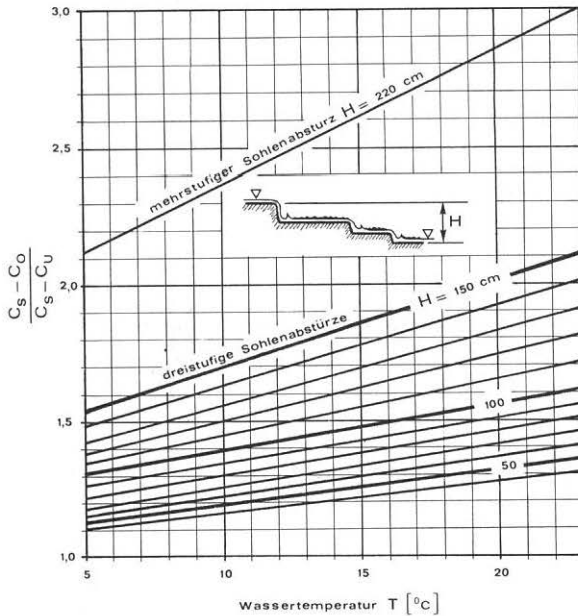
$$\frac{\rho_W \cdot q \cdot c_S \cdot \left(\frac{r-1}{r}\right)}{\rho_W \cdot g \cdot q \cdot N \cdot H} = 3.6 \frac{c_S \cdot \left(\frac{r-1}{r}\right)}{g \cdot N \cdot H} \quad (\text{kg O}_2/\text{kWh})$$

Bemessungsangaben in Diagrammform finden sich bei Mancak (1964) für einstufige Abstürze und dreistufige Kaskaden (Figuren 8 und 9) oder bei Albrecht (1969) für senkrechte Abstürze und Kaskaden (Figur 10).



Figur 8 : Sauerstoffaufnahme am einstufigen Absturz (Ueberfall)

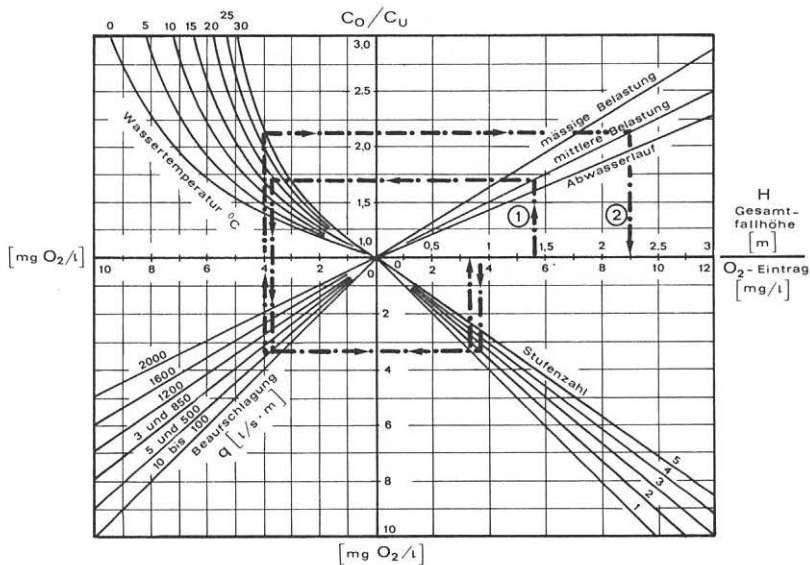
- $C_O$  mg/l Sauerstoffkonzentration im Oberwasser
- $C_U$  mg/l Sauerstoffkonzentration im Unterwasser
- $C_S$  mg/l Sättigungskonzentration gemäss Fig.1



Figur 9 : Sauerstoffaufnahme am dreistufigen  
Absturz (Kaskade)

Diese Formeln und Diagramme gelten für besondere untersuchte Wehrtypen und sind nicht allgemein zuverlässig. Die verschiedenen Untersuchungen zeigen aber einige Regeln zur Erzielung eines möglichst hohen Sauerstoffeintrages.

Für den Eintrag durch Diffusion im Ueberfallbereich ist die Strahlbeschaffenheit wichtig. Der dünne, dank Strahlaufreißern zweiseitig mit der Atmosphäre kommunizierende Strahl weist den relativ grösseren Sauerstoffgewinn auf als der dicke, ungestörte Strahl. Es folgt daraus



Figur 10 : Diagramm zur Ermittlung der Sauerstoffaufnahme an Ueberfällen und Kaskaden (bezogen auf 100% Defizit)

Beispiel 1 : Bei  $T = 20^{\circ}C$ ,  $q = 500$  l/s.m,  $H = 1,4$  m und  $C_0 = 2,3$  mg/l ergibt sich für ein mittelstark belastetes Gewässer ein  $O_2$ -Eintrag von  $3,3$  mg  $O_2/l$ . Daraus

$$C_U = C_0 + \frac{C_S - C_0}{C_S} \text{ (Sauerstoffeintrag).}$$

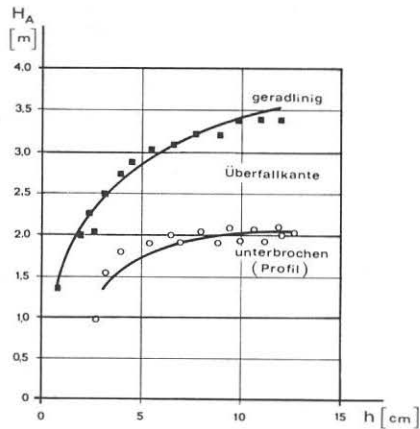
Beispiel 2 : Bei  $T = 30^{\circ}C$ ,  $q = 750$  l/s.m,  $C_0 = 1,5$  mg/l und  $C_U = 4,5$  mg/l ergibt sich im mittelstark belasteten Gewässer eine zweistufige Kaskade mit  $H$  (total) =  $2,3$  m.

$$O_2\text{-Eintrag} = \frac{C_S}{C_S - C_0} (C_0 - C_U) = 3,8 \text{ mg } O_2/l .$$



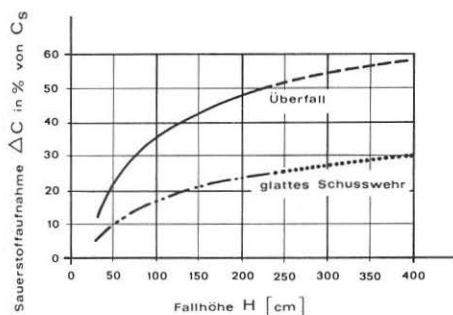
vorerst, dass der Ueberfall eine möglichst grosse Breite der Krone überströmen sollte.

Von Bedeutung ist der sogenannte Aufreisspunkt. Er bezeichnet die Stelle eines frei fallenden Strahles, an welcher der kompakte Wasserkern an seiner Oberfläche auseinandergerissen wird. Sie entspricht derjenigen Stelle, wo bei Spillways und Schussrinnen die Luftblasenaufnahme einsetzt. Von diesem Moment an überwiegt der Energieverlust durch erhöhten Luftwiderstand in der Sauerstoffeintragsbilanz, der Strahl taucht gebremst ins Unterwasser ein. Figur 11 zeigt, dass die Fallhöhe  $H_A$  bis zum Aufreisspunkt etwa 2 Meter beträgt und nur bei sehr sorgfältiger Ueberfallausbildung bis gegen 3.5 m erhöht werden kann.



Figur 11 : Fallhöhe  $H_A$  bis zum sogenannten Aufreisspunkt  
 $h$  = Dicke des Strahles am Ueberfall

Auswertungen ergeben, dass die Aufnahme durch Luftblasen im Unterwasser den primären Belüftungseinfluss darstellt. Die optimale Unterwassertiefe entspricht der Blaseneintauchtiefe; bei wesentlich tieferem Unterwasser nimmt der Wirkungsgrad wieder ab. Den besten Effekt erzeugt man somit, wenn man bei gegebener Fallhöhe mehrere breite Stufen so wählt, dass der Aufreisspunkt der Strahlen gerade erreicht wird und die Unterwassertiefe jeweils den Blasen angepasst wird. Die ideale Konstellation ist also letztlich durch Naturversuche zu bestimmen. Zur Abschätzung und als Ergänzung der Figuren 8 bis 10 sei auch auf die Figur 12 verwiesen, welche Fallhöhe  $H$  und relative Sauerstoffaufnahme in Relation setzt. Es sei noch angefügt, dass an beweglichen Wehren beim Ueberströmen mehr Sauerstoff aufgenommen wird als beim Unterströmen. Bei gegebener Höhe  $H$  ist der frei fallende, zweiseitig belüftete Strahl wirksamer als der Abfluss über eine Steilrampe.



Figur 12

#### 4.4 Oberflächenbelüfter

Die Oberflächenbelüfter sind ursprünglich für den Einsatz bei Abwasserreinigungsanlagen konzipiert. Sie versprühen sauerstoffarmes Wasser, meist unter Ausnutzung einer zusätzlichen Rotationsbewegung, über der Oberfläche. Massgebend für die Wirksamkeit ist das Erzeugen möglichst vieler Grenzflächen.

4.3.1 Tabelle Wehre, Ueberfälle

Name Wehr Gewässer	Typ	Anordnung	H m	Co mg/l	Cu mg/l	T °C	B m	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /s	kg O <sub>2</sub> /h	*) kWh/kg O <sub>2</sub>	Literatur
Spillenburg Ruhr	2-stufig, fest	1. Stufe 1:5 2. Stufe 1:2,8	1,2 1,6				300	20	151	3,57	Albrecht e.a. 1973
Kettwig Ruhe	Sektorwehr überstr.	1:1	5,9				90	20	495	2,33	Albrecht e.a. 1973
Kahlenberg Ruhr	Walze unterstr.	doppelter Absturz	4,5				430	20	393	2,63	Albrecht e.a. 1973
Baldeney Ruhr	Walze unterstr.	1-stufig Was- sersprung kleine Gegen- schwelle	8,75				33	20	570	3,02	Albrecht e.a. 1973
Werne Lippe	festes Schusswehr	1:1	1,8				100	20	101	3,45	Albrecht e.a. 1973
Beckinghau- sen, Lippe	Sturzwehr	überströmtes Schütz	2,6				30	20	323	1,59	Londong 1973
Duisburg Ruhr	Sturzwehr	überströmtes Hakenschütz	5,6				15	20	635	1,69	Londong 1973
	Trogkas- kade								0,88	0,85	Bundesanst. f. Gew. schutz 1976
Labor	Sturzwehr	Blechkante Strahllauf- reisser	0,1- 0,6							0,56-0,83 0,45	Kayser e.a. 1975

4.3.1 Tabelle Wehre, Ueberfälle (Fortsetzung)

Name Wehr Gewässer	Typ	Anordnung	H m	Co mg/l	Cu mg/l	T oC	B m	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /s	kg O <sub>2</sub> /h	*) kWh/kg O <sub>2</sub>	Literatur
Natur	Sturzwehr		2,6- 5,5							1,67	Kayser e. a. 1975
	Sturzwehr									1,33	Irving 1974
Labor	Sturzwehr	Blechkante	0,1- 0,6	2,1- 3,5	2,6- 6,1	14,1		2,34 (1/s)	0,04- 0,3	0,75- 0,59	Albrecht 1971
			0,1- 0,6	3,2	4,5- 6,0	13,8		7,28 (1/s)	0,14- 1,00 (gr/h)	0,69- 0,57	
			0,1- 0,6	2,6	2,8- 5,9	14,7		13,7	0,10- 2,15 (gr/h)	1,79- 0,50	
			0,1- 0,6	3,7	4,3- 6,7	14,7			0,55- 3,48 (gr/h)	0,48- 0,46	
Labor	Kaskade	5-stufig	1,0 1,5							0,87 1,08	Avery e. a. 1978
	Sturzwehr	scharfkantig	0,5 1,0 1,5							0,76 1,03 1,28	
	Wassersprung	Tauchwand unterströmt	0,5 1,0							0,72 0,96	

\*) Leistung =  $\rho_w \cdot g \cdot H \cdot \eta \cdot Q_w$  (n=0,8)

Die wichtigsten Maschinentypen sind:

- die Belüftungswalzen,
- Geräte mit Unterwasserpumpen und
- die Belüftungskreisel.

Die Belüftungskreisel rotieren um eine horizontale Achse. Sie sind mit kleinen Schaufeln ausgestattet, die mit Geschwindigkeiten von 1 bis 3 m/s das Oberflächenwasser aufwühlen. Schräggestellte Schaufeln ermöglichen eine zusätzliche Eigenbewegung der Walzenachse um einen festen Punkt.

Die Belüftungskreisel rotieren mit 30 bis 50 Umdrehungen pro Minute und erzeugen an den Wurf-schau-feln eine Umfangsgeschwindigkeit von 3 bis 5 m/s.

Oberflächenbelüfter können in Flüssen eingesetzt und an Brücken oder Flossen befestigt werden. Die Wirksamkeit steigt mit zunehmender Oberflächenflussgeschwindigkeit. Oberflächenbelüfter weisen eine recht hohe Betriebssicherheit auf und sind durch Treibgut nicht gefährdet. Als Nachteile sind hingegen aufzuführen:

- Störelement für die Schifffahrt,
- Umweltverschlechterung durch Lärm und Aussehen,
- Schaumbildung an der Oberfläche,
- Schwierigkeit über die ganze Flussbreite und -tiefe zu belüften.

#### 4.5 Verwendung reinen Sauerstoffs

Die Verwendung von Sauerstoffgas ist aus Kläranlagen bekannt. Im Zusammenhang mit Flussbelüftung liegen aber noch keine abschliessenden Erfahrungen vor. Das Verfahren wird zur Zeit für stehende Gewässer

studiert. Das Sauerstoffgas wird bei der Druckluftbelüftung in Blasenform eingegeben. Kombinationen mit der Schachtbelüftung sind auch denkbar. In diesem Fall wird der Gemischstrom aus Gas und Wasser zuerst durch ein Rohr nach unten, also gegen die Blasenauftsteigsrichtung, bewegt.

Da Luft ein Gasgemisch darstellt, welches nur ca. 21 %  $O_2$  enthält, ist die Sauerstoffkonzentration im Sauerstoffgas entsprechend 5 mal höher. Wegen der guten Lösungsrate benötigt man nur etwa 0.2 bis 0.3 % Sauerstoff bezüglich des Wasserdurchflusses. Es ist deshalb auch denkbar, Sauerstoff durch feine Düsen oder Filtermatten (Blasengrösse 1 bis 2 mm) vor Turbinen einzugeben. Eine Beeinflussung des Maschinenwirkungsgrades ist der geringen Beigabemenge wegen nicht zu befürchten. Die Bildung intensiver Kavitationskeime ist abzuklären. Da Sauerstoff im Gegensatz zu Luft nicht kostenlos zur Verfügung steht, wird letztlich der Sauerstoffpreis sowie die Transport- und Lagerungskosten der Flüssig-Sauerstofftanks die Gesamtwirtschaftlichkeit dieses Verfahrens bestimmen.

#### 4.6 Weitere Verfahren

Vor allem bei Kühl- und Klärwassereinflüssen werden Verfahren verwendet, die an sich auch an Fliessgewässern als Ergänzung oder allgemein bei geringem Abfluss angewandt werden können. Bohrt man eine Venturidüse, also ein sich verengendes Rohr nach der Einschnürung im Unterdruckbereich an, so wird durch die Löcher Luft eingesaugt, welche als Blasen weiterbewegt wird. Schon eine Druckhöhe von 1 m genügt zur Belüftung. Durch geeignete Wahl der Bohrungen kann eine wirksame, feinblasige Gemischströmung erzeugt werden. Ein besonders guter Wirkungsgrad ergibt sich, wenn der Gemischstrahl unter Wasser und nach unten gerichtet eingeleitet wird.

Der Vorteil der Venturidüse besteht in den geringen Investitions- und

und Betriebskosten. Ein Nachteil erwächst diesem Verfahren daraus, dass der Lufteintrag sehr stark vom Durchfluss abhängt. Nahezu konstante Wassermengen sind für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlich.

Eine Weiterentwicklung stellt der sogenannte Schachtbelüfter dar. Das Wasser-Luftgemisch wird in einem Rohr vertikal nach unten geführt und erst dann wieder zur Oberfläche geleitet. Da der Sättigungswert des Sauerstoffes mit steigendem Druck zunimmt, wird zusätzlich dessen Uebergang ins Wasser begünstigt.

Dieses Verfahren eignet sich bei Fallhöhen unter 1 m und erfordert nur geringe Wartung. Bekannt ist auch die Möglichkeit, Wasser durch getochte oder geschlitzte, oder mit Düsen versehene Rohre über der Oberfläche zu versprühen. Der Sauerstoff gelangt durch die grosse Gesamtoberfläche aller Tropfen und durch die mitgerissenen Luftblasen am Wasserspiegel ins Wasser. Um ein Verstopfen zu vermeiden, passiert das Wasser vorher Grob- und Feinrechen. Auch bei diesen Anlagen stellt sich ein optimaler Nutzungseffekt nur bei beinahe gleichbleibendem Durchfluss ein.

Ergänzend seien kurz weitere Verfahren erwähnt, die an stehenden, tieferen Gewässern eingesetzt werden.

Nebst dem Einblasen von Luft in die tiefsten Schichten kann man auch mittels Pumpen oder vertikalachsiger Propeller den geschichteten Wasserkörper derart umwälzen, dass das sauerstoffarme Wasser gegen die Oberfläche hin aufsteigt, wo es in Kontakt mit der Atmosphäre oder einem zusätzlichen Belüfter gebracht wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch das Einleiten von kaltem Wasser in warme Zonen oder umgekehrt temperaturbedingte Dichteunterschiede zu erzeugen. Die so erzeugten Konvektionsströmungen vermögen das Wasser umzuschichten.

4.6.1 Tabelle ausgewählter weiterer Belüftungsverfahren

Verfahren	Ort	techn. Spezifikation	kg O <sub>2</sub> /h	kWh/kg O <sub>2</sub>	Bemerkung	Literatur
Sauerstoffgas	KW Neef Mosel	Tiefe Oberwasser mind. 2m, Filterkerzenroste Öffnungen 25 Mj, Blasen 2 bis 4 mm	282	2,14	0,26 DM/kg (Gesamtkosten 30 Betriebstage pro Jahr	Bundesanstalt f. Gewässerkunde 1976
Tiefwasserbelüftung	Rappode (Vorsperre) Falloren	Mischlüftheber (Schachtbelüfter) Tiefe 18 m	2,2 12,5	3,8 1,1 - 1,3		Klapper 1976 Bucksteeg e.a. 1978
Tiefwasserbelüftung	Wahnbachsperre	Steigröhr mit Diffusor + Steigröhr	120	1,2	0,13 DM/kg (Gesamtkosten)	Bernhardt 1978
Oberflächenbelüfter	Baldaney Einlauf KW	Kreisel	41	1,25	0,51 DM/kg (Gesamtkosten)	Imhoff, Wollf 19..
Versprühen	Lac du Bret Lausanne	gelohtes Rohr L = 10m, D = 300 mm, Wasser an horizont. Decke, dann Tropfen zurückfallend		4,68		Eckholt 1962
Filtermatte	(Klärtech.)	Tiefe 4 m	584	0,63		Eckholt, 1962
Oberflächenbelüfter	Passaic River			1,29		Raney e.a. 1973
Oberflächenbelüfter	Delaware River			1,89		Raney e.a. 1973
Diffusor		mech.		1,80		Irving 1974
Diffusor		-		0,85		Irving 1974



4.6.1 Tabelle ausgewählter weiterer Belüftungsverfahren (Fortsetzung)

Verfahren	Ort	techn. Spezifikation	kg O <sub>2</sub> /h	kWh/kg O <sub>2</sub>	Bemerkung	Literatur
Wasserstrahl-Luftsauger		H = 6,92 m, Q <sub>w</sub> bis 30 m <sup>3</sup> /s		1,47	C <sub>Anfang</sub> = 6,0mg/l	Dietrich
Feuerwehrspritze	Themsemündung			1,25	stark verschmutztes Wasser	Bernhardt 1978
Oberflächenbelüfter	Themsemündung	rot., eintauchendes Kegelrad		0,89	stark verschmutztes Wasser	Bernhardt 1978
Verdüsen	Themsemündung	Strahlen nach oben + zurückfallen		0,74	stark verschmutztes Wasser	Bernhardt 1978
Boxbelüfter	Themsemündung	Rohrbelüft. in Box, 3 m unter Wasserspiegel		0,17	(in Box) nicht allg.	Bernhardt 1978
Bürstenbelüfter	Klärttech.	Belüftbecken mit rot Tauchbürsten. Verstellbare Tauchwand		0,17-0,53	reines Wasser Bürsten min. Drehzahl, sonst Leerlaufenergie zu hoch	Hörler 1963
BSK Turbine	Klärttech.	vertikalachsiger Kegel mit Leberzahn an Oberfläche	4 bis 15	ca 15	Drehrichtung stossend oder schleppend	

## 5. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

### 5.1 Uebersichtstabelle

Turbinenbelüftung	ausgenutzte physikalische Parameter	Einfluss auf $\eta$ der Turbine	Einsatzort und -art	zusätzliche Installationen Kosteneinflüsse	nachträglicher Einbau	Wartung Betrieb
Ohne Luftbeigabe	Restturbulenz Unterwasser	$\emptyset$		$\emptyset$		
Luft bei Rechen	Druck, Verweilzeit Turbulenz	bis 2% Luftanteil ca. $\emptyset$	vor Fluss-KW Rohre	Gebälse o.ä. Druckregler lange Leitungen	rel. einfach	ev. Verstopfen
Luft Ueberdruckbereich nach Rechen	Druck, Verweilzeit Turbulenz	bis 2% Luftanteil ca. $\emptyset$	Einlauf Kaplan + Francis Einpressen	Kompressor Ventil Löcher Wandung	nur nahe Einlauf	häufiges Ein- und Ausschalten
Luft Laufraudebene und Saugrohr	Turbulenz	Abbau Saugrohrrückgewinn	Laufraudebene Saugrohr selbstsaugend	Zuleitungen Druckregler Stillstand Turb. bei Revision	nein	erschwert
Turbinenbelüftung	kWh/kg O <sub>2</sub>	Vorteile	Nachteile	zweckmässiger Einsatz		
Ohne Luftbeigabe	0	minime Belüftungswirkung im Unterwasser	ev. Aufwirbeln Bodenschlamm	-		
Luft bei Rechen	meist 1,0± 0,4 bei Kaplan und Francis turbinen	Turbine unberührt	rel. aufwendige zusätzliche Maschinen notwendig	bestehende Anlagen, vertikale Turbinen, damit keine Luft in Hochpunkten		
Luft Ueberdruckbereich nach Rechen	dito	gezielter Luftstrom gegen Lauftrad	dito + Dichtigkeit	neue horizontal- oder schrägachsige Turbinen		
Luft Laufraudebene und Saugrohr	dito	selbstsaugend	erschwerter Zugang für Einbau + Revision	eher Francis turb. (kleinerer Saugrohrverlust); Entwicklungsmöglichkeiten offen: Eingabestellen, Deflektoren		
alle: Wasserstrahl gefasst, Elektrizität Personel			alle: an Fixpunkt im Flusslängenprofil gebunden, abhängig Zufluss			

## 5.1 Uebersichtstabelle (Fortsetzung)

Verfahren	ausgenutzte Parameter	zusätzliche Installationen Kosteneinflüsse	Wartung Betrieb	kWh/kg O <sub>2</sub>	Vorteile	Nachteile	zweckmässiger Einsatz
Druckluftbelüftung	Druck, Wassertiefe, Verweilzeit (Diffusion)	Kompressor Leitungen Ventile Filter (Flosse)	Verstopfung	1,20-3,45	mobil, störbar, stören KW-betrieb nicht	Installationskosten Unterhalt, Hindernis Schifffahrt	stehende und fließende Gewässer, möglichst kanalisiert Tiefe über 1-2 m
Wehre, Ueberfälle							
bewegliche Wehre	Fallhöhe Strahlaufrissen	keine Inst. Wasserverlust		2,6 ± 0,4	regulierbar		Schiffahrtskanäle
feste Ueberfälle	Fallhöhe Turbulenz	keine Inst. Wasserverlust wenn KW	∅	ca. 1,6 (Modell ab 0,5)	kein Unterhalt	nicht regulierbar bei kleinem Zufluss weniger wirksam	Belüftung Kühl- oder gereinigter Abwasserstrahl
Kaskaden Sohlstufen	Turbulenz	-	∅	0,85-1,1	guter O <sub>2</sub> -Eintrag, kein Unterhalt	nicht regulierbar, grosse Breite	ungestaute Flussabschnitte, Fallhöhen ab ca 30 cm, nicht nur konstanter Zufluss
Oberflächenbelüfter	Turbulenz Wassertröpfenoberfläche	Walzen Kreisel, Wurf-schaufeln, Pumpen etc. Aufhängung	Treibgut	0,3-1,5	mobil, dosierbar	Lärm, Schaum Hundernis Schifffahrt nur kleinräumig	Stellen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit (Oberfläche) und grosser O <sub>2</sub> -Zehrung. Tiefe ca 1,5 bis 5 m

## 5.1 Uebersichtstabelle (Fortsetzung)

Verfahren	ausgenutzte Parameter	zusätzliche Installationen Kosteneinflüsse	Wartung Betrieb	kWh/kg O <sub>2</sub>	Vorteile	Nachteile	zweckmässiger Einsatz
Versprühen	Fallhöhe Tropfenoberfläche	Rechen, Siebe Pumpen, Zuführungen	Verstopfen	0,75-4,70	mobil, dosierbar lokal intensiv	Fallhöhe nicht variabel	hohe Fallhöhe, ca. konst. Zufluss (Kühlwasser)
Diffusor Venturi	Druck Turbulenz	Pumpen, Leitungen, Rechen Filter	gering	1,3-0,5	mobil, örtlich gut wirksam	für kleine Wassermengen und Flächen Lärm	Kühl-, Abwasser auch bei geringer Fallhöhe, konstanter Zufluss
Schachtbelüfter	Druck, Aufenthaltszeit	Pumpen, Rohre ev. Rechen	gering	1,3-3,8	kleiner Platzbedarf lokal sehr wirksam	eher lokale Wirkung, Lärm, Schwebstoffablagere- nung in Rohr	geringe Fallhöhe wenig Platz
reiner Sauerstoff	Druck Verweilzeit Löslichkeit	Lager, Tanks Leitungen Ventil etc	Problem Dosierung	(2,1)	guter O <sub>2</sub> - uebergang (Turbinen- wirkungsgrad nicht beein- flusst)	teuer	bei kleinem Zufluss und kurzer Einsatzzeit "Notfälle"

## 5.2 Vergleich der Systeme zur Flussbelüftung

Das vorstehende Kapitel 5.1 enthält eine tabellarische Gegenüberstellung der beschriebenen Belüftungssysteme. Nebst dem Leistungsvergleich ( $\text{kWh/kg O}_2$ ) werden auch physikalische und betriebliche Einflüsse stichwortartig aufgeführt. Die Abwägung der Vor- und Nachteile ermöglicht es schliesslich, die sinnvollen Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Belüftungsmethoden näher abzugrenzen.

### 5.2.1 Vergleich bezüglich der Eintragsleistung: $\text{kWh/kg O}_2$

Es erstaunt eigentlich nur wenig, dass die aus der Klärtechnik stammenden Oberflächenbelüfter das günstigste Verhältnis zwischen aufzuwendender Leistung in kWh pro eingetragenen Sauerstoff in  $\text{kg O}_2$  aufweisen. Sie erreichen Werte von 0.3 bis 1.5  $\text{kWh/kg O}_2$ . Die weiteren, ebenfalls eher kleinräumigen Verfahren wie Versprüher, Venturirohre oder Diffusoren etc. weisen recht grosse Streuungen der entsprechenden Werte auf und müssen demnach fallweise den zu erwartenden Randbedingungen möglichst subtil angepasst werden können.

Von Interesse ist nun, dass die Methode der Turbinenbelüftung mit ca.  $1.0 \pm 0.4 \text{ kWh/kg O}_2$  bereits an zweiter Stelle dieser Betrachtung erscheint. Es zeigt sich hierbei einmal mehr, dass die Systeme, welche vorwiegend die Strömungsturbulenz ausnützen, die besten Wirkungsgrade erzielen. Von diesen Verfahren schneiden dann diejenigen Anlagen am besten ab, welche bei höheren Sauerstoffdefiziten getestet wurden.

Etwas schlechtere Resultate ergibt die vorwiegend auf Diffusion beruhende Druckluftbelüftung. Ihr Vorteil liegt nicht zuletzt bei der Mobilität.

Wehre und Ueberfälle sind stark von der auf den Zufluss abgestimmten Formgebung der Ueberfallkrone sowie von der Ausbildung des Unterwassers

abhängig. Wie ersichtlich, können - meist bei Versuchswehren - Spitzenwerte des Sauerstoffaufnahmewirkungsgrades erzielt werden. Liegt aber im praktischen Betrieb etwa der Aufreisspunkt zu hoch, oder passt sich die Gerinneform im Unterwasser nicht der Blaseneintauchtiefe an, so ergeben sich an festen Wehren und Kaskaden sehr bald ungünstigere Resultate.

Zur Flussbelüftung mit reinem Sauerstoff liegen nur wenige Daten vor. Die Methode ist aus der Klärtechnik bekannt und wird in neuerer Zeit vorwiegend im Zusammenhang mit tiefen, stehenden Gewässern untersucht.

#### 5.2.2 Vergleich bezüglich der Wasserführung

Kritische Sauerstoffverhältnisse treten bei Niedrigwasser oder bei stark änderndem Zufluss auf. Nicht alle Belüftungssysteme, die von der Eintragsleistung oder von den Gesamtkosten her favorisiert sind, vermögen aber diesen natürlichen Gegebenheiten in gleichem Masse zu genügen. Das billigste System, der feste Wehrüberfall, erzielt nur bei einer bestimmten Wassermenge seine optimale Wirkung auf den Sauerstoffeintrag. Da er kaum für Niedrigwasser ausgelegt ist, liegt sein Anwendungsgebiet eher bei regulierbaren, ziemlich konstanten Zuflüssen aus den Kühlanlagen von thermischen Kraftwerken oder aus den Nachklärbecken von Kläranlagen.

Das bewegliche Wehr könnte zwar an sich dem Zufluss angepasst werden, normalerweise ist es aber nach anderen Gesichtspunkten konzipiert.

Die Turbinenbelüftung ist bereits etwas anpassungsfähiger. Bei kurzzeitig schwankendem Zufluss oder bei geringer Wasserführung kann aber normalerweise nicht gemäss den Bedürfnissen der Bewässerungsbelüftung turbiniert werden.

Eine erhöhte Elastizität weist die Druckluftbelüftung auf. Es ist aber

darauf zu achten, dass die Anlagen nicht derart konzipiert sind, dass bei Niedrigwasser die Wassertiefe und damit die Verweilzeit der Luftblasen zu gering wird (nicht unter ca. 2 m). Da die Druckluftbelüfter für eine bestimmte Poren- oder Filtergrösse ausgelegt werden, sind der Anpassungsfähigkeit auf starke Abflussschwankungen aber auch gewisse Grenzen gesetzt.

Vor allem bei kleinem Zufluss kann die Verwendung von Oberflächenbelüftern durchaus angezeigt sein. Mit steigender Wassermenge nimmt deren Wirksamkeit am Wasserspiegel der erhöhten Oberflächengeschwindigkeit wegen zwar zu, gleichzeitig verringert sich aber die Tiefenwirkung bei ansteigendem Wasserstand derart, dass dieses Verfahren bei starker Wasserführung meist wieder hinter den anderen Methoden zurücksteht.

Wenn man hohe Anpassungsfähigkeit auf rasch ändernde Wasserstände und gleichzeitig intensive Wirkung bei Niedrigwasser oder anderen Sauerstoffengpässen erzielen will, so ist eine Kombination zweier verschiedener Verfahren nicht völlig auszuschliessen. Eine Möglichkeit bestünde etwa darin, im Oberwasser eines Ueberfallwehres zusätzlich ein Venturirohr oder ein Oberflächenaggregat einzusetzen.

### 5.2.3 Vergleich bezüglich des Einsatzortes

Belüftete Turbinen und Wehre sowie Kaskaden sind ortsgebunden. Sie erzielen dann die besten Eintragsraten, wenn sie den gesamten kanalisierten Abfluss erfassen. Demgegenüber sind Druckluftbelüfter, reine Sauerstoffanlagen oder die verschiedenen Arten von Oberflächenbelüftern im Prinzip mobil und können vor allem bei sehr langen Stauhaltungen örtlich viel gezielter eingesetzt werden. Gut denkbar ist auch eine Kombination von stationärer Turbinenbelüftung und mobiler Oberflächen- oder Druckluftbelüftung.

#### 5.2.4 Stellung der Turbinenbelüftung bezüglich der anderen bekannten Verfahren

---

Die Durchsicht und Gegenüberstellung gemessener Werte ergibt, dass die Turbinenbelüftung zu den wirksamsten Verfahren gehört. Es ist aber nicht ausser acht zu lassen, dass die recht hohen Wirkungsgrade der Sauerstoffaufnahme für denjenigen Wassermengenbereich gelten, für den die Anlagen ausgelegt waren. Das Einsaugen von Luft im Unterdruckbereich erfordert zwar weniger zusätzliche Einrichtungen, ist aber recht stark von der Turbinierwassermenge abhängig. Gibt man Luftblasen vor dem Einlauftrichter ein, so lässt sich die Flexibilität der Gesamtbelüftung erhöhen. Dies allerdings auf Kosten vermehrter Installationen.

Es kann allgemein gesagt werden, dass umfassende Kenntnisse der Sauerstoff- und BSB<sub>5</sub>-Ganglinien u.a. umso wichtiger sind, je stärker ein Belüftungssystem an gewisse Zuflussmengen gebunden ist. Deshalb wird man kaum das Verfahren der Turbinenbelüftung wählen können, wenn nicht mehrjährige, systematische Messreihen über die Wasserquantität und -qualität vorliegen. Die alleinige Flussbelüftung mittels Turbinen kann in folgenden Fällen als kritisch angesehen werden:

1. Bei stark verschmutzten Gewässern, die sich im labilen Gleichgewicht zwischen aerobem und anaerobem Zustand befinden, da der Turbinenbetrieb nicht Rücksicht auf wechselnde Beleuchtungs- und Temperaturverhältnisse nehmen kann.
2. Bei sehr hohen Sauerstofferfordernissen besonderer Fische. Es besteht die Gefahr, dass sich Salmoniden wie Forellen, Lachse u.a. unterhalb der Turbine sammeln und bei stillstehenden Turbinen den jähen Sauerstoffabfall nicht überleben.
3. Bei häufigem, für den Fluss als Vorfluter und Fischgewässer kritischem Niedrigwasser, weil dann nicht turbiniert wird.



4. Bei stossweisem Einleiten von entlüftetem und erwärmtem Kühlwasser oder von ungereinigtem Abwasser. In diesen Fällen ist eine vorhergehende Sauerstoffanreicherung dieser Zuflüsse angezeigt.

Sieht man von den aufgeführten Einschränkungen ab, so verbleiben durchwegs nennenswerte, teilweise bereits erprobte Verwendungsmöglichkeiten der Turbinen als Belüftungselemente bestehen. Man nimmt an, dass eine Luftbeigabe bis zu 2 % bezüglich des Wasservolumens ohne wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Turbinen ist. Man verwendet ja bereits heute Luftblasenströme zur Regulierung der Laufruhe und zur Bekämpfung der Kavitation.

## 6. AUSBLICK AUF WEITERE ENTWICKLUNGSMOEGlichkeiten

Von den in diesem Bericht behandelten Systemen scheinen am ehesten die Turbinenbelüftungsanlagen und die Oberflächen- oder Tiefwasserbelüfter grundsätzlich weitere Entwicklungsmöglichkeiten zu bieten. Da die letzten beiden Verfahren eher dann zu Neuentwicklungen führen, wenn ganz bestimmte, meist unveränderliche und örtlich begrenzte Randbedingungen vorliegen, wird in der Folge nicht weiter darauf eingegangen.

Bezüglich der Weiterentwicklung und -anpassung der Turbinenbelüftung ergeben sich etwa nachstehende, unter 6.1 bis 6.5 aufgeführte Stossrichtungen.

### 6.1 Testen weiterer Eingabestellen

Schon die Betrachtungen in Kapitel 4.1.3 eröffnen die Möglichkeit, dass rein aus der Sicht der Grenzflächenerneuerung, Durchmischung und

auch Verweilzeit der einzelnen Luftblasen eine Beigabe im Ringspalt und aus den rotierenden Turbinenschaufeln heraus einen erhöhten Wirkungsgrad der Sauerstoffaufnahme oder entsprechend einen reduzierten Luftbedarf zur Folge haben könnte. Die Fragen nach Drehstabilität der rotierenden Teile, nach lokalen Druckschwankungen auf Turbine und Gehäuse oder nach der Regulierung der Luftzufuhr wären vom Maschinenbauer zu beantworten. Da der Luftblasen wegen keine Modellähnlichkeit erzielt werden kann und sich damit die Verwendung von Modellturbinen nicht anbietet, sind Versuche an Naturturbinen erforderlich.

#### 6.2 Systematische Untersuchungen über Laufruhe, Eigenfrequenzen, Wirkungsgradänderungen, Kavitation und Rost

---

Die gängige Angabe, dass der Turbinenwirkungsgrad bis zu einer Luftzufuhr von 2 % nur unwesentlich verändert werde, ist sehr pauschal. Bestimmt ergeben sich bei exakten in situ Messungen wesentliche Unterschiede bezüglich Maschinentyp und Eingabestelle. Dasselbe gilt auch für Laufruhe und Kavitationsgrenzen.

#### 6.3 Feineres Anpassen bekannter und neuer Luftzufuhrsysteme an die verschiedenen Turbinentypen

---

In der Literatur sind lediglich einige ausgeführte Einzelfälle von Turbinenbelüftungsanlagen beschrieben. Man ist aber weit von einer Systematik entfernt, welche die Art der Luftzuführung mit dem Turbinentyp in Verbindung bringt. Versuche und Messerien an einer Francis-, Kaplan- und Rohrturbine würden einen wesentlichen Schritt weiterführen.

#### 6.4 Quantitative Angaben, welche Randbedingungen ein bestimmtes Turbinenbelüftungsverfahren technisch ausschliessen oder unwirtschaftlich erscheinen lassen

---

Turbinenbelüftungsverfahren sind innerhalb gewisser Grenzen relativ anpassungsfähig. Diese Grenzen können wohl schon zum heutigen Zeitpunkt vom Turbinenhersteller, gemeinsam mit dem Energieproduzenten, abgesteckt werden. So kann aus den Ganglinien über Gewässerqualität und -quantität die jährliche Belüftungszeit und die Anzahl zusätzlicher Ein- und Ausschaltvorgänge sowie etwa mögliche Unterbrüche für Revisionen abgeschätzt werden. Dasselbe gilt für die Kosten zusätzlicher Installationen. Je nach den Relationen zwischen Gewässerqualität und minimaler Anforderung an den Sauerstoffgehalt oder zwischen Zufluss und turbinierter Wassermenge können sich zum voraus geeignetere Stellen zur Sauerstoffanreicherung als die Sperrstellen der Flusskraftwerke ergeben.

#### 6.5 Suchen von Kombinationsmöglichkeiten mit Zweitsystemen

Ergibt sich, dass eine bereits bestehende oder eine projektierte Turbinenbelüftung gewissen Sauerstoffengpässen nicht gerecht wird, so wäre es an sich denkbar, eine Zweitanlage ins Auge zu fassen. Als Ausgleich zur örtlich gebundenen Turbinenbelüftung könnte eine mobile Druckluft- oder Oberflächenbelüftungsanlage ins Auge gefasst werden. Diese Zweitanlagen würden kleinräumig, beispielsweise in natürlichen Fischesammelbecken oder im Oberwasser einer Sperre, über kurze Zeit eingesetzt. Die Wirtschaftlichkeit kann deshalb interessant sein, weil diese Zweit- oder Reservebelüfter nur für eng begrenzte Randbedingungen ausgewählt werden können, und weil sie vor allem dann eingesetzt werden können, wenn die Turbinenbelüftung bereits unrationell arbeiten würde.

In diesem Zusammenhang sei auch noch auf die mögliche Kombination von Turbinen mit reiner Sauerstoffbelüftung hingewiesen.

ALPHABETISCHES LITERATURVERZEICHNIS

- Abw.techn.Vereinigung "Abwassertechnik" Band I  
Verlag Wilhelm Ernst und Sohn 1973
- Albrecht D. "Belüftung des Ruhrwassers am Wehr  
Spillenburg"  
Wasserwirtschaft 1968 H.11 S.317
- Albrecht A. "Belüftungsversuche mit frei abstürzendem  
Wasser"  
gwf 1971 H.1 S.29
- Albrecht,Imhof "Erfahrung mit der künstlichen Ruhrbelüftung"  
gwf H.3 1973 S.131
- Albrecht,Imhof "Einfluss des Wetters auf die biogene  
Sauerstofferzeugung und Veratmung in der  
stauregulierten Ruhr"  
gwf H.2 1978 S.60
- Amberg,Wise "Stream Aeration with Tonnage Oxygen"  
Appl.of commercial oxygen Symposium  
Nr.6 1973 S.311
- Apted,Novak "Some Studies of Oxygen Uptake at Weirs"  
XV IAHR Kongress 1973 Vol.2 S.177
- ATV "Die künstliche Belüftung von Oberflächen-  
gewässern"  
Arb.blatt AW 161 Jan. 1971 ZfGW-Verlag  
Frankfurt
- Avery,Novak "Oxygen Transfer at Hydraulic Structures"  
J.Hydr.Div. Nov. 1978 S.1521
- Barret,Gameson,Ogden "Aeration Studies at four Weir Systems"  
Water and Water Eng. Sept. 1960 S.407
- Bernhardt H. "Die hypolimnische Belüftung der  
Wahnbachtalsperre"  
gwf 1978 H.4 S.177
- Böhnke B. "Erfassung des Sauerstoffhaushaltes über  
grosse Flussstrecken sowie der Sauerstoff-  
ergänzung über der Wasseroberfläche"  
Vortrag Lippeverband

- Böhnke B. "Die rechnerische Erfassung des Sauerstoffgehaltes eines Gewässers"  
TH Hannover Siedl.wasserwirtschaft H.20 1965
- Brauer,Schmidt-Traub "Flüssigkeitsbegasung mit Rührern"  
Chem.Ing.Techn. 1972 H.23 S.1320
- Bucksteeg,Hollfelder "Versuche zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Gerätes zur Tiefenwasserbelüftung"  
gwf 1978 H.2 S.65
- Budd,Okun "Pure Oxygen revisted"  
Appl.Commercial Oxygen Austin(Texas)1973 S.127
- Bundesanstalt für Gewässerkunde "Untersuchungen über die technischen Möglichkeiten der Gewässerbelüftung"  
Teilbericht I: Versuche zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes der Mosel mit Sauerstoffgas am Wasserkraftwerk Neef"  
Koblenz,Dez. 1976
- Carver Ch. "Absorbtion of Oxygen in Bubble Aeration"  
Biol.Treatm.Sew. and Ind.Wastes Vol.I 1965 S.160
- Christen H.R. "Chemie"  
Sauerländer Verlag 1962
- Churchill M. "Effect of Water Temperatur on Stream Aeration"  
J.San.Eng.Div.ASCE Vol. 87 Nov. 1961 S.59
- Dietrich K.R. "Künstliche Belüftung von Gewässern durch Turbinen- und Wasserstrahlluftsauger"  
STZ Nr. 22 30.Mai 1963
- Dobbins W.E. "Mechanism of Gas Absorbtion by Turbulent Liquids"  
Int.Conf. Water Pol. Research London 1962 Pergamon Press
- Downing,Truesdale "Some Factors affecting the Rate of Solution of Oxygen in Water"  
J.appl.Chem 5 Okt. 1955
- Eckoldt M. "Die künstliche Belüftung der Flüsse"  
DGM 1/1962 S.1
- Eckoldt M. "Erprobung des Verfahrens zur künstlichen Flusswasserbelüftung nach R. von Wolff ..."  
gwf Heft 36 9.Sept. 1966 S 1034

- Erni,Ruchti "Der Sauerstoffgehalt von Fließgewässern .."  
Schweiz.Z.Hydrol.2/1977 S.261
- Ervine D.A. "The Entrainment of Air in Water"  
Water Power Dez.1976 S.27
- Fast e.a. "Hypolimnetic Oxygenation using Liquid  
Oxygen"  
Water Res.Research Vol.11 Nr.2 April 1975  
S.294
- Fast,Dorr,Rosen "A submerged Hypolimnion Aerator"  
Water Resources Research 1975  
Vol.11 Nr.2 S.287
- Federal Water Pollution Control Administration "Tracer Measurement of Stream Reaeration"  
U.S. Department of the Interior Washington D.C. Juni 1967
- Fortescue,Pearson "On Gas Absorbtion into a turbulent Liquid"  
Chem.Eng.Sc. Vol.22 1967 S.1163
- Fürst,Nitsch "Zur Frage des Grenzflächenwiderstandes bei  
der physikalischen Gasabsorbtion"  
Ing.Techn. H.3 1970 S.108
- Gameson A. "Weirs and the Aeration of Rivers"  
J.Inst.of Water Engineers, London 1957 S. 477
- Grindrod J. "British Research on Aeration at Weirs"  
Water and Sewage Works Okt.1962
- Günther e.a. "Sauerstoffmessgerät für Kontrollaufgaben  
in der Wasserwirtschaft"  
wvt April 1978 S.122
- Haekal H. "Das Verhalten von Luftblasen in fließendem  
Wasser unter besonderer Berücksichtigung der  
Strömung in Spalten"  
Diss. TU Berlin 29.11.1962
- Hameson A. "Weirs and the Aeration of Rivers"  
I.W.E.1957 S.477
- Hohlweg,Thron "Versuche zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes  
der Mosel mit Sauerstoffgas am Wasserkraft-  
werk Neef"  
DGM 21. 1977 H.4 S.86

- Holler A.G. "The Mechanism of Oxygen Transfer from the Atmosphere to Discharge of Hydraulic Structures"  
Proc. XIV IAHR Congress 1971 S. 373
- Hörler A. "Allgemeine Betrachtungen zum Vergleich von Belüftungssystemen"  
VSA Verb.Bericht 81/1 Nov. 1963
- Hsu,Wang,Fan "Oxygen Transfer and Absorbtion"  
Water and Sewage Works Feb.1975 S.34
- Hutarew A. "Beitrag zur Beeinflussbarkeit des Sauerstoffgehaltes in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren"  
TU Stuttgart Inst. Wasserbau Mttg. 41
- Hutarew H. "Möglichkeiten zur Verbesserung des Sauerstoffeintrages an Absturzbauwerken"  
Wasserwirtschaft 1978 H.3 S.76
- Hutarew,Minor "Oxygen Uptake of a free overfalling Water Nape"  
IAHR Kongress 1973 S 338
- Hutarew, Topal-Gökceci "Sauerstoffeintrag an festen Ueberfallwehren"  
Mttg. TU Stuttgart Inst.Wasserbau Nr. 35
- Imhoff K. "Taschenbuch der Stadtentwässerung"  
19.Aufl. R.Oldenburgerverlag
- Imhoff K. "Wie berechnet man eine künstliche Gewässerbelüftung"  
gwf Mai 1969 S. 543
- Imhoff R. "Sauerstoffhaushalt und künstliche Wiederbelüftung im Bereich des Baldeneysees und der Ruhr"  
gwf 34/1968 1968
- Imhof,Albrecht "Zum Einfluss von Temperatur und Turbulenz auf den Sauerstoffeintrag im Wasser"  
gwf 1/1972 S.264
- Jarvis P.H. "A Study in the Mechanics of Aeration of Weirs"  
Diss. University New Castle,England 1970
- Jost,Hauffre "Diffusion"  
Steinkopff Verlag Darmstadt 1972

- Kahlert A. " ... ein Beitrag zur Berechnung der Sauerstofflinie"  
gwf 20/1964 S.540
- Kalman L. "Ein neues Verfahren für die Berechnung des Sauerstoffeintrages bei Belebtschlammanlagen"  
GWA 12/1976 S 683
- Karasik e.a. "Study of the Operation of Water Aerators"  
Inst.Hydrobiology Kiev Feb. 1971
- Kenn,Zanker "Aspects of Similarity for Air entraining Flows"  
Nature Jan.1967 Nr.5071
- Kayser,Stegmann "Sauerstoffeintrag an Wehren mit geringen Beaufschlagungen"  
Wasser und Boden Nr.2 1975 S. 21
- Klapper H. "Einsatz der Belüftung zur Gesunderhaltung stehender Gewässer-Literaturübersicht"  
Acta Hydrochim. Hydobiol. 4/1976 S.287
- Knöpp H. "Die zusätzliche Zehrung, eine neue biochemische Kennzahl ..."  
gwf 1964 Heft 4 S.92
- Kobus H. "Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Luftschleier im Wasserbau"  
Wasser und Abwasser Nr.7 Schmitd Verlag
- Kobus H. "Untersuchungen über die Verminderung der besonders sinkstoffreichen Dichteströmung in Brackwassergebieten durch Luftblasenschleier"  
Mttg.Vers.anst.Wasserbau Berlin H.50 1969
- Koch R. "Bedeutung und Anwendung der Flusswasserbelüftung"  
WWT 12/1974 S.401
- Kolbe F. "Artificial Oxygen Regeneration at Goreangab Dam"  
Die Siviele Ingenieur Suid-Africa Jan.1964 S.5
- Kuz D. "Ueber die im Wasser gelösten Gase und ihre quantitative Bestimmung"  
TU Stuttgart Inst.Wasserbau Mttg. 21



- Lewis,Whitemann "Principles of Gas Absorbtion"  
Ind. and Eng.Chem.Vol 16 1924 S. 1215
- Londong D. "Ueber den Sauerstoffeintrag an freien  
Ueberfällen"  
Diss. 82 Aachen 1973
- Maise G. "Scaling Methode for Surface Aerators"  
J.San.Eng.Div.ASCE Okt.1970 S.1079
- Mancy,Okun "The Effects of Surface Active Agents on  
Aeration"  
J. WPCF Feb. 1965 S. 212
- Manczak H. "Verbesserungen der Sauerstoffverhältnisse  
eines Gebirgsbaches mittels Sohlenabstaffelung"  
Oesterr.Wasserwirtschaft 1964 H.9-10 S.211
- Mann H. "Die biologische Bedeutung der Oberflächen-  
spannung"  
Wasser und Abwasserforschung 1971 H.5 S. 151
- Mayer R. "Die Staustufe Poppenweiler der Neckarkana-  
lisierung"  
Zeitschr. Binnenschifffahrt Nr. 4 1957 S 130
- Mueller e.a. "Gas Transfer Kentics and Interactions of a  
pure Oxygen System"  
Appl.Commercial Oxygen Austin(Texas) 1973 S.106
- Nakasone H. "Derivation of Aeration Equation ..."  
Trans. J.S.I.D.R.E. 1975 S. 42
- O'Connor D.J. "The Mechanism of reaeration in natural  
Streams"  
J.San.Eng.Div. ASCE 1956 S. 1115
- Pasveer A. "Research on Oxygenation with Air Bubbles"  
Sewages and Ind. Wastes Vol.27 1955 S 1130
- Pasveer,Sweeris "A new Development in Diffused Air Aeration"  
J.Wat.Pol.Control Federation 37, 1965 S. 1267
- Peebles,Garber "Studies on the Motion of Gas Bubbles in  
Liquids"  
Chem.Eng.Progress 1953 S.88
- Raney D.C. "Experimental Measurement of Base Pressure  
Coeff. for Deflektor Plates with Air  
injected to the Wake Region"  
BER Report Tuscaloosa Sept. 1973

- Raney D.C. "Turbine Aspiration for Oxygen Supplementation"  
J.Env.Eng.Div. April 1977 S. 341
- Raney,Arnold "Dissolved Oxygen Improvement by Hydroelectric  
Turbine Aspiration"  
J.Power Div. Mai 1973 S.139
- Reisig,Wieting "Beziehungen zwischen Turbulenz in einem  
Rührbehälter und Sauerstoffeintrag an der  
Wasseroberfläche"  
WWT 1/1976 S.30
- Rinaldi e.a. "Optimal Allocation of artificial Instream  
Aeration"  
J.Env.Eng. Feb. 1978 S.147
- Ruane,Viander "Oxygenation of Turbine Discharges from  
Fort Patrick Henry Dam"  
Appl.Commercial Oxygen Austin(Texas) 1973  
S. 291
- Seelinger R. "Gasblasen in Flüssigkeiten"  
Naturwissenschaften 1949 S. 41
- Sidwick e.a. "An Economic Study of the Unox and  
Conventional Aeration Systems"  
Water Pol.Control 1975 H.6 S.645
- Silver,Jaszlics "An Approach to Cost-Effective Design of  
Secondary Treatment Plants Using Pure  
Oxygen"  
Appl.Commercial Oxygen Austin(Texas) 1973  
S.189
- Schmassmann H.J. "Untersuchungen über den Sauerstoffhaushalt  
fliessender Gewässer"  
Schweiz. Zeitschr. Hydrologie XIII 1951 S.300
- Schröder R. "Energiedissipation und Turbulenzmechanismus  
im freien Wechelsprung"  
Wasserwirtschaft 1964 H.2 S. 133
- Stalman V. "Die BSK-Turbine, ein Belüftungssystem der  
Abw.techn."  
gwf Juni 1965 H.22 S.613
- Streeter H.W. "Measures of Natural Oxydation in Polluted  
Streams"  
Sew.Works J. 1935 Heft 7 S 251/534

- Streeter, Phelps "Studies of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River"  
U.S. Public Health Bulletin 1925 Nr. 146
- Tebbutt, Essery "Reaeration Performance of Stepped Cascades"  
J. Inst. Water Eng. and Scientists  
Vol. 31 Nr. 4 1977
- Trüeb U. "Betrachtungen über die Veränderung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser als Folge von Flusstau und Temperaturerhöhung des Flusswassers"  
gwf 9/1971 S. 433
- Truesdale, Downing, Lowden "Tabellen zur Ermittlung der Sauerstoffsättigung"  
J. Applied Chemistry Feb. 1955
- Truesdale, Downing, Lowden "The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea-Water"  
J. appl. Chem. 5 Febr. 1955
- Upmalis A. "Belüftung von Gewässern"  
gwf 1975 H. 1 S. 13
- Vielstich W. "Der Zusammenhang zwischen Nerstischer Diffusionsschicht und Prandtlischer Strömungsgrenzschicht"  
Zeitschr. Elektrochemie 1953 H. 8 S. 646
- Vigander, Ruane "Oxygenation System Development for Turbine Discharge Aeration"  
IAHR Kongress 1973
- Volkart P. "Die Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme"  
Mtg. Nr. 30 1978 Versuchsanstalt für Wasserbau VAW ETH Zürich (Eigenschaften Luftblasen)
- Wagner H. "Die Verwendung von Turbinen zur Belüftung und Sauerstoffanreicherung von Flusswasser"  
Voith Forschung, Konstruktion 1955 Heft 1
- Wagner H. "Die künstliche Belüftung kanalisierter Flüsse"  
Mitg. Dtsch. Gew. Kdt. Jahrb. Nr. 15 1956
- Wagner H. "Versuche mit der künstlichen Flusswasserbelüftung"  
Voith Forschung, Konstruktion Nov 1958 Heft 4

- Whipple e.a. "Instream Aeration of Polluted Rivers"  
Water Res. Research Inst New Jersey Aug. 1969
- Wieting e.a. "Erste Erfahrungen mit der Venturibelüftung  
in der Binnenfischerei"  
WWT 10/1978 S.343
- Wilderer, Hartmann "Der Einfluss der Temperatur auf die  
Lösungsgeschwindigkeit von Sauerstoff in  
Wasser"  
gwf 26/1969 S.707
- Wisniewski T.F. "Improvement of the Quality of Reservoir  
Discharges through Turbine of Tailrace  
Aeration"  
Symp. U.S. Publ. Health Service Juni 1965
- Wisniewski, Scott "Hydro-Turbine Aeration of Rivers with  
supplemental Data on Cascades Aeration"  
Pulp and Paper Mag. of Canada Feb. 1960 S T46
- Wolff P. "Die Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse  
in Sauerstoffhaushaltsberechnungen für  
Fließgewässer"  
gwf 4/1971 S.200
- Zieminski e.a. "Mechanical Reaeration to Increase  
Reoxygenation"  
Pulp and Paper Magazine of Canada Feb. 1960  
S.53