

### XIII. MÖGLICHKEITEN DER GEWÄSSERBELÜFTUNG

von

H. Kobus

#### 1. EINLEITUNG

Kühlwassereinleitungen in Gewässer können nachhaltige Veränderungen der Sauerstoffverhältnisse bewirken. Dieser Effekt macht sich besonders bei Flüssen mit hoher Schmutzbelastung und entsprechend niedrigem Sauerstoffgehalt nachteilig bemerkbar. Temperaturerhöhungen bewirken erhöhte biologische Abbauraten und damit erhöhten Sauerstoffverbrauch, während andererseits dem natürlichen Sauerstoffeintrag an der Gewässeroberfläche von der Natur Grenzen gesetzt sind. Die Erhaltung einer ausreichenden Wasserqualität erfordert (unter anderem) die Einhaltung eines Mindest-Sauerstoffgehalts im gesamten Gewässer: Bei starker Verschmutzung und Temperaturbelastung kann es daher erforderlich werden, ein Gewässer künstlich mit Sauerstoff anzureichern. Im vorliegenden Beitrag werden die verschiedenen technischen Methoden der künstlichen Sauerstoffanreicherung behandelt und die Grundsätze für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens aufgezeigt.

#### 2. GESETZMÄSSIGKEITEN DES SAUERSTOFFEINTRAGS

Solange die Sauerstoffkonzentration  $c_0$  im Wasser unter dem Sättigungswert  $c_s$  (Gleichgewichtszustand mit der Atmosphäre) liegt, findet an den freien Oberflächen Sauerstoffeintrag statt. Nach dem ersten Fick'schen Gesetz ist die pro Zeiteinheit eingetragene Masse proportional der Oberfläche und dem Konzentrationsgradienten:

$$\frac{\partial m(\text{O}_2)}{\partial t} = - D_m \cdot F \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \quad (1)$$

Der Vorgang kann als ein aus zwei Teilen bestehender Prozeß betrachtet werden: die Diffusion durch die Grenzfläche hindurch, und die Diffusion im Gewässer selbst. Ein Vergleich der relevanten Diffusionskoeffizienten zeigt, daß der geschwindigkeitslimitierende Faktor stets der Abtransport des gelösten Sauerstoffs im Wasser von der Grenzfläche weg ist. Die Diffusion durch die Oberfläche verläuft hierzu vergleichsweise so rasch, daß dort stets die Sättigungskonzentration  $c_s$  angenommen werden kann (Bild 1).

Für Ingenieurbetrachtungen kommt üblicherweise eine auf Gleichung (1) basierende Beziehung der Form

$$\frac{dm(\text{O}_2)}{dt} = K \cdot F \cdot \left( \frac{c_s - c_0}{c_s} \right) \quad (2)$$

zum Ansatz, wobei der Beiwert  $K$  [ $\text{g O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ] als "Wiederbelüftungskoeffizient" bezeichnet wird. Nach dieser Beziehung ist der Sauerstoffeintrag direkt proportional der Grenzfläche  $F$  und dem Sauerstoffdefizit  $(c_s - c_0) / c_s$ .

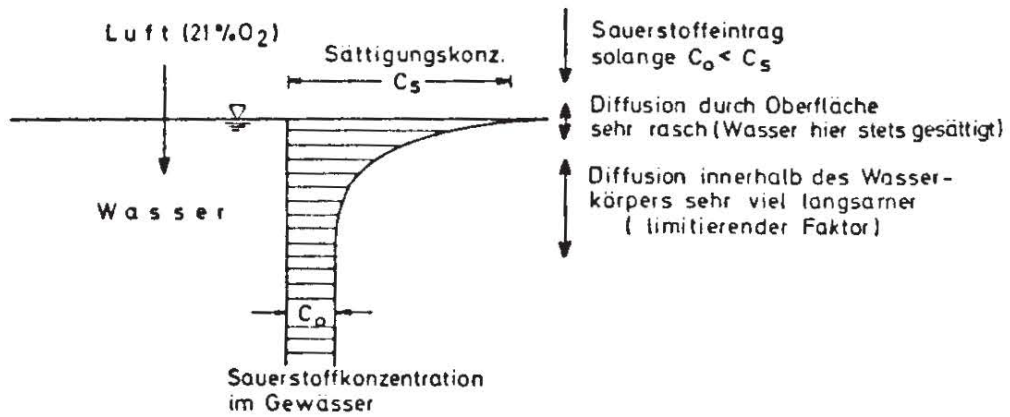


Bild 1  
Definitionsskizze

Der Wiederbelüftungskoeffizient  $K$  wird in erster Linie von den Turbulenzverhältnissen im Wasser bestimmt. Belüftungsverfahren zielen demzufolge darauf ab, möglichst viele Grenzflächen zu schaffen (kleine Blasen oder Tropfen) und durch turbulente Durchmischung für eine ständige, rasche Erneuerung der Grenzfläche zu sorgen.

Die Sättigungskonzentration  $c_s$  für Sauerstoff in Wasser ist stark von Druck, Temperatur und Wasserinhaltsstoffen abhängig. Bild 2 zeigt, daß der Sättigungswert

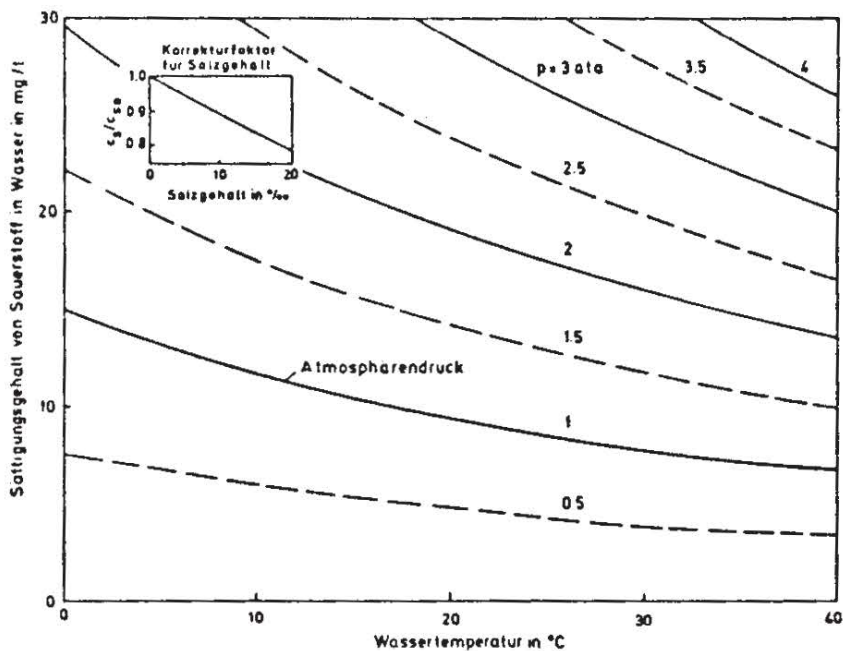


Bild 2  
Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser

mit steigendem Druck und abnehmender Temperatur zunimmt; ein Salzgehalt bewirkt eine geringere Sauerstofflöslichkeit.

Bei einem vorgegebenen Sauerstoffgehalt  $c_0$  ändert sich das Sauerstoffdefizit  $(c_s - c_0) / c_s$  mit der jeweiligen Sättigungskonzentration  $c_s$ : Die Eintragswirkung einer Belüftungsanlage, welche dem Defizit proportional ist, variiert demnach mit den örtlichen Druck- und Temperaturverhältnissen. Will man daher verschiedene Belüftungsverfahren untereinander vergleichen, dann müssen die Eintragswirkungen auf jeweils vergleichbare "Normalbedingungen" bezogen werden. Hierfür wird im allgemeinen gewählt:

Temperatur	T	= 20°C (manchmal 10°C)
Druck	p	= 1 ata
Sauerstoffdefizit	$\frac{c_s - c_0}{c_s}$	= 100% oder 50%

Aus den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten des Sauerstoffeintrags lassen sich bereits einige Schlüsse für die Standortwahl und die optimale Gestaltung von Belüftungsanlagen ziehen. Die Eintragswirkung einer Anlage nimmt zu

- mit abnehmendem örtlichem Sauerstoffgehalt
- mit abnehmender Temperatur
- mit zunehmendem Druck (Wassertiefe)
- mit der pro Zeit-, Energie- oder Kosteneinheit neu geschaffenen Grenzfläche (abnehmende Blasen- oder Tropfengröße).

### 3. AUSWIRKUNGEN VON KÜHLWASSEREINLEITUNGEN AUF DEN SAUERSTOFFHAUSHALT VON FLÜSSEN

Das aus dem Fluß für Kühlzwecke entnommene Wasser wird im Kreislauf des Kraftwerks am Kondensationshochpunkt sehr niedrigem Druck und hohen Temperaturen ausgesetzt. Dies bedeutet, daß die Sättigungskonzentration  $c_s$  örtlich sehr niedrige Werte annimmt. Dennoch führt dies im allgemeinen nicht zu Sauerstoffaustrag, da zum einen das aus dem Fluß entnommene Wasser meist sauerstoffarm ist und zum andern das Kühlwasser in einem geschlossenen Leitungssystem geführt wird, so daß eventuell örtlich ausgeschiedener Sauerstoff wieder in Lösung gehen kann, ehe er das Kühlsystem verläßt. Dem Kühlwasser wird demnach direkt kein Sauerstoff entzogen: Die nachteiligen Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt beruhen vielmehr auf der Temperaturerhöhung und machen sich erst stromab im Fluß bemerkbar. Temperaturerhöhungen verändern eine Reihe von Vorgängen, welche den Sauerstoffhaushalt bestimmen.

Sie bewirken:

- (1) eine Beschleunigung biologischer Abbauvorgänge (d.h. eine effektive Erhöhung des BSB von Schmutzstoffen);
- (2) durch Erniedrigung der Sättigungskonzentration  $c_s$  eine Erniedrigung des Sauerstoffdefizits  $(c_s - c_0) / c_s$  bei vorgegebenem  $c_0$ ;
- (3) eine Erhöhung des Wiederbelüftungskoeffizienten für den Eintrag an der Gewässeroberfläche (wobei diesem positiven Effekt der Vorgang (2) entgegenwirkt);



- (4) eine Erhöhung des Gesamt-Sauerstoffbedarfs durch weitergehenden Abbau bestimmter organischer Substanzen (Phosphate, Nitrate usw.).

An einem stilisierten Sauerstoffprofil eines Flusses mit einer Abwasser- und einer Kühlwassereinleitung ist in Bild 3 gezeigt, wie die Aufwärmung die Sauerstoffverhältnisse verändert. Die höheren Abbauraten bei erhöhten Temperaturen können in entsprechender Entfernung stromab zu Unterschreitungen der zulässigen Mindestwerte führen und somit den Einsatz von Belüftungsanlagen erforderlich machen.

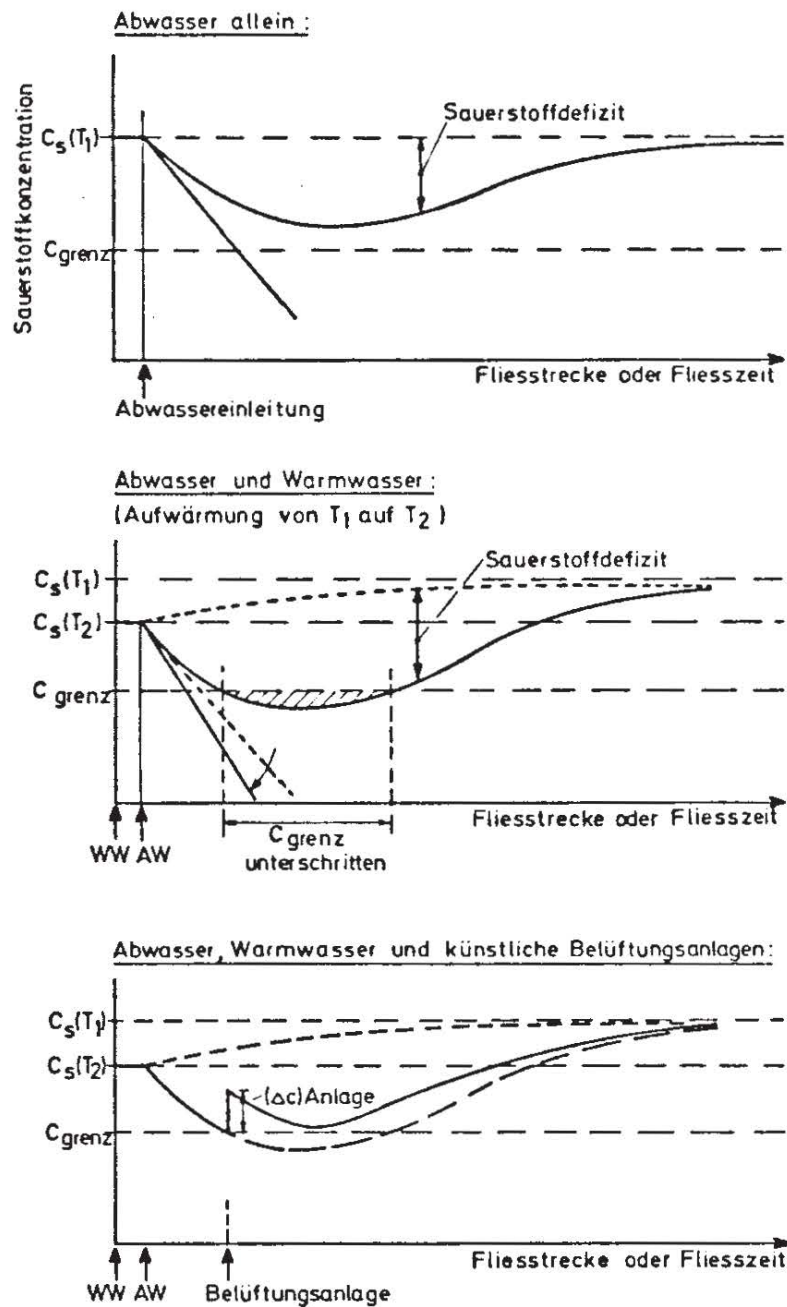


Bild 3

Schematische Darstellung von Sauerstoffganglinien ohne und mit Warmwassereinleitungen.



Belüftungsanlagen können entweder an der Kühlwasserrückführung oder direkt am Fluß vorgesehen werden. Eine Belüftung des Kühlwassers ist zwar technisch einfacher zu realisieren, da in diesem Fall die Anlage im Kraftwerksbereich liegt und auch meist ausreichendes Gefälle vorhanden ist, so daß keine zusätzliche Energie zur Belüftung aufgewendet werden muß. Allerdings ist die Wirkung solcher Anlagen beschränkt, da sich die hohe Temperatur des ungemischten Kühlwassers negativ auf den Sauerstoffeintrag auswirkt, und die Sauerstoff-erhöhung im Fluß selbst vom Verhältnis der Durchflüsse abhängt:

$$c_{\text{Fluß}} = c_{\text{Kühlw.}} \cdot \frac{Q_{\text{Kühlw.}}}{Q_{\text{Fluß}} + Q_{\text{Kühlw.}}} \quad (3)$$

Eine merkbare Auswirkung auf die Verhältnisse im Fluß kann demnach nur dann erwartet werden, wenn die Kühlwassermengen nicht sehr viel kleiner sind als die Flußwasserführung.

Andererseits sind Flußbelüftungsanlagen zwar aufwendiger, bieten aber weitergehende Möglichkeiten und können für einen wirtschaftlichen Einsatz ausgelegt werden - vor allem dann, wenn der Standort entlang des Flusses frei gewählt werden kann. Wie unterschiedlich die Eintragswirkung einer Anlage je nach Standort sein kann, macht Bild 4 deutlich. Dort ist dargestellt, welchen Sauerstoffeintrag ein und dieselbe Belüftungsanlage (konstanter Energieaufwand, konstanter Wirkungsgrad) an drei verschiedenen Standorten erzielen kann. Das vergleichende Beispiel zeigt, daß die Kühlwasserbelüftung den geringsten Effekt erzielt, während die stromab gelegene Flußwasserbelüftung die beste Wirkung zeigt.

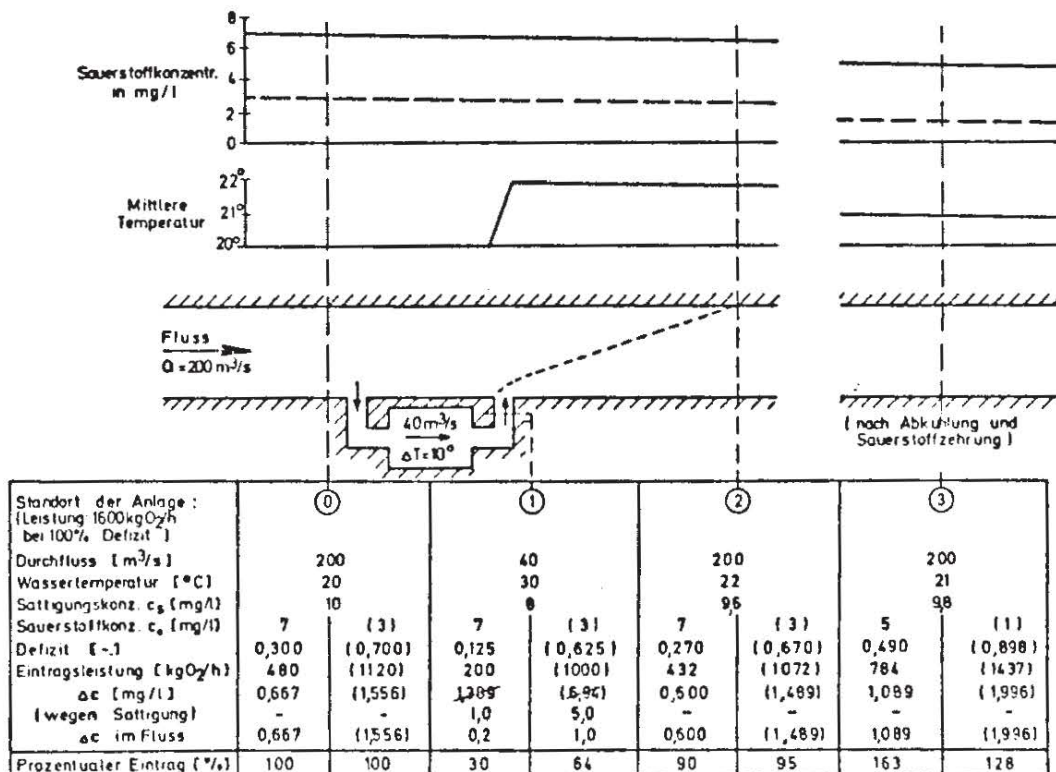


Bild 4: Eintragswirkung einer Belüftungsanlage in Abhängigkeit vom Standort

#### 4. AUSWAHLKRITERIEN FÜR BELÜFTUNGSANLAGEN

Maßnahmen zur künstlichen Sauerstoffanreicherung müssen dann ergriffen werden, wenn die Schmutzwasser- und Wärmebelastung eines Gewässers so anwachsen, daß zeitweilig die zulässigen Sauerstoffgrenzwerte unterschritten werden. Hierbei ist stets den Möglichkeiten der Verbesserung des natürlichen Sauerstoffeintrags (z.B. durch optimale Gestaltung der Fließquerschnitte) sowie der vollen Ausnutzung bereits existierender Belüftungsmöglichkeiten (z.B. an Überfällen, Wehren oder Staustufen) der Vorrang zu geben. Derartige Maßnahmen müssen sich allerdings an den jeweiligen Gegebenheiten orientieren und können daher nicht immer den Anforderungen gerecht werden.

Entscheidend für die Auswahl eines technisch realisierbaren Verfahrens ist zunächst die Größenordnung der zu belüftenden Wasserströme und des erforderlichen Sauerstoffeintrags pro Zeiteinheit. Eine Reihe wirkungsvoller Methoden (z.B. U-Rohrbelüftung, Verspränanlagen oder Kaskaden) kann für kleine Durchflüsse wirtschaftlich eingesetzt werden, während sie sich für große Durchflussmengen mit vertretbarem technischem Aufwand nicht realisieren lassen.

Die Wahl des Verfahrens und des Standorts erfolgt in erster Linie nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Hierbei ist zwischen Investitions- und Betriebskosten zu unterscheiden.

Für die Mehrzahl der Belüftungsverfahren liegen die direkten Investitionskosten verhältnismäßig niedrig. Allerdings können hierbei die Kosten für Grundstücke, Anschlüsse und Gebäude oder Beeinträchtigung anderweitiger Nutzungen stark ins Gewicht fallen - insbesondere dann, wenn die Flußbelüftung nicht auf dem Kraftwerksgelände liegt. Dies bedingt, daß die jeweiligen Investitionskosten starken ortsspezifischen Schwankungen unterliegen: Hierdurch werden echte Preisvergleiche zwischen verschiedenen Anlagen sehr erschwert. Welchen Anteil die Investitionskosten an den jährlichen Gesamtkosten der Anlage ausmachen und wie stark sie sich schließlich auf die Kosten pro eingetragener Sauerstoffmenge auswirken, hängt im übrigen erheblich von der Einsatzhäufigkeit der Anlage ab.

Die laufenden Kosten für Energiebedarf, Betrieb und Instandhaltung der Anlage stellen im allgemeinen den entscheidenden Kostenfaktor dar. Die Wirtschaftlichkeit einer Belüftungsanlage wird daher üblicherweise an ihrem Energiebedarf gemessen. Als Vergleichsmaßstab für verschiedene Verfahren wird der Energiebedarf pro eingetragener Sauerstoffmenge (oder dessen Reziprokwert) unter Normalbedingungen verwendet. Wegen der dominierenden Rolle des Energiebedarfs ist die Ausnutzung vorhandener, nicht anderweitig genutzter Energiehöhen für Überfälle, Wehre oder Schußrinnen stets wirtschaftlicher als die Anwendung von Verfahren, für die zusätzliche Energie aufgewendet oder anderen Nutzungen entzogen werden muß.

Eine in jüngster Zeit vieldiskutierte Frage betrifft die Wirtschaftlichkeit künstlicher Belüftungsanlagen, welche mit reinem Sauerstoff betrieben werden. Die Herstellung, der Transport und die Speicherung kommerziell erzeugten Sauerstoffs verursacht natürlich zusätzliche Kosten, die bei der Verwendung von Luft als überall kostenlos verfügbares Medium nicht anfallen. Den Sauerstoffbereitstellungskosten stehen jedoch die Ersparnisse einer wesentlich kleiner dimensionierten



Anlage entgegen. Insbesondere reduziert sich der Energiebedarf wegen des vergleichsweise geringen Durchsatzes auf rund ein Fünftel, was bei großen Anlagen oder Anwendungen bei großen Wassertiefen sehr stark ins Gewicht fällt. Zudem eliminiert die Verwendung von Sauerstoff den bei Luftanlagen unerwünschten Nebeneffekt, daß stets gleichzeitig auch Stickstoff ins Gewässer eingetragen wird.

Die Herstellungskosten für kommerziellen Sauerstoff liegen heutzutage in einer Größenordnung, die einen wirtschaftlichen Einsatz zur Flußbelüftung möglich erscheinen läßt. Da die Erzeugungskosten mit zunehmender Kapazität der Produktionsanlage günstiger werden, ist diese Möglichkeit besonders interessant für Gebiete mit Industrieanlagen, in denen Sauerstoff bereits für andere Zwecke produziert wird. Insbesondere dann, wenn die Anlage so ausgelegt wird, daß der gesamte Sauerstoff eingetragen oder zur Wiederverwendung aufgefangen wird, versprechen derartige Anlagen technisch und wirtschaftlich interessant zu werden. Nach amerikanischen Angaben liegt der Herstellungspreis für 95-prozentigen Sauerstoff bei 0,02 bis 0,03 DM/kg O<sub>2</sub> bei größeren Anlagen (Kapazität 10 Tonnen pro Tag). Bedenkt man, daß die spezifischen Energiekosten mit circa 0,15 bis 0,30 DM/kg O<sub>2</sub> um eine Größenordnung höher liegen, dann erscheint es wohl wert, die Möglichkeiten der Verwendung von Sauerstoff in allen Aspekten weiterzuverfolgen.

Der energiespezifische Sauerstoffeintrag ist nicht nur von der Wahl des Belüftungsverfahrens und des Mediums (Luft oder Sauerstoff) abhängig, sondern auch von den natürlichen Verhältnissen im Gewässer (Temperatur, Druck, Verschmutzung). Die Eintragswirkung einer Anlage kann sich mit der Temperatur wesentlich ändern (siehe Bild 5), und Verschmutzungen können den Wirkungsgrad stark reduzieren: In Abwässern kann der Eintrag um 30 bis 40% gegenüber Reinwasser zurückgehen.

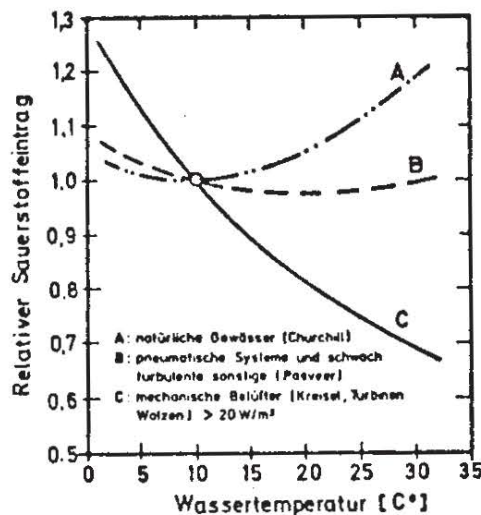


Bild 5

Relativer Sauerstoffeintrag in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Belüftungen (nach [5])

Schließlich ist bei der Auswahl des Belüftungsverfahrens auch zu beachten, daß anderweitige Gewässernutzungen durch die Anlage nicht beeinträchtigt werden



(z.B. Schifffahrt oder Fischerei), daß Lärmbelastigungen unterbleiben und daß die Ästhetik des Landschaftsbildes erhalten bleibt. Dies sind Gesichtspunkte, welche beispielsweise gegen den Einsatz von Oberflächenbelüftern in offenen Gewässern sprechen.

## 5. TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN DER KÜNSTLICHEN SAUERSTOFF-ANREICHERUNG

### 5.1. Seen und Staubecken

Die Wasserqualität von Seen und Reservoirs kann durch temperaturbedingte Dichteschichtungen stark beeinträchtigt werden. In unseren Breitengraden bildet sich im Sommer eine natürliche Temperaturschichtung aus, derzufolge eine warme, sauerstoffreiche Schicht in Oberflächennähe (Epilimnion) stabil über einer kälteren, sauerstoffarmen Tiefenschicht (Hypolimnion) liegt. Eine solche stabile Dichteschichtung ändert die Strömungs- und Transportverhältnisse im Gewässer drastisch. Bewegungen werden auf horizontale Ebenen beschränkt, und Austausch in der Vertikalen wird effektiv verhindert, so daß auch kein Sauerstoff in die tieferen Schichten eingetragen werden kann. Diese mangelnde Sauerstoffzufuhr kann bei gleichzeitigem Sauerstoffverbrauch zu anaeroben Bedingungen im Hypolimnion führen. Verbunden mit einer starken Anreicherung gelöster Stoffe bedeutet dies eine Verschlechterung der Gewässerqualität.

Natürliche Dichteschichtungen dieser Art bilden sich in stehenden oder sehr langsam durchflossenen Gewässern großer Tiefe ( $H > \approx 10 \text{ m}$ ) aus. Warmwassereinleitungen in solche Gewässer führen zu einer Verstärkung und Stabilisierung der Schichtung und damit zu einer Intensivierung der oben beschriebenen, unerwünschten Nebeneffekte.

Eine Verbesserung der Wasserqualität erfordert Maßnahmen zur Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Hypolimnion. Dies läßt sich auf zweierlei, grundsätzlich verschiedene Arten realisieren. Zum einen kann durch künstliche Umwälzung eine Beseitigung der Dichteschichtung erzwungen werden, so daß wieder vertikaler Austausch und "natürlicher" Sauerstoffeintrag in die Tiefenschichten möglich ist. Die hierfür eingesetzten Geräte können daher als "indirekte Belüftungsanlagen" bezeichnet werden. Zum andern gibt es direkte Hypolimnion-Belüftungsverfahren, welche eine Sauerstoffanreicherung der Tiefengewässer bewirken, ohne die natürliche Dichteschichtung im Gewässer zu verändern.

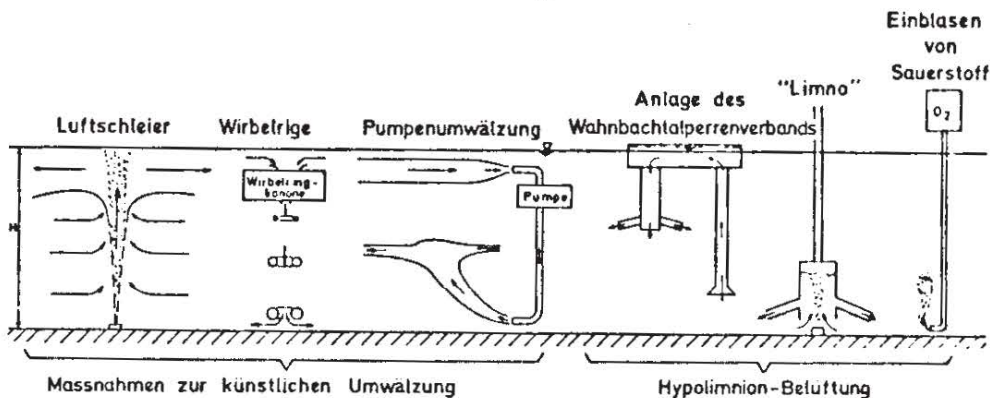


Bild 6: Belüftungsmöglichkeiten in Seen und Staubecken

Anlagen zur Umwälzung und Entschichtung sind mit relativ geringem technischem Aufwand zu realisieren und wurden schon vielfach eingesetzt - allerdings mit wechselhaftem Erfolg. Hierfür gibt es zwei wesentliche Gründe: Eine Umwälzung des Gewässers bringt Nährstoffe aus den Tiefenschichten an die Oberfläche und kann so zu einer ungewollten Intensivierung biologischer Prozesse führen, und zudem wird die Gewässertemperatur im Hypolimnion durch die Durchmischung notwendigerweise erhöht, was für die Entnahme von Trink- und Brauchwasser stets unerwünscht ist. Deshalb wird in neuerer Zeit den Anlagen zur direkten Hypolimnion-Belüftung mehr Beachtung geschenkt.

Naturgemäß ist der Wirkungsgrad von Umwälzanlagen wegen ihrer indirekten Wirkungsweise nur schwer zu erfassen. Bernhard [1] hat das Tiefenbelüftungssystem "Wahnachtalsperrenverband" (Bild 6) mit einer Blasen-Umwälzanlage verglichen und festgestellt, daß im ersteren Fall die Investitionskosten etwa viermal höher liegen, dafür der Energiebedarf auf die Hälfte zurückgeht (von 2,4 auf 1,2 kWh/kg O<sub>2</sub> bei 50% Defizit). Die "Limno"-Anlage (Bild 6) ist von den Investitionskosten und von der technischen Handhabung aus gesehen günstiger und dürfte auch eine etwas bessere Eintragswirkung besitzen. Diese Anlagen sind für Kapazitäten von 100 bis 400 kg O<sub>2</sub>/Tag ausgelegt. Wesentlich höhere Kapazitäten lassen sich mit Hilfe von Anlagen erreichen, die mit Sauerstoff betrieben werden: In den USA befindet sich eine Anlage in Erprobung, die 50 bis 100 Tonnen Sauerstoff pro Tag eintragen soll. Vorläufige Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigen, daß hier gegenüber einer Anlage mit Luft die Kosten auf die Hälfte gesenkt werden können.

## 5.2. Fließgewässer mit nutzbarem Energiegefälle

Wo immer in einem Gewässer Energiehöhenunterschiede durch Energieumwandlungsanlagen ausgeglichen werden müssen, bietet sich die Möglichkeit, durch geeignete bauliche Gestaltung eine Sauerstoffanreicherung zu erzielen. Hierfür eignet sich die Luftaufnahme in Schußrinnen und beim Wechselsprung im Tosbecken oder das Versprühen an Hochwasserentlastungsanlagen nach dem Prinzip der Skischanze oder an Verschlüssen (Kegelstrahlschieber). In Absturzbauwerken wird durch Strahlen, die auf Wände oder Wasserpolster auftreffen, ebenfalls Sauerstoff ins Wasser eingetragen.

Der Sauerstoffeintrag an Wehren und Kaskaden läßt sich für Bemessungszwecke in etwa abschätzen. Der Sauerstoffeintrag nimmt mit der Fallhöhe  $\Delta h$  zu. Nach Londong [1] wird überschlägig angesetzt:

$$\Delta c = \omega \cdot \Delta h (c_s - c_0) \quad (4)$$

wobei der "Sauerstoffeintragsbeiwert"  $\omega$  [1/m] noch vom Durchfluß und der Fallhöhe abhängig ist und im metrischen System in der Größenordnung (0,1 bis 1) liegt.

An Staustufen, deren Energiegefälle zur Stromerzeugung ausgenutzt wird, ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Sauerstoffanreicherung, die in Bild 7 angedeutet sind. Eine Zugabe auf der Oberstromseite erfordert Kompressoren zum



Einblasen, während im Unterdruckbereich hinter dem Turbinenlaufrad Luft aus der Atmosphäre angesaugt werden kann. Dem zusätzlichen Energieaufwand für die Alternativen 1 (Blasenbelüftung im Zulaufbereich) und 2 (Grobrechenbelüftung) steht ein Energieverlust infolge Erniedrigung des Wirkungsgrades der Turbine bei der Alternative 3 (Turbinebelüftung) und ein Energieverlust infolge Durchflußminderung bei Alternative 4 entgegen. Im letztgenannten Fall wird ein Teil des Abflusses (4 - 5%) durch einen Bypass geleitet, dort mit Sauerstoff bei hohem Druck übersättigt und auf der Unterstromseite durch Diffusoren wieder dem Gewässer zugegeben.

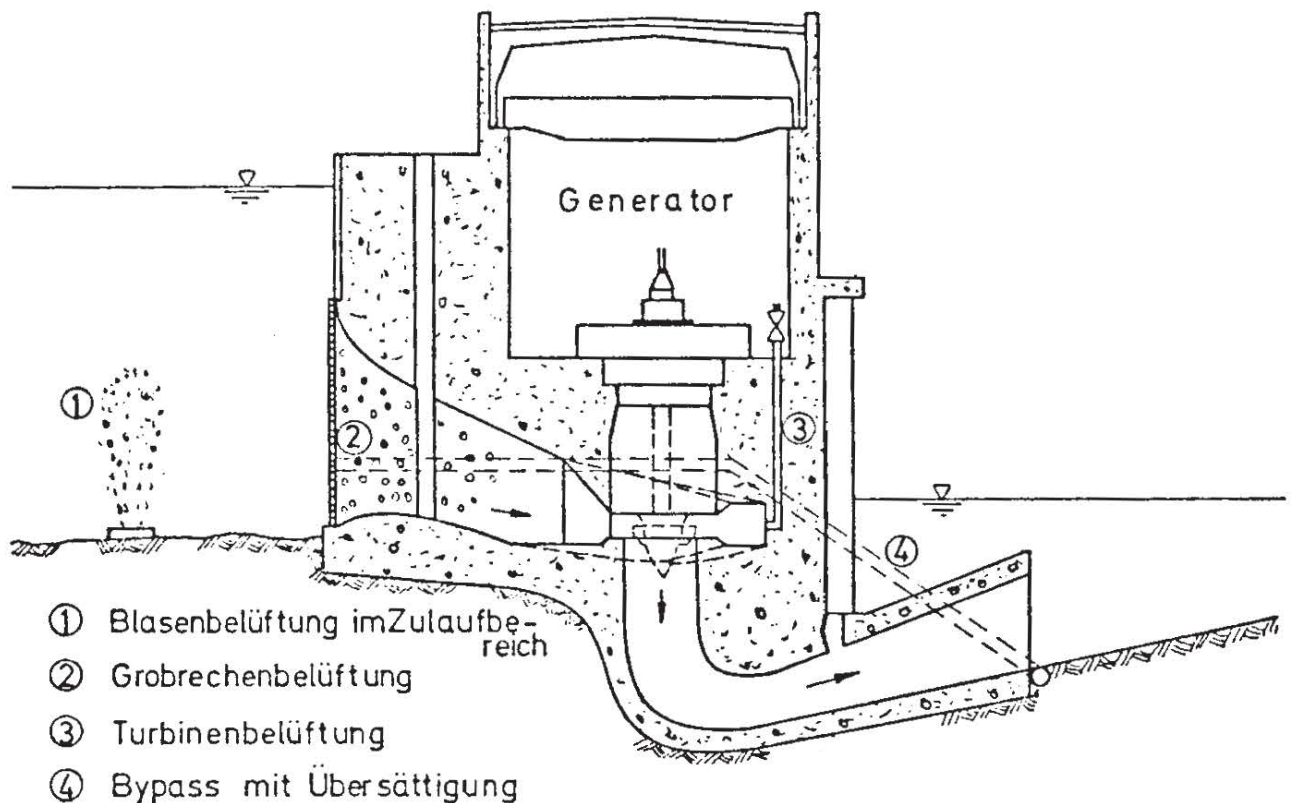


Bild 7

### Belüftungsmöglichkeiten an Turbinen

Nach Literaturangaben [1] liegen Turbinenbelüftungsanlagen mit 1 - 1,4 kWh/kg O<sub>2</sub> bei 50% Defizit sowohl vom Energiebedarf als auch von den Gesamtkosten her sehr günstig. Dies könnte durch Verwendung von reinem Sauerstoff noch verbessert werden, was bei allen vier Alternativen technisch möglich wäre.

### 5.3. Fließgewässer ohne nutzbares Energiegefälle

An Flüssen ohne Stauhaltungen müssen Anlagen verwendet werden, die unter Aufwendung von Energie eine Sauerstoffanreicherung bewirken. Ein Vorteil ist in diesem Fall, daß der Standort frei wählbar ist. Dies ermöglicht es, die Anlage dort zu erstellen, wo die beste Eintragswirkung erzielt wird, während der Standort bei den unter 5.2. besprochenen Verfahren durch die Gegebenheiten festliegt.



Als Belüftungsverfahren kommen hier Dispersionsanlagen oder Oberflächenbelüfter in Frage. Beim Dispersionsverfahren werden Luftblasen entweder aus Düsenrohren an der Gewässersohle oder von Belüftungsbrücken aus in geringer Wassertiefe einblasen. Oberflächenbelüfter wie Kreisel oder Verdüsungsanlagen bewirken einen Sauerstoffeintrag dadurch, daß sie mechanisch ständig neue Grenzflächen durch Umrühren und Versprühen schaffen.

Für Naturanwendungen erscheinen Luftblasenschleier am besten geeignet, da sie im Gegensatz zu Oberflächenbelüftern weder Wassernutzungen wie Schifffahrt oder Fischerei beeinträchtigen noch Schwimmer oder Fische gefährden oder Lärm erzeugen und außerdem keinerlei Störung des Flußlandschaftsbildes mit sich bringen.

Der spezifische Energiebedarf liegt für beide Systeme in derselben Größenordnung. Für Dispersionssysteme in Klärbecken ergibt sich je nach Gestaltung der Düsenanlage ein Energiebedarf von 0,6 bis 2 kWh/kg O<sub>2</sub> bei 50% Defizit; Kreiselbelüfter liegen bei 1 bis 1,5 kWh/kg O<sub>2</sub> (50% Defizit). Die Kapazität solcher Anlagen läßt sich durch Verwendung mehrerer Kompressoren bzw. mehrerer Oberflächenbelüfter nahezu beliebig variieren.

Die Bemessungsgrundlagen für Dispersionsanlagen zur Flußbelüftung sind noch stark verbesserungsbedürftig; die Eintragswirkung hängt stark von der Gestaltung der Düsenanlage ab und kann bis jetzt nur grob abgeschätzt werden. Der Sauerstoffeintrag pro eingeblasener Luftmenge steigt mit der Wassertiefe an, in der eingeblasen wird, und auch eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit wirkt sich positiv auf die Eintragswirkung aus. Beachtet man die Optimierungsregel, möglichst kleine Blasen zu erzeugen, dann muß die optimale Anlage aus sehr vielen Düsen mit jeweils sehr kleinem Durchsatz in möglichst großem Abstand bestehen. Von den Installationskosten her sind jedoch möglichst wenige Düsen auf engem Raum erstrebenswert: Die wirtschaftlichste Gestaltung der Anlage muß beiden Aspekten Rechnung tragen.

## 6. SCHRIFTTUM

- 1 - : "Die künstliche Belüftung von Oberflächengewässern".  
Arbeitsblatt AW 161 der KfK, ATV und DGWV, ZfGW-Verlag, Frankfurt, Jan. 1971.
- 2 Böhnke, B. : "Minderung der Folgen der Wärmebelastung durch Sauerstoffeintrag".  
VDI-Bericht Nr. 204 (Wärmebelastung der Gewässer und der Atmosphäre), 1973.
- 3 Elder, R., Smith, M., : "Aeration Efficiency of Howell Bunger Valves"  
Wunderlich, W. Journal of the Water Pollution Control Federation, Washington, D.C., April 1969.
- 4 Imhoff, K.R. : "Wie berechnet man eine künstliche Gewässerbelüftung?"  
GWf Heft 20, S. 543-545, 1969.
- 5 Imhoff, K.R., : "Zum Einfluß von Temperatur und Turbulenz  
Albrecht, D. auf den Sauerstoffeintrag in Wasser"  
GWf-Wasser-Abwasser 113, Heft 6, 1972.

- 6 Knop, E.,  
Bischofsberger u.  
Stalman : "Versuche mit verschiedenen Belüftungssystemen im technischen Maßstab"  
Vulkan-Verlag Essen 1964.
- 7 Kobus, H. : "Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Luftschleier im Wasserbau".  
Heft 7 der Schriftenreihe "Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis"  
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1973.
- 8 Krolewski, H. : "Die Flußbelüftung der VEW in der Lippe"  
Energie und Technik, 18. Jg., Heft 6, 1966.
- 9 Rancy, D.C.,  
Arnold, T.G. : "Dissolved Oxygen Improvement by Hydroelectric Turbine Aspiration"  
ASCE Journal of the Power Division, PO 1,  
Mai 1973.
- 10 Ruane, R.J. : "Investigations of Methods for Increasing Dissolved Oxygen Concentrations Downstream from Reservoirs"  
EWRE Technical Report No.30, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 1973.
- 11 Speece, R.E.,  
Malina, J.F. Jr. : "Applications of Commercial Oxygen to Water and Wastewater Systems"  
University of Texas, Austin, Center for Research in Water Resources (Water Resources Symposium Number Six), 1973.
- 12 Vigander, S. : "Preliminary Evaluation of Alternative Reaeration Schemes - Norris Discharge Oxygenation".  
TVA Engineering Laboratories Report No.2-631, Norris, Tennessee, April 1972.