

Gasüberdruck und Gasblasenkrankheit

**Ursachen (Gesamtgashypothese)
Messverfahren
Maßnahmen zur Beseitigung bzw. Vermeidung von Gasüberdruck**

**von
Kurt Bauer-Schiemenz**

Ehemaliger Limnologe des bayerischen Fischgesundheitsdienstes beim Tiergesundheitsdienst Bayern e.V.
Berater der Firma Fisch- und Wassertechnik

**Version 1.0
10.7.2015**

Zusammenfassung

Die Schädigung von Fischen durch Gasblasen ist in Fischzuchtanlagen sehr häufig und wird vor allem durch technische Vorgänge ausgelöst. Entscheidend dabei ist nicht die Übersättigung eines einzelnen Gases, sondern die Summe der Partialdrücke aller gelösten Gase im Vergleich zum mechanischen Druck in der Umgebung des Fisches. Diese Druckdifferenz als unmittelbar verursachende Größe kann mit einem Sauerstoffsättigungsmessgerät nach Weiss gemessen werden. Dadurch ist es möglich, in einer Fischzuchtanlage den Ort der Entstehung einer Gesamt-Gasübersättigung des Wassers ausfindig zu machen und den Fehler abzustellen. Kritische Belüftungssysteme können auf eine gefahrlose Betriebsart eingestellt werden.

Die Gasblasenkrankheit ist ein uraltes und noch immer aktuelles Thema. Zwischen 1898 und 1910 haben MARSH und GORHAM alles Wesentliche und Richtige dazu erforscht und geschrieben. Sie hatten das Problem zutreffend auf die Summe aller im Wasser gelösten Gase zurückgeführt, hinterließen aber die Anregung, sich mit der Rolle der verschiedenen Gase einzeln zu befassen.

1924 berichtete PLEHN von einem Karpfenteich, in dem Gasblasenkrankheit als Folge einer extremen Sauerstoffsättigung von über 200% auftrat. Es wurden aber auch in vielen Teichen solche extremen Sauerstoffübersättigungen ohne die Folge einer Gasblasenerkrankung beobachtet. Trotz dieser Publikation gilt deshalb in der Fischerei der Sauerstoff seit langem als völlig ungefährlich und der Stickstoff als alleiniger Übeltäter.

In Fischereikreisen wurden seither unendlich viele Artikel geschrieben und Vorträge gehalten, die immer neue Fälle von Gasblasenkrankheit aufzeigten im Zusammenhang mit vermeintlichen Übersättigungen an Stickstoff. Meistens wurde die gleichzeitig vorhandene Gesamtgas-Übersättigung gar nicht mehr genannt, weil die Autoren ohnehin von der alleinigen Täterschaft des Stickstoffs überzeugt waren. Gerne wurde auch der Vergleich mit der Taucherkrankheit benutzt. Er ist deshalb irreführend, weil in der Taucherei dem Körper ohnehin nur eine Übersättigung mit Stickstoff zugeführt wird, während der Sauerstoff bei Normaldruck gehalten wird. Dies steht völlig im Gegensatz zu den vielfältigen Entstehungsweisen von Gasübersättigungen im Fischwasser.

Die kleinere Anzahl der naturwissenschaftlichen Veröffentlichungen geht dagegen fast immer vom Gesamtgasdruck aus, also von der Beteiligung aller im Wasser gelösten Gase einschließlich dem Wasserdampfdruck. Am ausführlichsten beschäftigte sich der Wasserphysiker WEISS 19XX mit den Löslichkeiten aller Luftgase und der Entstehung von Gasblasen. Seine Überlegungen führten auch unmittelbar zum Messprinzip des nach ihm benannten **Weiss-Saturometers**, anhand dessen sich der physikalische Mechanismus für die Entstehung und das Wachstum von Gasblasen gut erklären lässt.

Dieses Messgerät ist ein technisches Modell einer Gasblase, die sich beispielsweise in der Haut eines Fisches bildet. Es besteht aus einem dünnen aber formstabilen Silikonschlauch und einer Messeinrichtung für den Druck des Gases im Schlauchinneren. Der Schlauch wird in das Wasser eingetaucht. Was nun geschieht, spielt sich in gleicher Weise auch an der Blase im Fisch ab, wenn sie schon einmal vorhanden ist:

- Aus dem Schlauchinneren diffundieren die Moleküle des Stickstoffs, des Sauerstoffs, der Kohlensäure und des Wasserdampfes in das Wasser hinaus, entsprechend den Anteilen, welche diese Gase im Schlauch gerade haben.
- Gleichzeitig diffundieren Moleküle aller verschiedenen im Wasser gelösten Gase und auch Wasserdampfmoleküle in den Schlauch hinein, und zwar entsprechend ihrem sog. Partialdruck in der Lösung.

Nun werden die Mengen anfangs nicht gleich sein, die von jeder Molekülsorte pro Sekunde in den Schlauch hinein und aus dem Schlauch heraus wandern. Nach einigen Minuten stellt sich dann aber für jedes Gas einzeln ein Gleichgewicht ein, so dass die Anzahl der Moleküle jeder Sorte, welche in der Sekunde die Seite wechseln, für beide Richtungen jeweils gleich ist.

Die gleiche Art von Molekülaustausch findet auch ständig an der Grenzfläche zur Luft statt. Wenn im Wasser nichts geschieht, was den Gehalt der Gase verändert, dann stellt sich mit der Zeit ein Gleichgewicht ein, bei dem eine bestimmte Konzentration jedes Gases in Milligramm pro Liter zu dem Druckanteil gehört, den dieses Gas an der Luft hat.

Wenn z.B. Sauerstoff in der Luft zu (rund) 20% enthalten ist und die Luft hat gerade eine Atmosphäre Druck (1 atm), dann ist sein Druckanteil in der Luft 0,2 atm. Man nennt dies seinen **Partialdruck** in

dieser Luft. Wenn ferner im Wasser unter den geschilderten Gleichgewichtsbedingungen sich eine Sauerstoffkonzentration von 10 mg/l einstellt, dann schreibt man dieser Konzentration auch in der Lösung einen „Partialdruck“ von 0,2 atm zu. Natürlich würde sich in dem Wasser eine Konzentration von 50 mg/l einstellen, wenn statt Luft reiner Sauerstoff mit 1 atm vorhanden wäre.

Über dem Wasser ist eine beliebige Menge Luft der immer gleichen Zusammensetzung vorhanden. Sie ändert sich praktisch nicht durch die Austauschvorgänge mit dem Wasser. Dagegen ist im Schlauch des Saturometers oder in der Gasblase unter der Haut des Fisches das Volumen sehr gering. Das umgebende Wasser mit seinen Gasgehalten verändert sich deshalb kaum durch den Austausch mit der Blase. Wohl aber ändert sich das Gas in der Blase oder im Schlauch. Es gleicht sich den Partialdrücken der Gase im Wasser an. Ein Gleichgewicht im Schlauch stellt sich dann ein, wenn von allen Gasen die Druckanteile im Schlauch so groß sind wie ihre Partialdrücke im Wasser. Dadurch stellt sich im Schlauch ein Druck ein, der gleich der Summe aller Partialdrücke aller gelösten Gase im Wasser ist, einschließlich dem Wasserdampfdruck.

Die Gasblase in der Haut des Fisches hat im Gegensatz zum Schlauch des Saturometers eine gewisse Elastizität. Statt dass sich in ihr gleich der Gleichgewichtsdruck einstellen könnte, bläht sie sich auf, bis das gedehnte Gewebe den Druck hält oder zerreißt. Natürlich kommt es nur dann zu einer Aufblähung der Blase, wenn die Gase im Wasser zusammen mehr Partialdruck haben, als an mechanischem Druck in der Blase herrscht. Denn der Druck in der Blase ist ja die Summe der dort herrschenden Partialdrücke. Schwimmt der Fisch direkt an der Oberfläche, so ist der Druck in der Blase gleich dem Luftdruck, ansonsten müssten wir den zusätzlichen Wasserdruck berücksichtigen, also je Tiefenmeter 0,1 atm. Das Saturometer würde in diesem Fall einen Druck über dem Luftdruck anzeigen. (Es ist so gebaut, dass es gleich die Differenz zum Luftdruck und deshalb in diesem Fall einen positiven Wert zeigt.)

Wenn aber die Summe der Partialdrücke der gelösten Gase geringer ist als der Druck in der Blase, so werden mehr Gase die Blase verlassen, als aus dem Wasser hinein diffundieren. Die Blase schrumpft folglich und verschwindet. Das Saturometer zeigt in diesem Fall einen Druck kleiner als der Luftdruck (also einen negativen Wert). Unter diesen Bedingungen kann sich eine neue Blase gar nicht erst bilden! Jeder denkbare Ansatz einer Blase würde sofort hinweg schrumpfen.

Entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von Gasblasen ist also, dass die Summe der Partialdrücke aller gelösten Gase (einschl. Wasserdampfdruck) größer ist als der mechanische Druck am Ort der Entstehung.

Wie wir sehen, macht es dabei keinen Unterschied, wie sich diese Summe der Partialdrücke aus verschiedenen einzelnen Gasen zusammensetzt. Ein Saturometer misst genau den Differenzdruck, den die Summe der gelösten Gase gegenüber dem aktuellen Luftdruck aufbringt. Dieser Differenzdruck ist unmittelbar die treibende Kraft bei der Entstehung und dem Wachstum von Gasblasen in Fischen nahe der Oberfläche.

Ein verbreiteter Irrtum besteht in dem Glauben, die Gleichgewichtskonzentration eines Gases mit der Luft sei so etwas wie die Kapazitätsgrenze des Wassers für dieses Gas, also dessen absolute „Löslichkeit“. Würde sie überschritten, so müsse speziell dieses Gas sich in Form von Blasen abscheiden. Dieser Irrtum kommt von der unglücklichen Bezeichnung dieser Gleichgewichtskonzentration als „Sättigung“ mit dem Wert „100%“. Der Gedanke an das Auskristallisieren überschüssig gelöster Salze liegt dann nahe. Genau auf diesem Irrtum beruhen alle fischereilichen Publikationen über die schädlichen Wirkungen der Stickstoffübersättigung.

Tatsächlich sind die Zusammensetzung der Luft und ihr Druck nur zufällige Produkte der Erdgeschichte. Sie haben nichts mit der Kapazität des Wassers zu tun, Gase zu lösen. Außerdem müsste diese Kapazität dann auch noch mit dem aktuellen Luftdruck schwanken, also mit dem Wetter und der geografischen Höhe des betreffenden Gewässers. Und bereits einen Millimeter unter der Wasseroberfläche weiß nichts und niemand mehr, wie die Luft zusammengesetzt ist.

Die Wahrheit ist, dass in dem von uns erlebten Druckbereich die „Löslichkeit“ aller Gase proportional dem Druck ist, also z.B.: der zehnfache Druck macht die zehnfache Gleichgewichtskonzentration oder eine „zehnfache Löslichkeit“ ! Wie wir sehen werden, ist eben diese Tatsache auch eine der verbreitetsten Ursachen für schädliche Gasübersättigungen in der Fischerei.

Wie es dennoch zu Untersuchungsergebnissen kommen kann, in denen sich der Sauerstoff als vermeintlich ungefährlich erweist, wird weiter unten im Zusammenhang mit den möglichen Entstehungsweisen von Gasübersättigungen besprochen. Aber LEYENDECKER hat 1969 in seiner Doktorarbeit versucht, die unterschiedliche Gefährlichkeit von Stickstoff und Sauerstoff experimentell zu beweisen. Seine Vorgehensweise, die zu dieser irrtümlichen Annahme führte, sei im Folgenden dargestellt.

Die Vorstellung, dass es auf die Summe aller Gase ankomme, hat LEYENDECKER nie erwogen. Deshalb hat er seine Stickstoffexperimente so angelegt, dass mit der Stickstoffübersättigung zusammen gleichzeitig auch eine Gesamtgas-Übersättigung in seinem Versuchswasser entstand. Er entgaste sein Wasser vollständig und löste dann gezielt Stickstoff und Sauerstoff darin. Für seine Stickstoffexperimente löste er absichtlich genau „100%“ Sauerstoff, um es den Fischen für die Atmung daran nicht fehlen zu lassen. Dazu fügte er unterschiedlich starke Übersättigungen an Stickstoff (103% bis 137%), was in der Summe natürlich auch zu unterschiedlichen Gesamtgas-Übersättigungen führte. Tatsächlich zeigten seine Versuchsfische in diesem Wasser Gasblasenerkrankung einer mit dem Stickstoff korrespondierenden Stärke.

Für den Gegenversuch mit Sauerstoff wollte er ganz sicher gehen, nicht versehentlich auch zu viel Stickstoff im Spiel zu haben. Er senkte dessen Sättigung auf nur 25% ab und gab Sauerstoff bis zu 250% Sättigung hinzu, ohne damit die geringsten Anzeichen von Gasblasen hervorrufen zu können. Natürlich nicht, denn er hatte den Partialdruck des Stickstoffs von ca. 0,8 atm bei Sättigung auf 25% davon, also auf 0,2 atm abgesenkt. Dagegen bringt Sauerstoff bei je 100% Sättigung nur je 0,2 atm ein. Seine 250%ige Sauerstoffsituation hatte also erst insgesamt $0,2\text{atm} + 2,5 \cdot 0,2\text{atm} = 0,7\text{ atm}$ als Summe der Partialdrücke aller gelösten Gase, also weit unter dem mechanisch dagegen stehenden Luftdruck von 1 atm. Die Voraussetzung für Gasblasen war deshalb nie erfüllt.

Drei Arten von Ursachen für die Entstehung von Gesamtgas-Übersättigungen

Man kann die Entstehung von Gesamtgas-Übersättigungen auf drei verschiedene Grundmechanismen zurückführen, die alle in der Teichwirtschaft, insbesondere in der Forellenzucht, eine große Rolle spielen.

1. Die biogene Veränderung der Konzentrationen von Einzelgasen. Hier ist der naheliegendste Fall die Erzeugung von Sauerstoff bei der Photosynthese, bei der gleichzeitig Kohlendioxid verbraucht wird. Die genaue Umkehrung ist die Atmung. Stickstoff kann theoretisch bei der bakteriellen Denitrifikation von Nitrat entstehen, aber nur bei extremem Mangel an Sauerstoff, somit nicht in Anwesenheit lebender Fische.
2. Die thermisch bedingte Übersättigung. Sie beruht darauf, dass die Löslichkeit aller Gase im Wasser von der Wassertemperatur abhängt. Allgemein bekannt ist die Temperatur-Tabelle für Sauerstoff, die besagt, dass mit steigender Temperatur weniger Sauerstoff „löslich“ ist. Für Stickstoff und Kohlendioxid gilt im Prinzip das gleiche, nur mit anderen Zahlen. Der gemeinsame Nenner ist bei allen, dass eine Temperaturerhöhung von 3°C ungefähr 5% weniger „Löslichkeit“ zur Folge hat.
3. Die mechanisch bedingte Übersättigung mit Luft oder Einzelgasen. Das Wasser kommt mit Luft oder Reinsauerstoff unter einem Überdruck zusammen und das Gas löst sich entsprechend diesem erhöhten Druck auch vermehrt im Wasser. Dafür gibt es eine große

Vielfalt von Gelegenheiten in der meist verrohrten Wasserführung der Forellen-Anlagen – einige davon ganz unerwartet.

Bei den **biogenen Gasübersättigungen** geht es im Prinzip immer um Sauerstoff aus Photosynthese. Aber tatsächlich führt er, in scheinbarer Übereinstimmung mit den oben diskutierten Meinungen, nur manchmal zu einer Gasblasenerkrankung des Fischbestandes. Fruchtbare Karpfenteiche zeigen regelmäßig in den Nachmittagsstunden hohe Sauerstoffübersättigungen, die aber die Nacht über von der Atmung wieder stark vermindert oder sogar in einen Sauerstoffmangel übergeführt werden. Normalerweise entsteht hier kein Schaden an den Fischen.

Dafür gibt es zwei Gründe, die wir in den letzten 25 Jahren bei unseren Untersuchungen mit Saturometer und Sauerstoffgerät immer wieder bestätigt finden konnten. Der erste Grund liegt im Gewässer, der zweite im Fisch.

Bei starker Übersättigung bilden sich auch Bläschen im Wasser. Beispielsweise an den Blattspitzen der Wasserpflanzen steigt der „Sauerstoff“ in Blasketten auf wie in einem Sektglas. Tatsächlich enthalten diese Blasen entsprechend seinem örtlichen Partialdruck auch Stickstoff. Denn an jeder Grenzfläche jedes Gasraums zu Wasser herrscht Diffusion aller Gase in beiden Richtungen. So wird Stickstoff aus dem gesamten Wasser ausgekämmt, während er nur über die Oberfläche aus der Luft zurückkehren kann. Dadurch entsteht ein Freiraum an Partialdrücken, der bei erneuter Photosynthese durch Sauerstoff gefüllt werden kann, bevor überhaupt wieder eine Gesamtübersättigung entsteht.

Der zweite Grund ist, dass die Entstehung von Gasblasen extrem langsam beginnt. Durch einen Zufallsprozess müssen sich im Fisch an einer Stelle erst einmal so viele Moleküle der beteiligten Gase zusammenfinden, dass an diesem Blasenkeim die unterschiedlichen Häufigkeiten des Hinzukommens und Hinweggehens von Molekülen zu einem zuverlässigen Wachstum führen. Bevor eine schädliche Größe dieser Blasenkeime erreicht wird, hat die nächtliche Atmung den Gesamtdruck im Teich bereits wieder so weit vermindert, dass die Keime wieder schrumpfen und verschwinden und am nächsten Tag erst wieder neu entstehen müssen.

Bei Atmung und Photosynthese werden gleichwertige Mengen an Sauerstoff und Kohlendioxid gegeneinander ausgetauscht, die in der Luft auch das gleiche Volumen einnehmen würden. Kohlendioxid ist aber rund 50 mal besser als Sauerstoff in Wasser löslich. Sein Partialdruck ist bei gleichwertigen Mengen also rund 50 mal geringer als der des Sauerstoffs. Deshalb führt Photosynthese zu einer gesteigerten, jedoch Atmung zu einer verminderten Gesamtgasättigung. Kohlendioxid ist deshalb praktisch nie die Ursache von Gasübersättigungen. Sein geringer Druckanteil muss aber rechnerisch berücksichtigt werden, wenn die Analyse die genaue Herkunft einer Übersättigung zeigen soll.

Zu den **thermisch verursachten Gasübersättigungen** wurde bereits die häufig in Tabellen abgedruckte Temperaturabhängigkeit der „Löslichkeit“ von Sauerstoff genannt. Wegen dieses Zusammenhangs wird oft versucht, Brunnen- oder Quellwasser sofort zu belüften, wo es noch am kältesten ist, um möglichst viel Sauerstoff einzubringen. Auf dem Weg zu den Fischen kann sich dieses Wasser in einigen Fällen nennenswert erwärmen. Nun aber sind die im kalten Wasser hergestellten Gleichgewichtskonzentrationen aller Gase zu hoch und stellen einzeln wie in Summe Übersättigungen dar.

Diese Übersättigungen sind vielleicht nur gering. Eine Erwärmung um 3° erzeugt von allen Gasen eine Übersättigung von ca. 5%. Bei 1 °C Erwärmung sind es nur gut 1,5%. Aber diese geringen Übersättigungen werden den Fischen meist über Wochen hinweg bei Tag und Nacht präsentiert. Dann gibt es nie Schrumpfungsbefindungen für Blasenkeime. Sie können sich auswachsen und schädigen die Fische im Verlauf von ein bis drei Wochen und länger auf eine sehr uneinheitliche Weise. Manche zeigen Glotzaugen oder einseitige Augenverluste, weil in der Augenhöhle offenbar ein bevorzugter

Ort für die Abscheidung von Gasblasen liegt. Andere sterben an Embolien ohne äußere Merkmale, manche haben Gasbläschen in den Kiemen oder Schaum im Herzen.

Die Gasübersättigungen müssen aber nicht unbedingt im Teich herrschen. Setzt man Fische aus kälterem in deutlich wärmeres Wasser um, so bildet sich die Übersättigung direkt im Fisch. Dies passiert nicht selten unerfahrenen Aquarianern beim Wasserwechsel.

Eine thermisch bedingte Übersättigung geringen Ausmaßes entsteht auch, wenn zwei gesättigte (also im Luftgleichgewicht stehende) Wässer unterschiedlicher Temperatur gemischt werden, z.B. bei der Frischwasserzufuhr in Kreislaufanlagen. Das Wassergemisch erhält dann die mittlere Temperatur, bei der die Sättigungskonzentrationen jedoch geringer wären als die gleichzeitig entstehenden mittleren Konzentrationen der Gase. Die Gefährlichkeit der so entstehenden geringen Übersättigung hängt wieder davon ab, ob sie den Fischen über längere Zeit ununterbrochen präsentiert wird.

Bei weitem am häufigsten, vielfältigsten und gefährlichsten sind die **mechanisch bedingten Übersättigungen**. Sie beruhen darauf, dass die Gase dem Druck proportional löslich sind. Übersättigungen entstehen also in allen Fällen, wo Luft oder Reinsauerstoff unter einem höheren Druck als dem Luftdruck mit dem Wasser in Kontakt gebracht werden. Wir beobachten solche Übersättigungen fast überall, wo das Betriebswasser über Rohrleitungen verteilt wird. In der Regel zweigen die Rohre aus einem Verteilerbecken oder einem Tank ab und führen zu verstellbaren Auslässen (Schieber, Hähne) an den einzelnen Fischbecken. Lässt man das Wasser aus diesen Hähnen über einen Schlauch unter der Wasseroberfläche in das Becken einlaufen, so sieht man meistens auch Luftblasen aus dem Schlauchende austreten. Diese Luft war in der Leitung unter dem Strömungs- und Staudruck mit dem Wasser in Berührung und hat sich teilweise gelöst. Solches Wasser in einem Eimer aufgefangen lässt mit dem Saturometer einen positiven Differenzdruck zur Luft messen, enthält also eine Gesamtgas-Übersättigung.

Die Herkunft der Luft in der Leitung ist oft leicht erkennbar: sie wird am Beginn des Rohres im Verteilerbecken mit einem Strömungswirbel eingeblasen. Abhilfe kann ein Rohrkrümmer sein, der den Wassereinfluss so weit unter die Oberfläche legt, dass kein schlüpfender Wirbel mehr entsteht. Oft reguliert sich aber die Stauhöhe des Verteilerbeckens durch die Rohröffnungen. Dann hilft nur, die Rohrleitung durch ein offenes Gerinne zu ersetzen, z.B. eine Umlaufrinne im Bruthaus.

Häufig wird im Verteilerbecken mit Ausströmern belüftet. Auch hier liegt es nahe, dass ein Teil der aufsteigenden Luftblasen gleich mit in die Leitung gerissen wird. In diesem Fall kann eine trennende Scheibe aus Blech oder Kunststoff die Strömung umlenken.

Wir haben auch Rohrleitungen gefunden, die trotz absolut luftfreiem Wassereintritt an den Auslässen Luft spuckten und übersättigtes Wasser lieferten. Die Luft wurde durch den sog. Bernoulli-Effekt an den nicht völlig dichten Anschlussstellen zwischen den Rohrstücken eingesogen.

Die Rohrlänge ist weniger bedeutsam als der überwundene Höhenunterschied, somit der hydrostatische Druckunterschied zwischen den Rohrenden. Am Ende eines nur etwa 6 m langen Rohres mit 1,5m Höhenunterschied konnten wir mit dem Saturometer fast den theoretisch möglichen Übersättigungswert von 15% feststellen, tatsächlich 12,8%. Am Eintritt in das Rohr herrschte noch Gleichgewichtsdruck, also Saturometerdruck 0! Dieser Fall war besonders interessant, weil die Fische immer nur in sommerlichen Trockenzeiten an Gasblasen erkrankten, wenn der Bach wenig Wasser führte und in das Rohr auch Luft mit eintreten konnte. Für den Rest des Jahres lag der Rohreintritt in sicherer Tiefe unter der Wasseroberfläche des Baches und den Fischen ging es gut.

Von zunehmender Bedeutung sind Gasübersättigungen im Zusammenhang mit Belüftungstechniken, wobei die vermehrte Verwendung von reinem Sauerstoff zu theoretisch interessanten Ergebnissen führt. Aber schon eine gewöhnliche Belüftung mit Ausströmern führt zu schwer vorhersagbaren Sättigungen, weil zwei gegenläufige Vorgänge im Spiel sind.

- Um Luft oder Sauerstoff aus einem Ausströmer in das Wasser entweichen zu lassen, muss dieses Gas mindestens den Luftdruck plus den Tiefendruck des Wassers aufweisen. An den Grenzflächen der entstehenden Gasperlen stellt sich mit dem umgebenden Wasser ein diesem erhöhten Druck entsprechendes Lösungsgleichgewicht ein. Es entsteht also eine von der Tiefe abhängige Übersättigung.
- Die aufsteigenden Gasperlen nehmen das umgebende Wasser mit in Richtung Oberfläche (Mammutpumpe). Unterwegs nimmt der Druck in den Gasperlen entsprechend der Tiefe ab, so dass die Tendenz zur Bildung von Übersättigungen immer geringer wird. In der Tiefe übersättigtes und mit nach oben genommenes Wasser kann sogar wieder gelöste Gase an die Gasperlen abgeben.

Es hängt ab von der Tiefe des Ausströmers, der Stärke und Richtung der Wasserströmung und der Größe und Anzahl der aufsteigenden Gasperlen, welcher der beiden Prozesse überwiegt.

Sehr kleine Gasperlen haben im Verhältnis zu ihrem Volumen eine große Grenzfläche und damit eine große Diffusionsrate, sie steigen langsamer auf und haben aus diesen Gründen eine größere Lösungsrate in der Tiefe. Strömen sie in großer räumlicher Dichte aus, so wird das umgebende Wasser rasch der Tiefe entsprechend mit gelöstem Gas gesättigt, aber auch besonders effizient nach oben mitgenommen. Sind es dagegen nur wenige kleine Gasperlen, lösen sie sich möglicherweise ganz auf und die Mitnahme von Wasser zur Oberfläche kommt nicht zustande.

Große Gasperlen dagegen sind für den Gasaustausch sehr viel weniger effizient. Sie steigen viel schneller auf und reißen dadurch das Wasser stärker mit nach oben. Die verfügbare Zeit für Austauschvorgänge, gleich welcher Richtung, ist geringer.

Seit einigen Jahren werden Ausströmer gerne in U-Rohren oder konzentrischen Rohren von oft mehreren Metern Tiefe verwendet. Die große Tiefe dient einer Verlängerung der Kontaktzeit mit den aufsteigenden Gasperlen. Entsprechend höher sind aber auch die Lösungsdrücke, die zunächst erzeugt werden, und somit die Übersättigungen im Vergleich zum Luftdruck oder auch zum Druck in der maximalen Wassertiefe, die den Fischen in den nachgeschalteten Becken erreichbar ist.

Diese U-Rohr-Systeme können in zwei prinzipiell unterschiedlichen Weisen betrieben werden, mit der Strömung oder gegen die Strömung. Mit der Strömung soll bedeuten, dass das Wasser mit den Gasperlen aufsteigt. Gegenüber einer normalen Ausströmerbelüftung dient das U-Rohr nur dazu, eine größere Tiefe für den Ausströmer zur Verfügung zu stellen. Dies verlängert die Kontaktzeit zwischen Gas und Wasser und bringt einen höheren anfänglichen Lösungsdruck. Wie der Effekt tatsächlich ist, lässt sich nur im Einzelfall durch eine Messung mit dem Saturometer feststellen. Er hängt von den oben besprochenen Einzelheiten ab.

Gegen die Strömung würde bedeuten, den Ausströmer im absteigenden Wasserstrom anzubringen. Dann käme das Wasser zuerst mit Gasperlen geringen Drucks in Kontakt, aber beim weiteren Abstieg mit immer höher komprimiertem Gas bis hin zum Ausströmer. Folglich würde auf diesem Weg immer mehr Gas in Lösung gehen und könnte im Extremfall eine Gesamtsättigung erreichen, die dem Druck in der Ausströmertiefe entspricht. Diese Betriebsart muß zwangsläufig zu Gesamtübersättigungen führen.

Gerade in einem U-Rohr-System wurde durch Hofer beobachtet, dass eine massive Gasblasenerkrankung auftrat, wenn er Luft verwendete. Brachte er jedoch reinen Sauerstoff in das U-Rohr, so blieben seine Fische gesund. Daraus zog er den Schluss, dass eben doch Stickstoff die Gasblasen in den Fischen verursacht.

Es gibt jedoch für seine Beobachtung einen anderen physikalischen Grund. Die Austauschgeschwindigkeit eines Gases Zwischen Wasser und Gasraum hängt vom Molekulargewicht des Gases ab. Der schwerere Sauerstoff wechselt um ca. 7% langsamer die Seiten als der leichtere

Stickstoff. Verlässt eine reine Sauerstoffperle den Ausströmer, so werden pro Sekunde weniger Sauerstoffmoleküle anteilig (d.h. bezogen auf seinen Partialdruck) diese Gasperle ins Wasser verlassen, als anteilig Stickstoffmoleküle aus dem Wasser in die Gasperle eintreten.

Hat die Gasperle lange genug Kontaktzeit mit dem Wasser, so wird sich am Ende doch wieder ein Gleichgewicht mit dem Wasser einstellen – für Stickstoff etwas früher, für Sauerstoff um 7% später. Erreichen die aufsteigenden anfänglichen Sauerstoffperlen jedoch die Wasseroberfläche deutlich früher als sich das Gleichgewicht einstellen kann, dann wurde dem Wasser mehr Stickstoff-Partialdruck entzogen als neuer Sauerstoff-Partialdruck hinzugefügt. Es kommt also in der Summe zu einer Entsättigung des Wassers!

Es ist also eine Gratwanderung zwischen den verschiedenen Strömungs-, Tiefen-, Perlengrößen- und Begasungsintensitätsparametern, ob diese Anordnung für die Fische gefährlich wird. Hofer hatte Glück, sich in dem Bereich eingestellt zu haben, wo der Entlastungseffekt durch den Sauerstoff noch wirkte. Will man sich nicht auf das Glück verlassen sondern diesen Effekt zuverlässig nutzen, ohne die Fische bei notwendigen Veränderungen der aktuellen Einstellungen zu gefährden, so kommt man um eine Kontrolle mit einem Saturometer nicht herum.

Fischphysiologie und Übersättigung

Wir haben bisher nur die physikalischen Bedingungen für Entstehung und Wachstum von Gasblasen im freien Wasser oder einem technischen Hohlraum wie dem Saturometerschlauch behandelt. Gasblasen in Fischen, die sich in der Außenhaut bilden, also in Schuppentaschen oder zwischen den Flossenstrahlen, sind in einer sehr ähnlichen Situation.

Der wichtigste Vorgang, der von der Seite der Fische die Situation beeinflusst, ist die Atmung. Durch den Verbrauch an Sauerstoff sinkt dessen Partialdruck und damit die Drucksumme der gelösten Gase. Dies gilt, zumindest im sättigungsnahen Bereich, unabhängig davon, ob im einzelnen der Stickstoff, der Sauerstoff oder alle zusammen „übersättigt“ sind. Die Atmung zieht auf jeden Fall die Gesamtsättigung herab, möglicherweise auf ein Niveau unter dem Luftdruck.

Nun kommt es darauf an, wie weit sich die Atmung am Ort der Blasenbildung auswirken kann. Über die Kiemen diffundiert jedes Gas proportional seinem Partialdruck im Wasser in das Blut des Fisches. Dort sind zwar die Gleichgewichtskonzentrationen andere als im Wasser, aber die Partialdrücke sind bei Gleichgewicht dieselben in beiden Flüssigkeiten.

Das Blut kommt auf seinem Weg durch den Fischkörper zu den unterschiedlich stark atmenden Geweben und gibt dort unterschiedlich Sauerstoffdruck ab. Ein Teil des Blutes versorgt die Haut. Dort wirkt gleichzeitig Gasdiffusion durch die Haut, so dass die Übersättigung nicht wesentlich durch Gewebeatmung abgesenkt wird. Deshalb ist bei großen Fischen auch vor allem die Haut von der Erkrankung betroffen; die Wunden verpilzen später oft flächig.

Bei Fischbrut spielt im Gegensatz zu größeren Fischen die Diffusion der Gase durch die Außenhaut eine dominante Rolle. Es gibt kaum Stellen in der Tiefe des Körpers, an denen die Sättigung merklich abgesenkt ist. Deshalb kann man selbst bei schwachen Übersättigungen kleine Brütlinge finden, die insgesamt wie Luftballons aufgeblasen sind.

In hinreichend dicht besetzten Forellenteichen kann man oft am Zulauf mit dem Saturometer eine wie auch immer entstandene Übersättigung messen, am Ablauf jedoch durch den Verbrauch an Sauerstoff eine deutliche Untersättigung (negativer Saturometerdruck). Hier tritt in der Regel keine Gasblasenerkrankung der Fische auf, im Gegensatz zu Fällen, in denen am Ablauf noch positive oder nur ganz schwach negative Werte gemessen werden. Als Faustregel kann man hier sagen, dass der Mittelwert zwischen Zulauf- und Ablaufwert Null oder negativ sein muss. Dann leben die Fische in einem durchschnittlich nicht übersättigten Wasser.

Soweit die Sauerstoffversorgung in einem Teich gut ist, an dessen Ablauf noch Übersättigung gemessen wird, kann man den Wasserdurchlauf verringern. Damit wird durch die Atmung der Fische der Sauerstoffdruck stärker vermindert, so dass der Ablauf in den Bereich der Untersättigung gebracht werden kann.

Unterschiede finden sich auch durch das Verhalten verschiedener Fischarten. So bleiben oft Bachforellen verschont, die den Aufenthalt in Bodennähe bevorzugen, wo ein größerer mechanischer Druck herrscht, so dass je Tiefenmeter ca. 10% Gesamtübersättigung im mechanischen Gleichgewicht mit dem Druck in dortigen Gasräumen stünde. Die gleiche Erklärung gilt auch für die scheinbar geringere „Empfindlichkeit“ von Karpfen. Für Regenbogenforellen, die sich meist nahe der Oberfläche aufhalten, sind dagegen schon geringere Übersättigungen gefährlich. Auch sind flache Brutrinnen selbst für Bachforellen gefährlicher als tiefe Brutbecken. Allerdings sollten Übersättigungen ohnehin beseitigt werden.

Vermeidung und Beseitigung von Übersättigungen

Zur Vermeidung von Übersättigungen wurde im Prinzip mit der Darstellung ihrer typischen Ursachen beigetragen. Freilich sind einige dieser Ursachen im Einzelfall unvermeidlich vorgegeben. Dann muss eine Übersättigung beseitigt werden.

MARSH und GORHAM hatten schon das heute noch immer gängigste Prinzip vorgeschlagen, mit dem Wasser von vorhandenen Übersättigungen befreit werden kann, nämlich die Verrieselung. Das Wasser wird möglichst fein verteilt und mit Luft von Umgebungsdruck in Berührung gebracht. Dadurch nähert der Gehalt aller gelösten Gase einem Gleichgewichtszustand mit der Luft an. Übersättigungen werden vermindert, Sauerstoffmangel wird aufgefüllt.

Es kommt bei der Verrieselung auf eine möglichst große Oberfläche des Wassers an, und sie soll über möglichst lange Zeit bestehen. Der Gasaustausch ist direkt dem Produkt aus Oberfläche mal Zeit proportional, außerdem noch dem Partialdruck-Unterschied jedes Gases zwischen Luft und Wasser.

Unterschiedliche technische Ausführungen sind möglich. MARSH und GORHAM beschrieben eine Kaskade aus gekreuzten Holzlattenrosten. Daraus wurden später Lochblechkaskaden, „Lockenwickler“-Blöcke oder Füllkörpersäulen. Im Kleinen bewähren sich auch Beckenzuläufe über Gießkannenköpfe. Andere Varianten der Verrieselung stellen Oberflächenbelüfter dar, wie z.B. Paddelräder und Propellerbelüfter.

Bei Kaskaden fanden wir immer wieder, dass die anfängliche Verteilung des Wassers nicht erhalten bleibt. Der Wasserfall verengt sich nach unten und große Flächen in der Kaskade bleiben ungenutzt. Die Ursache ist eine zu geringe Stauung des Wassers. Theoretisch sollte es sich auf jeder Kaskadenstufe erst wieder über die ganze Fläche verteilen müssen. Weniger und kleinere Löcher bewirken dies. Das Einlegen von Folien in die Lochblechmitten ist ein relativ wirksamer Notbehelf. Insgesamt läuft nun das Wasser mit mehr Oberfläche in mehreren Einzelsträngen und bekommt zusätzlich eine längere Kontaktzeit mit der Luft.

Das Kohlensäure-Problem bei der Belüftung.

Durch alle Methoden der Verrieselung wird in der Regel auch der Kohlendioxid-Gehalt des Wassers vermindert. Da die Luft nur 0,03% Kohlendioxid enthält, liegt die Gleichgewichtskonzentration daher je nach Temperatur bei nur 0,5mg/l bis 1 mg/l. Dieser Kohlensäureverlust führt zu einer deutlichen Steigerung des pH-Wertes im Wasser, wodurch die Ammoniak-Ausscheidung der Fische behindert wird. Ferner kann bei zu geringer Kohlensäure schon ein leichter Mangel an Sauerstoff einen Teufelskreis im Fisch auslösen, der durch eine Alkalose im Blut zu einer Kiemenentzündung führt.

Bei Kaskaden lässt der Kohlensäureverlust recht gezielt steuern. Zuerst wird mit einem Becher und einem pH-Meter bestimmt, auf welcher Höhe in der Kaskade die gewünschte Konzentration an Kohlendioxid bzw. der gewünschte pH-Wert erreicht ist. Der Luftraum in der Kaskade hätte auf dieser Höhe einen Kohlendioxidanteil, der mit den gewünschten Verhältnissen im Wasser im Gleichgewicht wäre. Dazu muss man aber verhindern, dass diese Luft seitlich oder nach unten herausströmt, wie es diese angereicherte Luft aufgrund ihrer größeren Dichte tun würde. Man befestigt ab dieser Höhe einen Mantel aus Baufolie, der unten in das Wasser des Sammelbeckens eintaucht. Nach oben bleibt das System offen. So kann von oben der nötige Sauerstoff hereinkommen und ausgetretener Gasüberdruck frei entweichen. Aber im ummantelten Bereich bildet sich eine im gewünschten Maß mit Kohlendioxid angereicherte Luft und der pH des Wassers bleibt ab dieser Kaskadenstufe unverändert.

Für Propeller- und Schaufelradbelüfter sind seit einigen Jahren Umhausungen auf dem Markt. Sie dienen in der Regel dem Einbringen von reinem Sauerstoff. Nebenbei halten sie aber auch das Kohlendioxid gefangen, und das selbst wenn man sie nicht mit Sauerstoff speist, sondern normaler Luft den druckfreien Zutritt erlaubt. Die gezielte Beeinflussung der Kohlensäure ist hier zwar nicht möglich, aber meistens auch nicht nötig.

Literaturverzeichnis:

- Baath,Ch.,Bauer,K.,Weikel,J.,Wiedemann,H.,Wizigmann,G. 1989. Einfluß von Gasübersättigungen des Wassers auf Infektionskrankheiten bei Regenbogenforellen. in K.Lillelund, H.Rosenthal.Fish Health Protection Strategies" Hamburg/Bonn BMFT
- Bohl,M., Gasblasenkrankheit der Fische. Tierärztl. Praxis 25(1997) 284-8
- Fickeisen,D.H., Schneider,M.J., Wedemeyer,G.A.. 1980 Gas Bubble Disease. Trans.Am.Fish.Soc. 109,(6),657 - 771
- Höning,J.,W.Hoffmann, W.Scholl. Zur Gasblasenkrankheit bei Fischen. Fischer und Teichwirt 9 (1979) 116-120
- Knösche,R., 1985 Probleme der Gasblasenkrankheit bei der intensiven Fischproduktion. Zeitschr. f.d. Binnenfischerei der DDR 2, 44 - 50
- Krise,W.F.,Meade,J.W., 1988. Effects of low-level gas supersaturation on lake trout (*Salvelinus namaycush*). Can.J.Fish.Aquat.Sci. 45:666-674
- Kuhlmann,H., Zur Gasblasenkrankheit der Fische. Der Fischwirt 37(1987/12): 87-88
- Leyendecker,W.E.,1969. Fish tolerance to Dissolved Nitrogen. Thesis, New Mexico State University
- Mohr,A., 1982 Gasübersättigung und Gasblasenkrankheit. Fischer und Teichwirt
- Marsh,M.C.,Gorham,F.P., (1905) The gas disease in fishes. Report U.S.Bur.Fish. 1904, 343-376 - **Die Pionierarbeit zum Thema**
- Weitkamp,D.E.,Katz,M., 1980. A review of Dissolved Gas Supersaturation Literature. Trans.Am.Fish.Soc. 109: 659-702