

Optimierung eines Verfahrens zum Sauerstoffeintrag für Anlagen der Fischintensivzucht

Anja Gerbeth, Bernhard Gemende, Andreas von Bresinsky, Ralf-Peter Busse, Rüdiger Lange

1 Einleitung

Als Reaktion auf die zunehmende Überfischung der Binnengewässer und Weltmeere und damit der sinkenden Verfügbarkeit hochwertiger Fischerzeugnisse bei gleichzeitig steigendem Bedarf und zunehmender Nachfrage wurde in den vergangenen Jahren vermehrt dazu übergegangen, Aquakulturanlagen für die industrielle Fischzucht zu planen und zu errichten. In den Industriestaaten handelt es sich dabei nahezu ausschließlich um so genannte geschlossene Kreislaufanlagen, in denen das Wasser, das zur Fischproduktion eingesetzt wird, ständig gereinigt und im Kreislauf geführt wird. Neben den ökologischen Vorteilen – insbesondere der Vermeidung stark nährstoffbelasteter Abwässer – bieten diese Anlagen viele weitere Vorteile. Zum einen ist der Frischwasserbedarf sehr niedrig – was zur Schonung der natürlichen Ressourcen aber auch zur Senkung der Kosten beiträgt – zum anderen ist es in derartigen Anlagen möglich, unter vollständig kontrollierten Bedingungen (Temperatur, Wasserparameter) ganzjährig – teils in mehreren Produktionszyklen – unabhängig von den klimatischen Bedingungen am Standort hochwertigen Speisefisch zu produzieren. Aufgrund ökonomischer (hohe Grundstückspreise, mangelndes Flächenangebot) sowie technischer Überlegungen ist die einzige Möglichkeit zur Steigerung der Produktivität derartiger Anlagen die Erhöhung der Besatzdichte (Anzahl/Masse Fisch je produziertem Wasservolumen). Ein besonders sensibles Problem stellt in diesem Zusammenhang der Eintrag ausreichender Mengen des von den Fischen benötigten Sauerstoffs in das Haltungswasser dar.

In der vorliegenden Publikation werden erste Ergebnisse der durch die Westsächsische Hochschule in Zusammenarbeit mit der Busse GmbH und dem Fischwirtschaftsbetrieb Andreas von Bresinsky in der Aquakultur-Kreislaufanlage Thierbach durchgeführten Arbeiten zur Dimensionierung, Umsetzung und Optimierung eines Prototyps eines so genannten „Sauerstoffreaktors“ vorgestellt.

2 Grundlagen

2.1 Ansprüche an die Sauerstoffgehalte und Sauerstoffbedarf von Fischen

Die Ansprüche an die Sauerstoffgehalte variieren für verschiedene Fischarten deutlich. Allgemein gültiger Anhaltswert kann ein optimaler Bereich zwischen ca. 7,0 mg/l und 30 mg/l gelöstem Sauerstoff angegeben werden.

Forellen- und barschartige Fische haben höhere Ansprüche an den Sauerstoffgehalt im Wasser (kritischer Bereich unter 4,0 mg/l), als stör-, aal- und welsartige Fische (kritischer Bereich unter 3,0 mg/l) oder karpfenartige (Bereich unter 2,0 mg/l).

Der Sauerstoffbedarf hängt zusätzlich maßgeblich von der Wassertemperatur und der Stoffwechselintensität der Fische ab. So beträgt der Sauerstoffbedarf von Karpfen und Forellen im Grundstoffwechsel in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen 0,5 mg/(kg h) und 100 mg/(kg h), kann aber im Aktivitätsstoffwechsel auf bis zu 470 mg/(kg h) ansteigen.

Chronischer Sauerstoffmangel führt zu Wachstumsdepressionen, schlechter Kondition der Fische und erhöhter Anfälligkeit für Infektionskrankheiten. Fische reagieren auf akuten Sauerstoffmangel (Konzentrationen < 4 mg/l bei Forellen und < 2 mg/l bei Karpfen) mit Unruhe, Nahrungsverweigerung, Masseverlusten und Notatmung. Sinkt die Sauerstoffkonzentration weiter ab (Konzentrationen < 1,5 mg/l bei Forellen und < 0,5 mg/l bei Karpfen), reichen auch die körpereigenen Anpassungsmechanismen (u. a. Erhöhung der Erythrozytenzahl und des Hämoglobingehaltes im Blut) nicht mehr zum Überleben aus und die Fische sterben an Energiemangel.

Fische haben mit 60 % bis 80 % einen wesentlich höheren Ausnutzungsgrad des vorhandenen Sauerstoffs als andere Lebewesen. Trotzdem ist akuter oder chronischer Sauerstoffmangel eine häufige Schädigungs- und sogar Todesursache bei Fischen. [SCHRECKENBACH, 2002]

2.2 Sauerstoffeintragsmethoden in der Fischzucht

Grundsätzlich unterscheidet man zwei technische Lösungsvarianten für den Sauerstoffeintrag. Bei der Belüftung (engl. aeration) stammt der Sauerstoff aus der Umgebungsluft. Bei der Begasung (engl. oxygenation) dagegen wird Reinsauerstoff in das Medium eingetragen. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile.

Während bei der Belüftung die Mehrzahl der technischen Umsetzungen relativ einfach ist – in der Regel wird maximal ein Kompressor benötigt, liegen bei der Begasung häufig technisch aufwendige Umsetzungsvarianten, unter Nutzung von Verdichtern, Druckbehältern etc., vor. Die Handhabung von technisch reinem Sauerstoff setzt zudem zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen (ausschließliche Verwendung öl- und fettfreier Armaturen, Ventile etc., spezielle Dichtungen) voraus. Zusätzlich ist zu beachten, dass eine Bevorratung mit Reinsauerstoff – in Form von Druckgasflaschen oder Lagertanks – erfolgen muss. Alternativ dazu wurden in den vergangenen Jahren vermehrt auch kleine und mittlere Anlagen zur Luftzerlegung – primär zunächst für den Einsatz in Abwasserbehandlungsanlagen (Sauerstoffeintrag in Belebungsbecken) – entwickelt, mit denen der benötigte Sauerstoff direkt vor Ort erzeugt werden kann (siehe dazu u. a. [WWW.AIRPRODUCTS.DE, 2008]).

Allen genannten Nachteilen steht jedoch ein entscheidender Vorteil gegenüber: Bei der Belüftung wird stets nur die Gleichgewichtskonzentration, die dem aktuellen Sauerstoffpartialdruck der Luft entspricht, erreicht. In Tab. 1 sind einige Sättigungskonzentrationen von Wasser in Abhängigkeit von dessen Temperatur bei Normaldruck (1013,25 hPa) angegeben.

Tab. 1: Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur ($p = 760$ mm Hg) [LEWIS, 2006]

Temperatur (in °C)	Sättigungskonzentration (in mg/l)
0	14,6
10	11,3
20	9,1
25	8,2
30	7,5

Zu beachten ist zusätzlich, dass die angegebenen Werte nur für Süßwasser gelten. Mit steigendem Salzgehalt sinkt die Sauerstofflöslichkeit. Entsprechende Korrekturfaktoren können der Literatur (z. B. [LEWIS, 2006]) entnommen werden.

Bei Einsatz von Reinsauerstoff ist die erreichbare maximale Sättigung bei gleichen Temperatur- und Druckverhältnissen ca. fünfmal so hoch. (Ursache ist die Tatsache, dass der Sauerstoffanteil in natürlicher Luft nur 20,95 Vol.-% beträgt).

Technische Einrichtungen zur Belüftung und Begasung von Wasser sind – auch für den Einsatz in industriellen Fischzuchtanlagen – Stand der Technik.

Die einfachste Variante ist die Verwendung von Rieselnkaskaden oder Füllkörperkolonnen. Das mit Sauerstoff anzureichernde Wasser fließt dabei über treppenförmige Anordnungen bzw. Füllkörper in einer Kolonne. An der dabei erzeugten großen Kontaktfläche erfolgt der Gasaustausch mit der Umgebungsluft. Vorteile derartiger Anlagen sind ihre Einfachheit und die Tatsache, dass zusätzlich eine effektive CO₂-Entgasung realisiert wird. Nachteilig sind insbesondere der hohe Platzbedarf bzw. die geringen Durchflussvolumina bei gleichzeitig auf die Gleichgewichtskonzentration mit der Umgebungsluft beschränkter maximaler Sättigung. Für Aquakulturanlagen sind derartige Systeme daher nur sehr bedingt geeignet.

Eine in der Fischzucht – insbesondere in der Teichwirtschaft – häufig eingesetzte Variante sind Oberflächenbelüfter in verschiedenen Bauweisen (z. B. Sprüh-, Schaufelrad-, Propellerbelüfter). Ihr Funktionsprinzip beruht auf der Bewegung der Wasseroberfläche und damit der Intensivierung des Kontaktes mit der Umgebungsluft. Werden diese Bauvarianten mit einer geschlossenen Abdeckung, unter der eine Reinsauerstoffatmosphäre vorliegt, kombiniert, ist prinzipiell auch eine Begasung möglich. Nachteilig im Hinblick auf den Einsatz in der Aquakultur ist die Erzeugung relativ starker Strömungen in den Becken sowie ggf. das Verletzungsrisiko für die Fische (Kontakt mit beweglichen Teilen). Gleiches gilt prinzipiell für die so genannten Aspiratoren (Sauglüfter), bei denen durch die Strömung des Wassers ein Unterdruck erzeugt und Luft (seltener auch Sauerstoff) mit dem strömenden Medium vermischt wird.

Eine weitere, technisch relativ einfache Variante, die sowohl für die Belüftung als auch die Begasung genutzt werden kann, ist der Einsatz von Diffusoren oder Ausströmern. Dabei handelt es sich entweder um Bauteile aus Sinterwerkstoffen (Keramik, diverse Kunststoffe), deren Vorteil die

Möglichkeit der Erzeugung sehr feiner Bläschen ist, oder um so genannte Membranbelüfter, bei denen perforierte flächige Kunststoffmembranen oder Kunststoffschläuche eingesetzt werden. Die letztgenannten Systeme sind insbesondere aus der Abwasserbehandlung (Einsatz zur Belüftung in Belebungsbecken kommunaler Kläranlagen) bekannt. Nachteilig sind bei Einsatz von Diffusoren insbesondere der hohe Platzbedarf im Becken, die häufig unzureichende Ausnutzung des eingetragenen Gases (zu große Blasen und zu geringe Kontaktzeiten für einen effektiven Gasaustausch) sowie die Verschmutzungsneigung (besonders bei Sinterwerkstoffen) und der Energiebedarf zur Überwindung der Druckverluste.

Zusätzlich zu den genannten existieren spezielle Verfahren, mit denen zwar enorm hohe Sauerstoffsättigungen des behandelten Wassers erreicht werden können, die aber auch mit erheblichem apparatetechnischen Aufwand und damit hohen Investitions- und Instandhaltungskosten sowie einem großen Energiebedarf verbunden sind. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang u. a. Füllkörperkolonnen mit Druckbeaufschlagung, Kaskaden-Oxygenatoren und das Tiefschichtverfahren [LOSORDO ET AL., 1999].

3 Umsetzung einer Verfahrensvariante zur hydrodynamischen Begasung

Die Aquakultur-Kreislaufanlage Thierbach wurde im November 2006 in Betrieb genommen. Sie dient im Wesentlichen der Brutaufzucht und der Produktion von Setzlingen. In der Anlage werden Süßwasserfische, wie Stör, Zander, Tilapien und Karpfen, gehalten.

Die Anlage besteht aus unterschiedlichen Produktionsstufen: angefangen von einer Brutanlage, in der die Fischeier, die teils von eigenen Zuchttieren stammen und teils zugekauft werden, erbrütet werden, über eine Anlage mit Glasbecken, in denen die Brütlinge bis zur Größe von Fingerlingen heranwachsen, bis hin zu Becken unterschiedlicher Größe (10 Langstrombecken mit einem Volumen von 5 m³ und 6 Rundbecken mit einem Volumen von 20 m³) in denen die Fische der Setzlingsgröße gehalten werden (für weitere Informationen – insbesondere zum angewandten Verfahren der Wasserreinigung vgl. u. a. [PAUSCH ET AL., 2006], [GEMENDE ET AL., 2006] und [GEMENDE ET AL., 2008]).

Der Sauerstoffeintrag in den ersten beiden Anlagenstufen erfolgt auf konventionelle Weise über Ausströmer aus poröser Keramik oder Sinterkunststoff bzw. über Schlauchbelüfter (Kunststoffschläuche mit Öffnungen definierter Größe). Die im Folgenden beschriebenen „Sauerstoffreaktoren“ kommen an den Langstrom- (jeweils einer pro Becken) und Rundstrombecken (jeweils zwei pro Becken) zum Einsatz.

3.1 Entwicklung und Optimierung des Prototyps eines „Sauerstoffreaktors“

Zur Realisierung des Eintrages von Sauerstoff wird im vorliegenden Projekt das Prinzip der hydrodynamischen Begasung genutzt. Dessen Grundprinzip ist die Erzeugung eines möglichst innigen Kontaktes zwischen dem zu begasenden Medium und einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre.

In dem entwickelten Sauerstoffreaktor wird das sauerstoffarme, mit Kohlendioxid angereicherte Wasser mittels einer Pumpe aus dem Fischhaltungsbecken durch einen Ausströmer in einen Behälter gepumpt, in dem sich eine Reinsauerstoffatmosphäre unter leichtem Überdruck (ca. 0,2 bar bis 0,25 bar) befindet.

Das Wasser wird durch einen Ausströmer transportiert und in der Sauerstoffatmosphäre fein verteilt. Die Form der Ausströmer ist dabei variabel – getestet wurden neben dem einfachen geraden Freistrahle auch verschiedene Düsen und Injektoren. Ebenso ist die Geometrie der Ausströmeranordnung prinzipiell variabel (Richtung des Auslaufs, Verwendung von Prallflächen).

In den Prototypen der 1. Baustufe (vgl. Abb. 1) wurde zunächst ein einfacher Freistrahle gewählt. Das Wasser wird gegen eine am Behälterdeckel angebrachte Prallplatte gespritzt und dabei fein verteilt. Dies ermöglicht einen intensiven Kontakt sowie eine lange Kontaktzeit des Wassers mit der Sauerstoffatmosphäre. Der Boden des Behälters ist geneigt, der Wasserrücklauf befindet sich an der tiefsten Stelle. Auf diese Weise kann der unerwünschten Ablagerung von Bakterienbiomasse und Feststoffpartikeln, die sich im Fischhaltungswasser befinden, weitgehend entgegengewirkt werden.

Zur Kontrolle des Füllstandes dient ein Klappschwimmerschalter. Beim Erreichen eines entsprechenden Wasserfüllstandes wird ein Ventil angesteuert und Sauerstoff (aus einer Druckgasflasche) in den Reaktor zugeführt. Um die zusätzliche visuelle Kontrolle des Füllstandes – insbesondere bei Störungen – zu ermöglichen, ist an der Außenseite des Reaktors ein durchsichtiger Kunststoffschlauch angebracht.

Am Deckel des Reaktors befindet sich ein zusätzliches Magnetventil. Dieses wird in definierten Abständen geöffnet, um das gesamte im Behälter befindliche Gas abzulassen. Notwendig ist dies, da sich in der Gasatmosphäre Kohlendioxid und weitere störende Gaskomponenten anreichern.

Das Grundteil des Reaktors ist aus PVC-Material gefertigt; Verrohrungen, Anschlüsse u. ä. wurden im Wesentlichen unter Einsatz kommerzieller Bauteile (insbesondere PVC-Halbzeuge) realisiert.

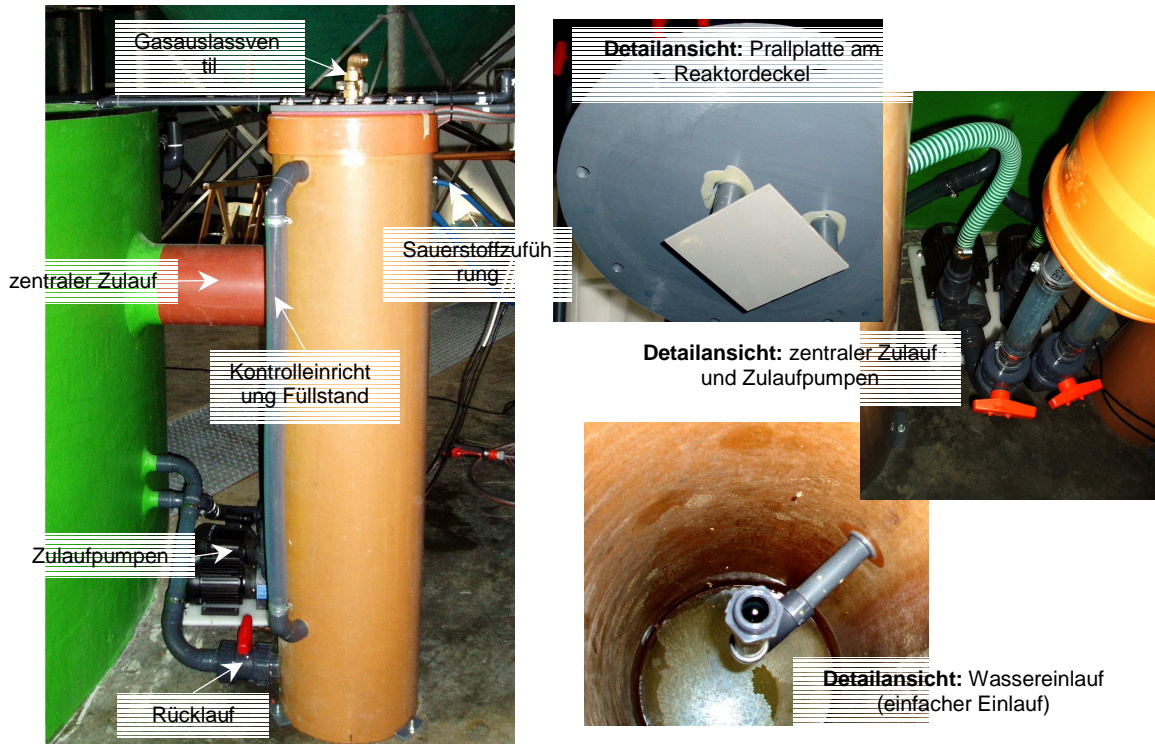


Abb. 1: Sauerstoffreaktor (Prototyp 1. Baustufe) – Gesamtansicht (links) und Detailansichten einzelner Baugruppen (rechts)

Mit den beschriebenen Reaktoren ist es möglich, einen Wasservolumenstrom von bis zu $10 \text{ m}^3/\text{h}$ zu realisieren. Dabei wird eine Sauerstoffsättigung von ca. 250 % im behandelten Wasser erreicht (dies entspricht bei einer Wassertemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ einer Sauerstoffkonzentration von $20,5 \text{ mg/l}$ bei einem Druck von $1013,25 \text{ hPa}$).

In Langzeitversuchen konnte gezeigt werden, dass es mit den entwickelten Reaktoren möglich ist, eine ausreichende Sauerstoffkonzentration in den Fischhaltungsbecken (bei moderat niedrigem bis mittlerem Fischbesatz) aufrecht zu erhalten.

3.2 Entwicklung und Optimierung der Prozess-Steuerung und -Regeltechnik

Neben der Optimierung des Sauerstoffreaktors liegt besonderes Augenmerk auf der Entwicklung und Umsetzung einer zuverlässigen Steuer- und Regeltechnik für den Prozess. Abb. 2 gibt einen schematischen Überblick über die Gesamtanlage zur hydrodynamischen Begasung – einschließlich der Kennzeichnung der entsprechenden Steuer- und Regelgrößen.

Die Ansteuerung der Pumpe, die das Wasser aus dem Becken in den Sauerstoffreaktor fördert, erfolgt in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Becken. Hierbei kann eine entsprechende Sollkonzentration – die in der Regel zwischen 80 % und 100 % Sättigung liegt – eingestellt werden. Fällt der Messwert, der über eine oder mehrere Sauerstoffsonden im Becken ermittelt wird, unter diesen Sollwert, wird die Pumpe zugeschaltet. Dies hat den Vorteil, dass die Umwälzung des Wassers nur im Bedarfsfall erfolgt und damit Energiekosten gespart sowie der Sauerstoffverbrauch auf das benötigte Minimum reduziert werden kann.

Über das Signal der Füllstandssonde wird die Einleitung des Reinsauerstoffs in den Reaktor geregelt, indem ein entsprechendes Magnetventil angesteuert wird, wenn der kritische Wasserstand erreicht wird. Physikalischer Hintergrund ist dabei, dass der Gasdruck im Behälter ab- und damit der

Wasserstand zunimmt, wenn Sauerstoff in Lösung geht. Der Sauerstoff wird also tatsächlich bedarfsgerecht zudosiert.

Die Öffnung des Magnetventils zum Ablassen der im Reaktor befindlichen Gasphase wird gegenwärtig noch zeitgetaktet gesteuert. An der Umsetzung einer alternativen, auf der Erfassung der CO_2 -Konzentration in der im Behälter befindlichen Gasatmosphäre beruhenden Regelung für den Gasablass wird gearbeitet.

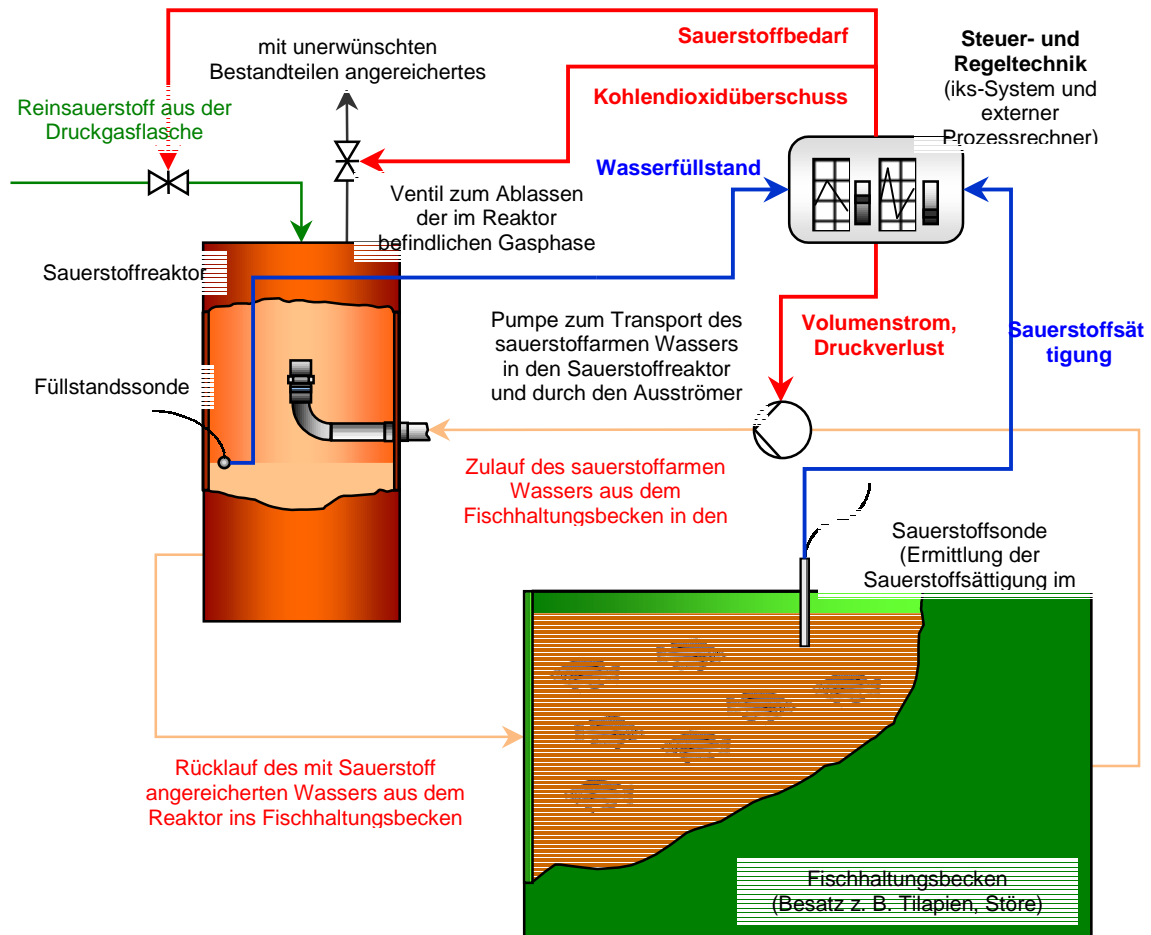


Abb. 2: Schematische Darstellung der Gesamtanlage zur hydrodynamischen Begasung mit Kennzeichnung der Steuer- und Regelgrößen

Die Erfassung der Regelgrößen erfolgt über entsprechende Sonden und Module der Firma iks, die Signale werden auf einem externen Prozessrechner verarbeitet, über den auch die Steuerung des Gesamtprozesses erfolgt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In Zusammenarbeit zwischen der WHZ, der Busse GmbH und dem Fischwirtschaftsbetrieb Andreas von Bresinsky wurde ein Prototyp eines Reaktors zum Eintrag von Sauerstoff nach dem Prinzip der hydrodynamischen Begasung dimensioniert, gefertigt und in der ersten Ausbaustufe erfolgreich in der Aquakultur-Kreislaufanlage Thierbach eingesetzt.

Gegenwärtig laufen Untersuchungen zur Verbesserung der Steuer- und Regeltechnik – z. B. der Optimierung der Austauschzyklen der Gasphase im Behälter. Aktuelle Versuche konzentrieren sich zudem auf den vergleichenden Test unterschiedlicher Ausströmer und Injektoren.

Weitere Ansatzpunkte – auch für Folgeprojekte – bietet die Fragestellung der Umsetzung einer optimierten Entgasung (Entfernung des im Fischhaltungswasser angereicherten Kohlendioxids vor der erneuten Sauerstoffanreicherung). Entsprechende Untersuchungen laufen derzeit ebenfalls.

5 Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten sind Bestandteil des durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) geförderten Projektes „Dimensionierung und Umsetzung eines optimierten Verfahrens zum Sauerstoffeintrag für Anlagen der Intensivfischzucht“ (FKZ KF0266301UL5). Unser besonderer Dank gilt der Projektbegleiterin Frau Dipl.-Chem. Ursula Liebing für ihre stete Unterstützung und Diskussionsbereitschaft.

Für die Mitarbeit bei den experimentellen Arbeiten danken möchten wir den im Rahmen ihrer Praktika und als Diplomanden am Projekt beteiligten Studierenden der Westsächsischen Hochschule Zwickau – namentlich insbesondere Dipl.-Ing. (FH) Torsten Schramm sowie Ralf Heinke und Alexander Zschocke.

6 Literatur

GEMENDE, B.; GERBETH, A.; PAUSCH, N.; VON BRESINSKY, A.; MÜLLER, R. H.: Alternative water treatment in recirculating aquaculture systems using ammonium assimilation ability of bacteria. International Symposium on Environmental Biotechnology (Posterpräsentation), Leipzig, 09.-13.07.2006.

GEMENDE, B.; GERBETH, A.; PAUSCH, N.; VON BRESINSKY, A.: Tests for the application of membrane technology in a new method for intensive aquaculture. *Desalination* **224** (2008), 57-63.

LEWIS, M. E.: Dissolved Oxygen. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A6, section 6.2 (Version 2.1), Juni 2006.

(URL: http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/6.2_v2.1.pdf; Stand 22.07.2008)

LOSORDO, T. M.; MASSER, M. P.; RAKOCY, J. E.: Recirculation aquaculture tank production systems – A review of component options. SRAC Publication No. 453, 1999.

PAUSCH, N.; GERBETH, A.; GEMENDE, B.; VEIT, M.; KEMBOLO, K.; VON BRESINSKY, A.; MÜLLER, R. H.: Untersuchungen zum Prozessverhalten eines neuen Verfahrens zur Wasserreinigung in der Intensivfischzucht. EU Sokrates Intensiv-Programm „Distributed Power Generation Systems“, Pernink, 23.-25.05.2006.

SCHRECKENBACH, K.: Einfluss von Umwelt und Ernährung bei der Aufzucht und beim Besatz von Fischen. VDSF-Schriftenreihe Fischerei & Naturschutz Nr. 4 (2002) 55-73.

WWW.AIRPRODUCTS.DE: Website der Firma Air Products GmbH (Hochleistungs-Belüftung mit Oxy-Dep™ VSA); Stand 22.07.2008.

7 Adressen der Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Anja Gerbeth, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Gemende

Fachbereich Physikalische Technik/Informatik

Westsächsische Hochschule Zwickau

Postfach 201037, D-08012 Zwickau

Telefon: +49-375/536-1787 (1501); Fax: 1503; E-Mail: bernhard.gemende@fh-zwickau.de

Andreas von Bresinsky

Fischwirtschaftsbetrieb Andreas von Bresinsky

Am Heiligen Holz 2, D-04552 Borna/OT Eula

Telefon: +49-3433/2451-22; Fax: +49-3433/2451-23; E-Mail: a.v.bresinsky@arcor.de

Dipl.-Ing. Ralf-Peter Busse

Busse GmbH

Zaucheweg 6, D-04316 Leipzig

Telefon: +49-341/65984-0; Fax: +49-341/65984-10; E-Mail: info@busse-gmbh.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Lange

Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

D-01062 Dresden

Telefon: +49-351/436-35181, Fax: 37057; E-Mail: ruediger.lange@tu-dresden.de