



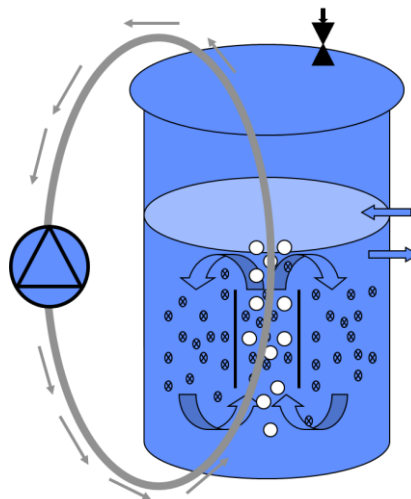
„Förderinitiative Aquakultur: Entwicklung eines Verfahrens zur Denitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung unter Verwendung eines modifizierten Niedrigenergie-Mooving-bed-Filters“

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ 28133

Gefördert durch die

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Osnabrück



Projektleitung: Dr. Andreas Müller-Belecke

Bearbeiter: M.Sc. Sebastian Kaufhold
Dipl. Päd. Christa Thürmer
FWM Steffen Zienert
HWM Ulrich Spranger (Fa. Kunststoff-Spranger GmbH)
Dipl. Ing. Andreas Spranger (Fa. Kunststoff-Spranger GmbH)

Potsdam, Mai 2012

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	28133	Referat	23	Fördersumme	50.925 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	-----------------

Antragstitel Förderinitiative Aquakultur: Entwicklung eines Verfahrens zur Denitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung unter Verwendung eines modifizierten Niedrigenergie-Moving-bed-Filters

Stichworte Aquakultur, Kreislauf, Wasser, Nährstoff, Stickstoff, Denitrifikation

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
21 Monate	01.06.2010	29.02.2012	1

Zwischenberichte
(-)

Bewilligungsempfänger	Institut für Binnenfischerei e. V. Potsdam-Sacrow (IfB) Im Königswald 2 14469 Potsdam	Tel.	033201 40610
		Fax	033201 40640
		Projektleitung	Dr. A. Müller-Belecke
		Mitbearbeiter	S. Kaufhold, S. Zienert, Chr. Thürmer

Kooperationspartner Kunststoff-Spranger GmbH
Reißiger Gewerbering 9
08525 Plauen
U. Spranger, A. Spranger

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der nachhaltigen Intensivierung der Fischerzeugung durch den Einsatz geschlossener Kreislaufanlagen (KLA) wird weltweit eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Gibt es mittlerweile praxismgerechte technische Lösungen für die Aufrechterhaltung günstiger Werte für die meisten Wasserparameter, so stellt die Anreicherung von Nitrat, insbesondere in KLA für die Erzeugung von auf diesen Parameter sensiblen reagierender Spezies ein Problem dar. In der Praxis werden hohe Nitratkonzentrationen zumeist über das wenig nachhaltige Ausverdünnen durch erheblichen Frischwassereinsatz umgangen. Bei bisherigen Ansätzen zur Denitrifikation in KLA ergeben sich häufig Probleme durch die zur Aufrechterhaltung anoxischer Bedingungen stets gering zu haltende hydraulische Beaufschlagung der Reaktoren. Das Verschlammen der Filtermatrix mit Bakterienbiomasse behindert hier die Einstellung stabiler Betriebsbedingungen. Entsprechende Denitrifikationsreaktoren müssen stets aufwendig rückgespült werden. Mit dem Ziel der Entwicklung einer wartungsarmen Denitrifikationsstufe für KLA wurde ein Fließbettfilter mit schwimmenden Aufwuchskörpern (Moving bed-Filter) als geschlossenes System konzipiert. Das Aufwuchskörperbett wird hier mit dem sich im Reaktor bildenden, sauerstoffarmen Innertgas rezirkuliert.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Ein von der Fa. Kunststoff-Spranger GmbH nach den Vorgaben des Instituts für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow (IfB) konstruierter Selbstreinigender Innertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor) wurde am IfB an eine geschlossene Kreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab zur Haltung von Zandern (*Sander lucioperca*) angeschlossen. Diese Spezies induziert $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen oberhalb etwa $68 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ durch reduzierte Futteraufnahme. Der SID-Reaktor wurde mit unterschiedlichen C-Quellen (Ethanol vergällt, Methanol, Essigsäure, Glycerin) und wechselnder hydraulischer Beaufschlagung betrieben. Zentrale Wasserparameter, Medienverbräuche, Wartungsaufwand sowie das Futteraufnahmeverhalten des Zanderbestandes wurden erhoben.

Ergebnisse und Diskussion

Ein Verschlammen des Aufwuchskörperbettes mit Bakterienbiomasse konnte bereits durch Innertgasrezirkulation für $2 \times 40 \text{ sec} \cdot \text{h}^{-1}$ sicher und mit marginalem Energieaufwand vermieden werden. Ein kontinuierlicher und wartungsarmer Denitrifikationsbetrieb konnte so sichergestellt werden. Mit Zulauf- und Ablaufkonzentrationen um $49 \text{ mg} \cdot \text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ und $12 \text{ mg} \cdot \text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ konnten bei einer Reaktoraufenthaltszeit von etwa 7 Stunden mit allen getesteten C-Quellen durchschnittliche Denitrifikationsraten zwischen 199 g und 235 g $\text{NO}_3\text{-N}$ pro m^3 Aufwuchskörperbett und Tag dokumentiert werden. Allerdings wurde nur bei Verwendung von Methanol kein negativer Einfluss auf das Futteraufnahmeverhalten der Zander beobachtet. Wirtschaftlich inakzeptabel sank die Futteraufnahme der Tiere bei Nutzung der anderen getesteten C-Quellen schnell auf bis zu -37 % des Ausgangswertes ab. Bei kontinuierlicher Rezirkulation des Aufwuchskörperbettes und Steigerung der zugeführten Methanolmenge konnte die hydraulische Beaufschlagung des SID-Reaktors deutlich erhöht werden. So betrieben erlaubt der SID-Reaktor Denitrifikationsraten von mindestens 450 g $\text{NO}_3\text{-N}$ pro m^3 Aufwuchskörperbettvolumen. Der Einsatz des SID-Reaktors erlaubte die Reduzierung des Frischwasserbedarfs der Zander-KLA von 600 l auf 70 l (-88 %) und des Natriumbicarbonateinsatzes von 182 g auf 31 g (-83 %) pro kg eingesetzten Futtermittels.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die erzielten Forschungsergebnisse werden in nationalen und internationalen Fachzeitschriften publiziert. Ein umfassender Projektbericht erscheint in einer Ausgabe der IfB-Schriftenreihe. Vor nationalen und internationalen Fachgremien (z.B. Fortbildungsveranstaltung IfB, 09/2012, Seddin; AQUA 2012-Konferenz der World Aquaculture Society, Prag, 09/2012) erfolgt die Präsentation des Forschungsvorhabens in Vortragsform.

Fazit

Der einfache, nahezu wartungsfreie und sichere Betrieb des neu entwickelten Selbstreinigenden Innertgas Denitrifikations-Reaktors könnte zukünftig dazu beitragen, Denitrifikation als einen Routineschritt in die Wasseraufbereitung geschlossener Kreislaufanlagen zu integrieren. Die hierdurch mögliche Einsparung an Ressourcen führt zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und einer weiter verringerten ökologischen Einflussnahme entsprechender Produktionssysteme.

Die Wirkung verschiedener C-Quellen auf andere, ggf. weniger sensible Wirtschaftsfischarten sowie die Mitverwertung leicht abbaubaren Kohlenstoffs aus dem Schlamm der mechanischen Wasseraufbereitung von Kreislaufanlagen zur Reduzierung des externen C-Quellen-Bedarfs im SID-Reaktor sollten zukünftig getestet werden.

Inhalt

Verzeichnis der Tabellen

Verzeichnis der Abbildungen

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

	Zusammenfassung	1
1	Problemstellung und Stand der Technik (Einleitung)	2
2	Zielstellung und Arbeitsaufgaben	6
3	Material und Methoden	7
3.1	Anpassung eines Moving bed-Filters an Anforderungen für die Denitrifikation..	7
3.2	Integration des Denitrifikationsreaktors in eine bestehende Kreislaufanlage zur Zanderhaltung.....	8
3.3	Parametererfassung.....	11
3.4	Überprüfung und Optimierung der Denitrifikationsleistung unter Nutzung unterschiedlicher C-Quellen.....	12
3.5	Untersuchungen zum Sauerstoffeliminationspotenzial und zur hydraulischen Belastungsfähigkeit des Denitrifikationsreaktors.....	15
3.6	Erfassung von Betriebsaufwand, Medienverbräuchen und Systemanfälligkeit im Dauereinsatz; ökonomische und ökologische Bewertung.....	15
4	Ergebnisse und Diskussion	16
4.1	Der Selbstreinigende Inertgas Denitrifikations-Reaktor (SID –Reaktor).....	16
4.2	Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors unter Nutzung unterschiedlicher C-Quellen.....	18
4.2.1	Betriebsweise.....	18
4.2.2	Denitrifikationsleistung.....	20
4.2.3	Redoxpotenzial als Steuergröße.....	22
4.2.4	Bildung von NO ₂ / NH ₄	22
4.2.5	Mengenbedarf C-Quellen.....	23
4.2.6	Einfluss auf SBV und pH-Wert.....	26
4.2.7	Futteraufnahmeverhalten der Zander.....	27
4.3	Untersuchung der hydraulischen Belastungsfähigkeit des SID-Reaktors.....	28
4.3.1	Sauerstoffeliminationspotenzial.....	28
4.3.2	Hydraulische Belastungsfähigkeit bei voller Denitrifikationsleistung.....	29
4.4	Betriebsaufwand und Systemanfälligkeit im Dauereinsatz.....	32
4.4.1	Elektroenergie.....	32
4.4.2	C-Quelle.....	32
4.4.3	Arbeitsaufwand.....	33
4.4.4	Systemanfälligkeit.....	33
4.5	Einsparpotenzial von Betriebsmedien.....	34

4.5.1	Frischwasserbedarf / Ablaufwasseranfall.....	34
4.5.2	Energie für Temperierung.....	35
4.5.3	Puffersubstanzen.....	37
4.6	Ökonomische Betrachtungen.....	38
4.6.1	Versuchskreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab, IfB.....	38
4.6.2	Kreislaufanlage im Praxismaßstab, Jahreserzeugung von 100 t Zander.....	39
4.7	Ökologische Betrachtungen.....	41
4.8	Weitere Beobachtungen während des Betriebs des SID-Reaktors.....	42
5	Fazit	44
6	Literatur.....	46

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Wasservolumen der Einzelkomponenten der IfB-Versuchskreislaufanlage 2.	8
Tab. 2	Zentrale Betriebsparameter während des Vergleichs der Denitrifikationsleistung bei Nutzung vier unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	19
Tab. 3	Zentrale Leistungsparameter zur Abschätzung der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	20
Tab 4	Redoxpotenziale beim Betrieb des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	22
Tab. 5	Entwicklung von Nitrit- und Ammonium -N-Konzentrationen bei Nutzung vier unterschiedlicher C-Quellen während der Passage des SID-Reaktors (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	23
Tab. 6	Konzentrationen an gesamtorganischem Kohlenstoff (TOC) in Zu- und Ablauf des SID-Reaktors (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	24
Tab. 7	Trübung im Zu- und Ablauf des SID-Reaktors bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	25
Tab. 8	Entwicklung von Salzsäurebindungsvermögen und pH-Wert während der Passage des SID-Reaktors bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).	26
Tab 9	Sauerstoffeliminationspotenzial des SID-Reaktors bei unterschiedlicher Eintragsmenge an gasförmigem Stickstoff.	29

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1	Aufbau der IfB-Versuchskreislaufanlage ohne Denitrifikationsreaktor (schematisch) und Teilansicht.	9
Abb. 2	selbstreinigender Innertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor) im halbtechnischen Maßstab (0,65 m ³ Reaktorvolumen) und Verschlussdeckel mit Zu- und Abgängen.	16
Abb. 3	Verläufe von Sauerstoffkonzentration, Redoxpotenzial und NO ₃ -N im Reaktorablauf, sowie von NO ₃ -N im Rezirkulationswasser der Kreislaufanlage (Reaktorzulauf) während der Einfahrphase des Denitrifikationsreaktors.	18
Abb. 4	Futtermehrfütterung der gehaltenen Zander nach Rückführung des SID-Reaktorablaufs in die Kreislaufanlage, bei Nutzung von Essigsäure.	28
Abb. 5	Täglicher Frischwassereinsatz (Säulen) und NO ₃ -N-Konzentrationen im Haltungswasser der KLA (Punkte) ohne und mit Nutzung des SID-Reaktors. 31.11. bis 14.11.2011: Nitratverdünnung durch hohen Frischwassereintrag; 15.11. – 29.11.2011: Nitrateliminierung durch Nutzung des SID-Reaktors.	35
Abb. 6	Temperaturverläufe (Linien) und Heizzeiten (Säulen) in der Kreislaufanlage (Screenshots aus Simatic WinCC Datenvisualisierung) bei vergleichbarer Wettersituation. Oben (14.12. – 16.12.11): Nitratausverdünnung über Frischwassereinspeisung; unten (29.12. – 31.12.11): Nitrateliminierung durch Nutzung des SID-Reaktors.	37

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

µS/cm	Mikrosiemens pro Zentimeter
C	Kohlenstoff
C ₂ H ₆ O	Ethanol
C ₃ H ₈ O ₃	Glyzerin
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CH ₃ COOH	Essigsäure
CH ₄ N ₂ O	Harnstoff
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CV	Variationskoeffizient
FNU	Formazine Nephelometric Unit
h	Stunde
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
IfB	Institut für Binnenfischerei Potsdam Sacrow e.V.
KLA	Kreislaufanlage
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
m	Meter
m ³	Kubikmeter
Max	Maxima

mbar	Millibar
mg	Milligramm
Min	Minima
min	Minute
ml	Milliliter
mV	Millivolt
N ges.	Gesamt-Stickstoff
N ₂	Stickstoff
NH ₃ -N	Ammoniak-Stickstoff
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NO ₂ -N	Nitrit-Stickstoff
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
‰	Promille
O ₂	Sauerstoff
Q	Hydraulische Beaufschlagung
SBV	Säurebindungsvermögen
sec	Sekunde
SID-Reaktor	Selbstreinigender Inertgas Denitrifikations-Reaktor
STABW	Standardabweichung
TOC	Gesamtorganischer Kohlenstoff
UASB-Reaktor	Upstream Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor
W	Watt

Zusammenfassung

Bei bisherigen Ansätzen zur Denitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Erzeugung aquatischer Organismen (KLA) ergeben sich häufig Probleme durch die zur Aufrechterhaltung anoxischer Bedingungen stets gering zu haltende hydraulische Beaufschlagung der Reaktoren. Das Verschlammen der Filtermatrix mit Bakterienbiomasse behindert die Einstellung stabiler Betriebsbedingungen. Entsprechende Denitrifikationsreaktoren müssen stets aufwendig rückgespült werden. Mit dem Ziel der Entwicklung einer wartungsarmen Denitrifikationsstufe für KLA wurde ein Fließbettfilter mit schwimmenden Aufwuchskörpern (Moving bed-Filter) als geschlossenes System konzipiert. Das Aufwuchskörperbett wird hier mit dem sich im Reaktor bildenden, sauerstoffarmen Innertgas rezirkuliert. Ein von der Fa. Kunststoff-Spranger GmbH nach den Vorgaben des Instituts für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow (IfB) konstruierter **Selbstreinigender Innertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor)** wurde am IfB an eine geschlossene Kreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab zur Haltung von Zandern (*Sander lucioperca*) angeschlossen. Diese Spezies indiziert $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen oberhalb etwa $68 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ durch reduzierte Futteraufnahme. Der SID-Reaktor wurde mit unterschiedlichen C-Quellen (Ethanol vergällt, Methanol, Essigsäure, Glycerin) und wechselnder hydraulischer Beaufschlagung betrieben. Zentrale Wasserparameter, Medienverbräuche, Wartungsaufwand sowie das Futteraufnahmeverhalten des Zanderbestandes wurden erhoben. Ein Verschlammen des Aufwuchskörperbettes mit Bakterienbiomasse konnte bereits durch Innertgasrezirkulation für $2 \times 40 \text{ sec} \cdot \text{h}^{-1}$ sicher und mit marginalem Energieaufwand vermieden werden. Ein kontinuierlicher und wartungsarmer Denitrifikationsbetrieb konnte so sichergestellt werden. Mit Zulauf- und Ablaufkonzentrationen um $49 \text{ mg} \cdot \text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ und $12 \text{ mg} \cdot \text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ konnten bei einer Reaktoraufenthaltszeit von etwa 7 Stunden mit allen getesteten C-Quellen durchschnittliche Denitrifikationsraten zwischen 199 g und 235 g $\text{NO}_3\text{-N}$ pro m^3 Aufwuchskörperbett und Tag dokumentiert werden. Allerdings wurde nur bei Verwendung von Methanol kein negativer Einfluss auf das Futteraufnahmeverhalten der Zander beobachtet. Wirtschaftlich inakzeptabel sank die Futteraufnahme der Tiere bei Nutzung der anderen getesteten C-Quellen schnell auf bis zu -37 % des Ausgangswertes ab. Bei kontinuierlicher Rezirkulation des Aufwuchskörperbettes und Steigerung der zugeführten Methanolmenge konnte die hydraulische Beaufschlagung des SID-Reaktors deutlich erhöht werden. So betrieben erlaubt der SID-Reaktor Denitrifikationsraten von mindestens 450 g $\text{NO}_3\text{-N}$ pro m^3 Aufwuchskörperbettvolumen. Der Einsatz des SID-Reaktors ermöglichte die Reduzierung des Frischwasserbedarfs der Zander-KLA um 88 % und des Natriumbicarbonateinsatzes um 83 %. Der einfache, nahezu wartungsfreie und sichere Betrieb des neu entwickelten Selbstreinigenden Innertgas Denitrifikations-Reaktors könnte zukünftig dazu beitragen, Denitrifikation als einen Routineschritt in die Wasseraufbereitung geschlossener Kreislaufanlagen zu integrieren. Die hierdurch mögliche Einsparung an Ressourcen führt zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und einer weiter verringerten ökologischen Einflussnahme entsprechender Produktionssysteme. Die vorliegende Untersuchung wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter AZ 28133 gefördert.

1 Problemstellung und Stand der Technik (Einleitung)

Der nachhaltigen Intensivierung der Fischerzeugung durch den Einsatz geschlossener Kreislaufanlagen wird weltweit eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Bei geringem Platz- und Frischwasserbedarf sowie vergleichsweise niedrigen Emissionen lassen sich hier die Umweltbedürfnisse diverser Wirtschaftsfischarten jahreszeitlich unabhängig im Optimalbereich einstellen und kontrollieren. Aufgrund der weitgehenden Unabhängigkeit dieses Haltungssystems von Oberflächengewässern ermöglichen geschlossene Kreislaufanlagen die Erschließung neuer Produktionsstandorte. Aquatische Lebensmittel können in ihnen auch in urbanen Regionen und somit marktnah in guter Qualität und Frische erzeugt werden. Unter den in Deutschland gegebenen umweltgesetzlichen Rahmenbedingungen sind einer Erhöhung der Erzeugung an aquatischen Lebensmitteln enge Grenzen gesetzt. Geschlossene Kreislaufanlagen könnten zukünftig einen Beitrag zur Steigerung des derzeit mit rund 15 % äußerst geringen Selbstversorgungsgrades mit aquatischen Lebensmitteln in Deutschland leisten. Die Abhängigkeit von in anderen Regionen der Welt unter häufig deutlich schlechteren Umweltstandards produzierten Fischerzeugnissen könnte eingeschränkt werden. Vornehmlich bedingt durch eine zumeist deutlich bessere Futterausnutzung und verkürzte Transportwege wurden marktnah in geschlossenen Kreislaufanlagen produzierten Welsen in Life Cycle Assessments kürzlich ein günstigerer CO₂-Footprint attestiert als nach traditionellen Verfahren in Asien aufgezogenen und nach Europa importierten Tieren (POELMAN 2010).

Mittlerweile stehen sicher dimensionierbare Wasseraufbereitungskomponenten zur Temperierung, pH-Wert-Anpassung und Sauerstoffanreicherung des Haltungswassers, zur mechanischen Reinigung, zur biologischen Aufbereitung (Nitrifikation) sowie zweckmäßige Steuerungs- und Alarmierungssysteme für geschlossene Kreislaufanlagen zur Verfügung (MARTINS et al. 2010).

Ein Wasserparameter, der noch zu Problemen führt, ist das sich in geschlossenen Kreislaufsystemen ohne funktionierende Denitrifikationsstufe im Zuge der Nitrifikation kontinuierlich anreichernde Nitrat.

Zur Umgehung zu hoher NO₃-Konzentrationen müssen in den derzeit üblichen kommerziell betriebenen Kreislaufsystemen bei Vernachlässigung unkontrollierbarer, passiver Denitrifikation nach Massebilanz täglich etwa 180 l Frischwasser pro kg verabreichten Alleinfuttermittels zugeführt werden, wenn von der gehaltenen Fischart bis zu etwa 1000 mg NO₃ *l⁻¹ (entspricht 226 NO₃-N*l⁻¹) toleriert werden. Rund 600 l Frischwasser pro kg Alleinfuttermittel werden benötigt, falls die Spezies, wie etwa Störe, sensibel auf Nitrat reagieren (HAMLIN 2006) und nach bisherigen Praxiserfahrungen bei zufriedenstellender Aufzuchtleistung auf Dauer lediglich rund 300 mg NO₃*l⁻¹ (entspricht 68 mg NO₃-N*l⁻¹) tolerieren (RÜMMLER & PFEIFFER 1998; HEIDRICH et al. 2006). Auch für den Steinbutt (*Psetta maxima*) konnte kürzlich eine deutliche Verringerung der Aufzuchtleistung bei steigender Nitratkonzentration im Haltungswasser nachgewiesen werden (VAN BUSSEL et. al. 2012).

In einer Warmwasserkreislaufanlage mit einer Jahreserzeugung von 100 t Speisefisch beliefe sich bei einem angenommenen Futterquotient von 1,0 die zum Nitrataustrag

benötigte Frischwassermenge auf rund 50 m³/d (NO₃-N-Zielkonzentration: 226 mg*l⁻¹) bzw. 180 m³ (NO₃-Zielkonzentration: 68 mg*l⁻¹). Entsprechend hoch ist die zu entsorgende Ablaufwassermenge sowie der zur Erwärmung des Frischwassers (in Deutschland üblicherweise ca. 10°C) auf Anlagenbetriebstemperatur (üblicherweise 22°C bis 28°C) benötigte Wärmeneigbedarf (1,16 kWh pro m³ und Kelvin).

In geschlossenen Kreislaufanlagen geht die zwingend benötigte bakterielle Nitrifikation im Biofilter mit der Reduzierung des Salzsäurebindungsvermögens und einer damit verbundenen pH-Absenkung einher. Zur Pufferung der nitrifikationsbedingten pH-Absenkung sind nennenswerte Gaben pH-Wert erhöhender Härtebildner, wie etwa Natriumhydrogencarbonat einzusetzen. Stöchiometrisch ist pro mg abgebautem NH₄-N die Zudosierung eines Äquivalentes von 7,14 mg CaCO₃ notwendig (VAN RIJN et al. 2006). In Abhängigkeit vom Härtegrad der genutzten Frischwasserquelle sowie der im System stattfindenden passiven Denitrifikation müssen in geschlossenen Kreislaufanlagen im Produktionsmaßstab ohne Denitrifikationsstufe rund 20 Gewichtsprozent der eingesetzten Futtermenge als Puffersubstanz – zumeist in Form von Natriumhydrogencarbonat – eingebracht werden. In einer Kreislaufanlage für 100 t Jahresproduktion werden täglich etwa 60 kg Natriumhydrogencarbonat benötigt. Eine Denitrifikationsstufe kann dieser nitrifikationsbedingten pH-Absenkung entgegenwirken. Während der heterotrophen Denitrifikation werden Hydroxyl-Ionen frei. Es kommt zu einer Anhebung des Säurebindungsvermögens. Jedes mg NO₃-N, welches zu N₂ reduziert wird, führt zu einer Steigerung des SBV im Äquivalent von 3,57 mg CaCO₃ (VAN RIJN et al. 2006). Eine erhebliche Menge der üblicherweise einzusetzenden Puffersubstanzen ist somit durch den Einsatz einer Denitrifikationsstufe einzusparen.

Eine unter Praxisbedingungen sicher funktionierende Denitrifikationsstufe kann durch die Reduzierung von Frisch- und Ablaufwassermenge, die Minimierung des Energiebedarfs für dessen Temperierung und die Verringerung des Puffereinsatzes die Nachhaltigkeit der Fischerzeugung in geschlossenen Warmwasserkreislaufanlagen weiter verbessern (MARTINS et al 2009).

Die mit Denitrifikationsstufe deutlich verringerte Ablaufwassermenge erlaubt weiterhin einen effizienteren Einsatz von nachgeschalteten Wasseraufbereitungsverfahren. So ist in dem reduzierten Ablaufwasservolumen von KLA mit Denitrifikationsstufe zukünftig die gezielte Nutzung klein dimensionierbarer Phosphatfällungsanlagen denkbar, die eine weitere Verringerung der Nährstofffracht von Kreislaufanlagen ermöglichen könnte.

Die Denitrifikation stellt in der kommunalen Abwasseraufbereitung, in der vergleichsweise geringe Wassermengen mit hoher organischer Belastung aufbereitet werden, eine recht gut zu beherrschende und somit stets integrierte Wasseraufbereitungskomponente dar. Die stark sauerstoffzehrende organische Fracht ermöglicht die Nutzung von Belebtschlammverfahren mit vor-, nachgeschalteter und simultaner Denitrifikationsstufe (Übersicht bei HOSANG & BISCHHOF 1998).

In geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung ergeben sich jedoch durch die hohen, hier zirkulierenden Volumenströme bei vergleichsweise geringer organischer

Belastung aber hoher Sauerstoffkonzentration Probleme bei der Umsetzung eines gezielten Denitrifikationsprozesses.

Verfahren auf Basis von denitrifizierenden Belebtschlämmen werden seit den 1970er Jahren für den Einsatz in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung getestet (MESKE 1976; OTTE & ROSENTHAL 1979). Diese Verfahren bedürfen konstruktiv vergleichsweise aufwendiger Mechanismen zur Schlammabtrennung und Rückführung (MOSKWA 1991). Ihre Implementierung in geschlossene Kreislaufanlagen wird hierdurch erschwert und ist nur mit hohem technischem Aufwand möglich.

In den Niederlanden wird derzeit ein mit Belebtschlamm arbeitender **Upstream Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor** hinsichtlich des Potenzials in der Aquakultur erforscht (MARTINS et al. 2009; MARTINS et al. 2010). Ziel des Verfahrensprinzips ist die Zuführung des aufzubereitenden Wasserstroms durch ein in Schwebelage gehaltenes Schlammbett. Um den Austrag des Schlammbettes mit dem Ablaufwasser zu vermeiden, benötigen UASB-Reaktoren eine anspruchsvolle Steuerung der hydraulischen Beanspruchung und bergen insbesondere als Denitrifikationsfilter Probleme durch nicht hinreichende Schlammrückhaltung infolge von Blähschlamm-Bildung (YANG et al. 2003; LEE et al. 2004). Entsprechende Schwierigkeiten werden auch von Praxisanwendern in mit UASB-Denitrifikationsreaktoren ausgestatteten geschlossenen Kreislaufanlagen vermittelt. Vorteilhaft wirkt sich bei diesem Verfahrensprinzip jedoch die Mitverwertung leicht abbaubaren Kohlenstoffs aus dem Ablaufschlamm der mechanischen Wasseraufbereitung aus, der dem UASB-Reaktor aus der Schlammquelle mit zugeführt werden kann. Die Menge der extern zuzuführenden C-Quelle kann hierdurch reduziert werden (MARTINS et al. 2009; MARTINS et al. 2010).

Auch am Einsatz von Denitrifikationsreaktoren für intensive Aquakultursysteme auf Basis von getauchten Festbetten wird bereits seit den 1970er Jahren gearbeitet (BALDERSTON & SIEBFURT 1976). Hier sind sehr reduzierte Volumenströme und lange Fließstrecken notwendig, bis sich die für Denitrifikanten notwendigen anoxischen Bedingungen einstellen. Zur Vermeidung von Verschlämmung und von Zonen mit stark reduktiven Verhältnissen (H_2S -Bildung) erfordert die geringe hydraulische Belastung der Festbettsysteme hochfrequente Rückspülungen, die wiederum eine Umkehrung zu aeroben Bedingungen nach sich ziehen und den Denitrifikationsprozess zeitweise unterbrechen. Hoher Aufwand für Rückspülungen und fehlende Kontinuität beim Betrieb behindern hier offenbar die Etablierung entsprechender Verfahren im Praxiseinsatz. SAUTHIER et al. (1998) beschreiben die Notwendigkeit von Rückspülungen des von ihnen in einem geschlossenen Kreislaufsystem betriebenen Festbett-Denitrifikationsreaktors in einem dreitägigen Intervall.

Ein zudem verfolgter Ansatz zur Denitrifikation in intensiven Aquakulturanlagen ist die Nutzung von Fließbettreaktoren. Konstruktionsbedingt bedürfen Fließbettreaktoren mit sedimentierenden Aufwuchskörpern (Sand, spezifisch schwere Kunststoffgranulate) keiner Rückspülung, jedoch einer hohen hydraulischen Belastung, um das Trägermaterial in Schwebelage zu halten. Für das Inschwebelassen der Aufwuchskörper ist ein energieintensiver Wassertransport durch das System vorzuhalten, ein Grund dafür, dass sich Fließbettreaktoren dieser Bauart in der Aquakultur auch als Nitrifikationsfilter nicht durchsetzen konnten. Eine interessante Variante des Fließbettreaktors für die Denitrifikation

in geschlossenen Kreislaufanlagen wurde von BOLEY & MÜLLER (2005) getestet. Hier wurde als Fließbett ein Granulat aus biologisch abbaubaren Polymeren verwendet, die neben der Funktion als Aufwuchskörper für die denitrifizierenden Bakterien gleichzeitig als C-Quelle mit durch die bakterielle Aktivität bedarfsgeregelter Kohlenstofffreisetzung fungieren. Allerdings stellten sich neben dem systembedingt hohen Kosten für Pumpenergie zusätzlich die getesteten Polymere als vergleichsweise kostenintensive C-Quelle heraus.

Neben der beschriebenen heterotrophen Denitrifikation auf Basis organischer Kohlenstoffquellen existieren Bakterien, welche Schwefel als Elektronendonator für die Denitrifikation nutzen können. Diese autotrophe Denitrifikation auf Schwefelbetten führt allerdings zu einer zusätzlichen Absenkung des SBV und zieht somit eine pH-Wert-Absenkung im System nach sich (KIM & BAE 2000; OH et al. 2001). Eine in Addition zur pH-Wert-Absenkung infolge der Nitrifikation notwendige Zugabe von Puffersubstanzen ist hier notwendig und verteuert das Verfahren. Zudem kommt es zu einer Erhöhung der Sulfatkonzentration im Ablaufwasser des Reaktors (OH et al. 2001) und somit im Kreislaufsystem, was ggf. Wachstumsleistung und Fitness der gehaltenen Fische negativ beeinflussen kann. Ein autotropher Denitrifikationsreaktor auf Schwefelbettbasis befindet sich im Angebot des Projektpartners Kunststoff-Spranger GmbH. Der Reaktor wird erfolgreich in einer Reihe von Seewassergroßaquarien eingesetzt. Es zeichnet sich hier jedoch ab, dass der effektive Betrieb des Reaktors viel Erfahrung bedarf. Einige Kunden sind sehr zufrieden mit dem Denitrifikationsreakortyp. Kunden, denen Zeit, Erfahrung und/oder Fingerspitzengefühl für die Bedienung des Systems fehlen, erzielen hingegen häufig keine zufriedenstellende Denitrifikationsleistung.

Insbesondere beim Betrieb kommerzieller geschlossener Kreislaufanlagen steht zumeist die Haltung, Verarbeitung und Vermarktung der Fischbestände im Vordergrund. Die Betreiber finden oft nicht die Zeit, sich in den Betrieb weniger robuster Wasseraufbereitungskomponenten, wie sie die bislang am Markt verfügbaren Denitrifikationsreaktoren darstellen, einzuarbeiten. Die Komplexität bisheriger Denitrifikationssysteme und die mit ihrer Installation und Inbetriebnahme verbundenen Investitionen und Kosten stellen wohl die Hauptgründe für ihre bisher geringe Verbreitung in geschlossenen Kreislaufanlagen für die Erzeugung aquatischer Organismen dar (MARTINS et al. 2010). Steigende Kosten für Frischwasserversorgung, Abwasserentsorgung und Energie sowie strenge gesetzliche Anforderungen an die Qualität des Ablaufwassers aus intensiven Fischproduktionseinrichtungen (RÜMMLER et al. 2011) erschweren die derzeit in Kreislaufanlagen vornehmlich praktizierte Ausverdünnung von Nitrat durch entsprechende Frischwasserzufuhr. Die Branche verlangt nach einfach zu bedienenden, wartungsarmen Denitrifikationsreaktoren.

2 Zielstellung und Arbeitsaufgaben

Einen neuen Ansatz zur Etablierung einer effizienten Denitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen (KLA) könnte die Nutzung modifizierter Fließbettreaktoren mit schwimmenden Aufwuchskörpern darstellen. Entsprechende Reaktoren, in denen die Aufwuchskörper durch eingeblasene Luft in Bewegung gehalten werden, kommen unter der Bezeichnung „Mooving bed-Filter“ vermehrt als Nitrifikations-Reaktoren in der Aquakultur zum Einsatz und zeichnen sich durch hohe Leistungsfähigkeit und einen sicheren sowie einfachen Betrieb aus. Die schwimmenden Aufwuchskörper können mit einem vergleichsweise kleinen Luftvolumen energieeffizient in Bewegung gehalten werden. Ein Verschlammen und Zusetzen des Systems wird sicher vermieden.

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat zum Ziel einen handelsüblichen Mooving-bed-Filter für den Einsatz als Denitrifikations-Reaktor zu modifizieren und im Betrieb in einer KLA zu testen.

Hierzu wird ein Mooving bed-Filter so umgestaltet, dass die Bewegung der Aufwuchskörper anstelle mit Luft mit wenig Energieaufwand über Innertgas und/oder reinen Stickstoff erfolgen kann. Der den Denitrifikationsprozess störende Sauerstoff kann hierdurch, wie in einer Vorstudie am IfB getestet, ausgetrieben werden. Das Innertgas bzw. der eingegaste Stickstoff wird unter einer Kuppel über dem Wasserspiegel des Reaktors gesammelt und mithilfe eines Gebläses temporär oder kontinuierlich durch die Wassersäule des Reaktors rezirkuliert. Somit kann der Bedarf an in das System frisch einzutragendem Stickstoff und an Energie auf ein Minimum begrenzt werden. Über eine Dosiereinheit können flüssige C-Quellen, unabhängig von der hydraulischen Beaufschlagung, in beliebiger Menge und Frequenz eingetragen werden.

Im Gegensatz zu den bislang in der Aquakultur eingesetzten Denitrifikationsverfahren zeichnet sich das beschriebene System durch die unabhängig von den anderen Wasseraufbereitungsstufen im Kreislaufsystem mögliche, gezielte O₂-Eliminierung, auch bei erhöhter hydraulischer Beaufschlagung, und die im laufenden Betrieb permanente Vermeidung von Schlammablagerungen aus. Die Projektbearbeiter erhoffen sich so die sichere Schaffung anoxischer Bedingungen ohne Gefahr der Bildung stark reduktiver Zonen als Voraussetzung für eine kontinuierlich ablaufende Denitrifikation. Durch den laufenden Betrieb des zu gestaltenden Denitrifikationsreaktors an einer wissenschaftlich betreuten geschlossenen Kreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab kann die Systemsteuerung optimiert und die Praxistauglichkeit des Verfahrens beurteilt werden. In der KLA werden trockenfutteradaptierte Zander gehalten, die für ihre Sensibilität gegenüber Umweltveränderungen bekannt sind. Zander sind somit als praxismgerechte Bioindikatoren für die Funktionsfähigkeit des konzipierten Denitrifikationsreaktors in geschlossenen Kreislaufanlagen für die Fischeaufzucht prädestiniert.

Durch die Auswertung der Versuchsergebnisse sollen die Entwicklung und Verbreitung eines Denitrifikationsreaktors nach dem vorgestellten Verfahrensprinzip vorangetrieben werden sowie die entscheidenden technologischen und ökonomischen Kennzahlen für seinen Betrieb unter Praxisbedingungen bereitgestellt werden.

3 Material und Methoden

3.1 Anpassung eines Mooving bed-Filters an Anforderungen für die Denitrifikation

Mooving bed-Filter erfreuen sich seit Jahren zunehmender Beliebtheit als Nitrifikationsfilter in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung. Ihr Funktionsprinzip weist folgende Vorteile auf:

- Keine Gefahr des Zusetzens, somit keine Notwendigkeit von Rückspülvorgängen
- Vergleichsweise große biologisch aktive Oberfläche pro Volumeneinheit, somit überschaubare Baugröße
- Betrieb bei vergleichsweise geringem Energiebedarf, insbesondere bei strömungstechnisch optimierten Ausführungen
- Bewährt sicherer, wartungsarmer Betrieb

Insbesondere Funktionssicherheit sowie Wartungsarmut durch die Möglichkeit des kontinuierlichen Betriebes ohne Rückspülvorgänge lassen das Verfahrensprinzip auch für Denitrifikationsreaktoren als interessant erscheinen.

Einige Modifikationen sind jedoch vorzunehmen, um hier Denitrifikationsprozesse realisieren zu können. So muss die Wasserführung, Zu- und Ablaufregelung an eine gegenüber der Nitrifikation erheblich verringerte hydraulische Beaufschlagung angepasst werden.

Eine Dosiereinheit für die Zuführung flüssiger C-Quellen muss installiert werden.

Im Gegensatz zur Ausführung eines Mooving-bed-Filters zur Nitrifikation, wo eine kontinuierliche Durchmischung des Aufwuchskörperbettes über eingeblasene Luft erfolgt, muss diese Durchmischung zur Gewährleistung dauerhaft anoxischer Bedingungen mit einem sauerstofffreien Gas erfolgen. Hierzu wird der Reaktorbehälter an seiner Oberseite mit einem gasdichten Deckel verschlossen. Die sich unter dem Deckel sammelnde Innertgasphase wird über ein Gebläse abgesaugt und zu dessen Verwirbelung in Intervallen oder permanent durch das Aufwuchskörperbett zirkuliert. Beim sich über dem Aufwuchskörperbett bildenden Innertgas wird dabei vom Vorhandensein von vornehmlich CO₂ und Stickstoff und der Freiheit von Sauerstoff ausgegangen.

Weiterhin ist die Installation einer zusätzlichen dosierbaren Einspeisung von Stickstoff in Verbindung mit einem Überdruckventil vorgesehen. Hierdurch soll die Sauerstofffreiheit der sich bildenden Innertgasphase abgesichert werden.

Schließlich sind am Versuchsreaktor Messstellen für die Anbringung von O₂- und Redox-Messgeräten sowie zur Entnahme von Wasserproben aus Reaktorablauf vorgesehen.

Die Konstruktions- und Umbauarbeiten erfolgten unter Zuhilfenahme moderner Fertigungstechnologie beim Projektpartner Kunststoff-Spranger GmbH, der auf Entwicklung und Bau von kunststofftechnischen Bauteilen für die industrielle Frisch- und Abwasserbehandlung spezialisiert ist.

3.2 Integration des Denitrifikationsreaktors in eine bestehende Kreislaufanlage zur Zanderhaltung

Der neu entwickelte Denitrifikationsreaktor wurde zum Test von Funktionssicherheit und Leistungsfähigkeit an eine geschlossene Kreislaufanlage zur Zanderhaltung im halbtechnischen Maßstab am IfB angeschlossen.

Die in einer beheizbaren Halle untergebrachte Anlage umfasst sechs siloförmige Haltungsbecken mit einem Haltungsvolumen von jeweils 1,3 m³. Das Ablaufwasser der Haltungsbecken fließt gesammelt zur mechanischen Reinigung (Siebtrommelfilter, Bespannung 60 µm) und nach Filterung in den Pumpensumpf. Das abfiltrierte Schlammwasser wird in einem Absetzbecken mit Rücklauf des Überstandwassers in den Pumpensumpf gesammelt. Der Trommelfilter wird für Spülvorgänge mit Zirkulationswasser betrieben.

Im Pumpensumpf erfolgen geregelt die Heizung und pH-Anpassung des Zirkulationswassers. Wasserverluste werden im Pumpensumpf über einen Schwimmerschalter ausgeglichen. Ein Paar redundanter Pumpen rezirkuliert das Haltungswasser durch ein automatisches Sauerstoffanreicherungssystem zurück in die Haltungsbecken. Das eingespeiste Wasser ist zu etwa 130 % mit Sauerstoff übersättigt. In den Haltungsbecken sind nach Anforderung zwischen einem und zwei Wasserwechsel pro Stunde einstellbar. Zur Reduzierung der Keimbelastung werden stündlich 10 m³ des zirkulierenden Haltungswasserstroms im Bypass durch einen UVC-Brenner (85 W) geführt.

Ein weiteres redundantes Pumpenpaar fördert im Bypass ca. 10 m³ Wasser pro Stunde aus dem Pumpensumpf zur Nitrifikation durch einen Wirbelbettreaktor mit einer Kapazität zur Nitrifikation von 120 g NH₄-N pro Tag. Nach Passage des Biofilters gelangt der Teilstrom über eine Entgasungskaskade zurück in den Pumpensumpf.

Tab. 1 führt die Wasservolumen der einzelnen Anlagenkomponenten der eingesetzten Versuchskreislaufanlage auf.

Tab. 1: Wasservolumen der Einzelkomponenten der IfB-Versuchskreislaufanlage 2

Komponente	Volumen (m ³)
6 Fischbecken	8,0
Absetzbecken Filterauslauf	0,7
Wirbelbettreaktor	0,8
Pumpensumpf	0,8
Tropfkörper	0,7
Trommelfilter / Rohre / Rinne	0,6
Gesamtvolumen	11,6

Abb. 1a/b zeigt den Aufbau der verwendeten Versuchskreislaufanlage ohne Integration des Denitrifikationsreaktors schematisch und als fotografische Teilansicht.

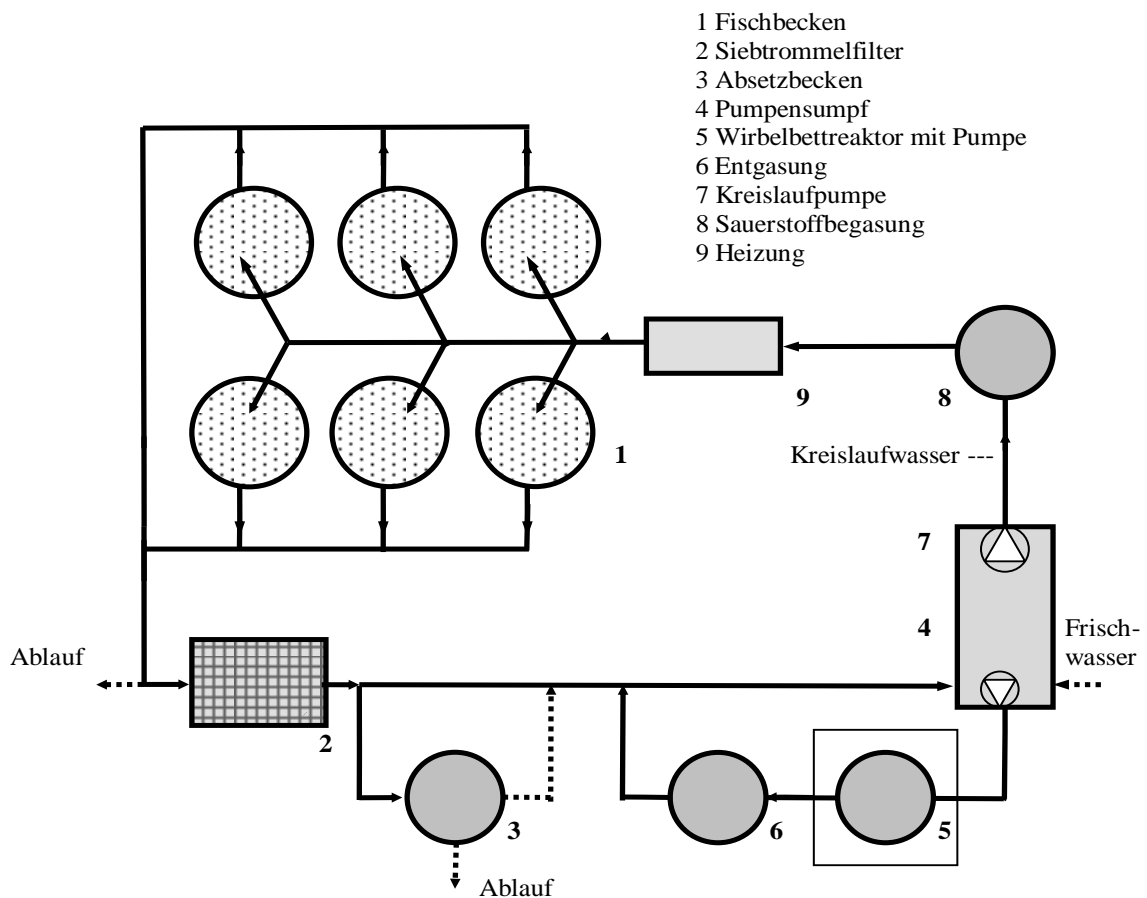


Abb. 1a: Aufbau der IfB-Versuchskreislaufanlage ohne Denitrifikationsreaktor (schematisch).



Abb. 1b: Teilansicht der IfB-Versuchskreislaufanlage ohne Denitrifikationsreaktor.

Das System weist eine ausreichende Kapazität für einen Haltebestand von rund 400 kg Speisezandern und eine tägliche Verabreichung von 3,0 kg pelletierten Alleinfuttermitteln mit einem Proteingehalt um 45 % auf. Die nach Vorkalkulation täglich zu verabreichende

Futtermenge wird für jedes Becken grammgenau eingewogen. Die Futtermittelverabreichung erfolgt über 24 h-Bandfutterautomaten. Um die während des 15-monatigen Versuchszeitraums zwangsläufig gegebenen Belastungsänderungen durch schwankende Fischbiomassen und entsprechend variierende Futtermengen auszugleichen, wurde durch die Zudosierung entsprechender Mengen Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) das täglich mögliche Nitrifikationspotenzial des Wirbelbettreaktors von 120 g $\text{NH}_4\text{-N}$ ausgeschöpft. In der Regel wurden täglich zwischen 1 und 2 kg Futter und zwischen 100 und 200 g Harnstoff in das System dosiert.

Zur Einstellung der in der Zanderaufzucht angestrebten maximalen $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationen von $68 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ($300 \text{ mg NO}_3\cdot\text{l}^{-1}$) muss im System ohne angeschlossene Denitrifikationsstufe täglich ein Frischwasserwechsel von rund 600 l pro kg verabreichtem Futtermittel eingehalten werden. Passive Denitrifikation ist im System vernachlässigbar gering. Als Frischwasserquelle fungiert der Sacrower See. Der technologisch bedingte Mindestfrischwasserbedarf des Systems liegt unabhängig von der verabreichten Futtermenge bei ca. 200 l pro Tag.

Zur Aufrechterhaltung eines pH-Wertes von 6,8 – 7,0 ist bei der genutzten Frischwasserquelle (SBV um $2,0 \text{ mval}\cdot\text{l}^{-1}$) ohne Integration einer Denitrifikationsstufe im System die Zudosierung zwischen 180 g und 200 g Natriumbicarbonat pro kg verabreichtem Alleinfuttermittel nötig.

Durch die vorhandene rechnergestützte Mess- und Regeltechnik (Siematic WinCC, Fa. Siemens) werden annähernd gleich bleibende zentrale Wasserparameter im Optimalbereich für die Zanderaufzucht gewährleistet und kontinuierlich visualisiert.

Während der Versuchsphase erfolgte die Haltung von Zandern in Satz- und Speisefischgröße in einem Stückmassebereich von etwa 200 bis 1000 g. Alle wichtigen produktionstechnologischen Daten wurden jeweils zu Beginn und während der Untersuchungen erfasst. Die Futtermengen für die einzelnen Fischbestände wurden täglich mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms berechnet und durch regelmäßige Stichproben- und Bestandswägungen präzisiert, die Futterverwertung (Futterquotient; kg Futter pro kg Zuwachs) und die tägliche Wachstumsrate ermittelt. Das Verhalten der Zander sowie ihr Futteraufnahmevermögen wurden täglich beobachtet. Deutliche Einschränkungen im täglichen Futteraufnahmevermögen im Vergleich zu langjährigen Erfahrungswerten wurden als Indiz für suboptimale Haltungparameter gedeutet. Über die Ermittlung von Futterresten erlaubt das System dabei das Erkennen von Schwankungen des Futteraufnahmevermögens im Bereich von 0,1 Gewichtsprozent der Bestandsbiomasse. So ist beispielsweise sicher quantifizierbar, ob die gehaltenen Zander täglich 1,2 % oder 1,3 % ihrer Bestandsbiomasse aufzunehmen vermögen.

Der neu entwickelte Denitrifikationsreaktor wurde im Bypass in das bestehende System integriert. Die Wasserabnahme für den Zulauf des Reaktors erfolgt direkt hinter dem Nitrifikationsfilter, wo erwartungsgemäß der Sauerstoffgehalt im zirkulierenden Haltungswasserstrom am geringsten ist.

Zu Beginn wurde das Wasser ausschließlich energieneutral, unter Nutzung der Schwerkraft in den Denitrifikationsreaktor geleitet. Die Feinregelung der vergleichsweise geringen Zulaufmengen gestaltete sich hier, aufgrund eines häufigen Zusetzens der geringen Querschnitte der Regelungseinrichtungen, jedoch als problematisch.

Als funktionsfähig erwies sich schließlich die Wasserzuführung mithilfe einer Kleinpumpe (5 W Leistungsaufnahme) mit begrenzter Förderhöhe. Durch die Veränderung der zu bewältigenden Förderhöhe gelang die Feinregulierung der Wasserzuführung ohne Querschnittsverjüngungen.

Nach Passage des Denitrifikationsreaktors wird das Ablaufwasser vor der mechanischen Wasseraufbereitung in den zirkulierenden Wasserstrom zurückgeleitet. Wurde bei den gehaltenen Zandern eine reduzierte Futteraufnahme beobachtet, konnte das Ablaufwasser aus dem Denitrifikationsreaktor separat ausgeleitet werden. Somit erfolgte in diesem Fall die Ablaufwasserentnahme für den Frischwasseraustausch über den Ablauf des Denitrifikationsreaktors. Im Ablaufwasserstrom ist eine Messstelle für die Entnahme von Wasserproben sowie zur Installation eines Redox- sowie eines Sauerstoffmessgerätes vorgesehen.

Über ein zeitgesteuertes Magnetventil erfolgt täglich über 24 h pro Tag verteilt die gleichmäßige Zudosierung der eingesetzten C-Quellen aus einem über dem Denitrifikationsreaktor installierten Vorratsbehälter.

3.3 Parametererfassung

Täglich erfolgte die grammgenaue Einwaage des im Haltungssystem verabreichten Alleinfuttermittels, welches über 24h-Bandfutterautomaten an die Zander verabreicht wurde sowie der eingebrachten Harnstoffmenge, die in Wasser gelöst über ein zeitgesteuertes Magnetventil kontinuierlich über 24 h zudosiert wurde. Während der täglichen Routinekontrollen erfolgte in den Haltungsbecken die Beobachtung von Futteraufnahmeverhalten und Fischgesundheit, ggf. die Erfassung von Fischverlusten.

Dokumentiert wurde weiterhin der tägliche Frischwasserbedarf des Kreislaufsystems (m^3 pro Tag) zur Ausdünnung erhöhter NO_3 -Konzentrationen sowie die zur Einstellung eines pH-Wertes um 7,0 eingebrachte Natriumbicarbonatmenge (g). Das in den Denitrifikationsreaktor eingebrachte Volumen der jeweils eingesetzten C-Quelle (l pro Tag) wurde erfasst.

Im Zirkulationswasserstrom der Kreislaufanlage wurden täglich die zentralen Wasserparameter Temperatur, O_2 -Konzentration und pH-Wert dokumentiert. Am Denitrifikationsreaktorablauf wurde zudem täglich das Redoxpotenzial (mV), bei Bedarf der Sauerstoffgehalt ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), die hydraulische Beaufschlagung (sec pro l, Umrechnung in $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) ermittelt. Die Betriebsweise des Denitrifikationsreaktors (Laufzeitintervall Gebläse ($\text{sec}\cdot\text{h}^{-1}$), Stickstoffgaseintrag ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)) wurde täglich protokolliert.

Wöchentlich zweimal erfolgte an einer Wasserprobe aus dem Pumpensumpf der KLA sowie aus dem Ablauf des Denitrifikationsreaktors eine Laboruntersuchung zentraler

Wasserparameter. Eine Messung umfasste lediglich die photometrische Erfassung der NO_3^- -Konzentration ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) und der Trübung (FNU). Die wöchentlich einmalige Hauptuntersuchung umfasste die photometrische Bestimmung der Konzentrationen an NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , TOC ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) sowie der Trübung (FNU). Über eine Titration erfolgte die Bestimmung des Salzsäurebindungsvermögens ($\text{mval}\cdot\text{l}^{-1}$). Mithilfe kalibrierter Messsonden wurden pH-Werte, Leitfähigkeiten ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) und Salinität (‰) ermittelt.

In etwa monatlichen Abständen erfolgen Probewiegungen der Besatzfische zur Ermittlung spezifischer Wachstumsraten (SGR nach BUSACKER et al. 1990) und der Futtermittelverwertung. Regelmäßig wurden kWh-Stände zur Beurteilung des Energiebedarfs der Elektroheizung zur Wassererwärmung notiert.

Zur Erfassung des täglich für den Betrieb des Denitrifikationsreaktors benötigten Routinearbeitszeitbedarfs wurde in mehrfacher Wiederholung der Zeitbedarf verschiedener Arbeitsschritte bei der Bedienung des Reaktors ermittelt.

3.4 Überprüfung und Optimierung der Denitrifikationsleistung unter Nutzung unterschiedlicher C-Quellen

Leicht abbaubare organische Kohlenstoffquellen fungieren heterotrophen Denitrifikanten als Elektronendonatoren. Im hier beschriebenen Versuchsabschnitt sollte die Eignung und Effizienz von vier unterschiedlichen Kohlenstoffquellen im neu entwickelten Denitrifikationsreaktor untersucht werden. Für die Untersuchungen wurden Kohlenstoffquellen gewählt, welche entweder bereits zu positiven Ergebnissen in Denitrifikationsprozessen geführt haben oder aber hinsichtlich Verfügbarkeit und Marktpreis vielversprechend eingesetzt werden können.

Von den anfänglich geplanten Kohlenstoffquellen Ethanol vergällt, Ethanol unvergällt, Methanol und Essigsäure wurden bis auf unvergälltes Ethanol alle auf Eignung und Leistung untersucht. Unvergälltes Ethanol ist aus Kostengründen ohne eine Befreiung von der Branntweinsteuer für die Praxis nicht relevant. Eine Befreiung von der Branntweinsteuer ist zwar prinzipiell für einige technische Anwendungsbereiche möglich, ist jedoch schwierig in der Beantragung und mit hohen Auflagen verbunden. Daher wurde unvergälltes Ethanol in der vorliegenden Untersuchung durch Glycerin als deutlich günstigere Alternative ersetzt.

Die eingesetzten Kohlenstoffquellen werden im Folgenden kurz charakterisiert:

Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), vergällt

In unvergälltem Zustand ist Ethanol auf Grundlage der Branntweinsteuer ein sehr hochpreisiger Rohstoff. Durch den Prozess der Vergällung wird er für den menschlichen Verzehr unbrauchbar und kann damit deutlich kostengünstiger in den Handel gebracht werden. Gängig ist eine Vergällung mit Methylethylketon (MEK) und dem für Menschen extrem bitteren Denatoniumbenzoat. 99%iges Ethanol kostet bei Abnahme von 720 kg bzw. 910 l Gebinden pro Liter derzeit 1,24 € +zzgl. MwSt. und Transport (Online-AGB von ACTS-Worldwide GmbH vom 6.10.2011).

Methanol (CH₃OH)

Methanol ist die einfachste alkoholische Verbindung. Es handelt sich um eine klare, farblose, wassermischbare und alkoholisch riechende Flüssigkeit. Sie ist darüber hinaus leicht flüchtig und entzündlich. Methanol kommt natürlich in Baumwollpflanzen, Früchten, Gräsern und als Stoffwechselprodukt von Bakterien vor. Die Bezeichnung Methyl setzt sich aus den zwei aus dem Griechischen stammenden Worten *méthy* für Wein und *hylé* für Holz zusammen. Diese Bezeichnung entstammt dem ursprünglichen Herstellungsverfahren, der „trockenen Destillation“ aus Holz. Heutzutage wird Methanol überwiegend aus Syntheseprozessen gewonnen und ist die am zweithäufigsten hergestellte organische Chemikalie. Es wird als Lösungs- und Frostschutzmittel sowie als wichtiger Chemierohstoff für Synthesen, z.B. zu Essigsäure verwendet. Auch eine Verwendung als Kraftstoffzusatz ist in den letzten Jahren vermehrt in den Focus gerückt. Methanol ist auch unvergällt recht günstig im Handel erhältlich und in seinen Eigenschaften ähnlich dem Ethanol. Daher wurde es trotz der toxischen Eigenschaften bei oraler Aufnahme in der vorliegenden Untersuchung betrachtet. Methanol kostet bei Abnahme von 720 kg bzw. von 911 l ca. 0,51 € zzgl. MwSt. und Transportkosten pro Liter (Online-AGB von ACTS-Worldwide GmbH vom 6.10.2011).

Essigsäure (CH₃COOH)

In großtechnischem Maßstab wird Essigsäure über biotechnische Fermentation und zum deutlich überwiegenden Teil nach dem „Monsanto-Verfahren“ hergestellt. In diesem Verfahren wird Methanol mit Kohlenmonoxid katalytisch zu Essigsäure umgesetzt. Essigsäure wird als Würz- und Säuerungsmittel für den menschlichen Konsum genutzt, dabei wird je nach Konzentration zwischen Essig mit 5% Säure und Essigessenz mit 25% Säure unterschieden. Im technisch industriellen Bereich findet Essigsäure unter anderem zur Herstellung von Polymeren Verwendung. Problematisch im Umgang mit hochkonzentrierter Essigsäure ist die ätzende Wirkung der Flüssigkeit und des entstehenden Aerosols. Damit ist ihre Nutzung nur unter der Beachtung verschärfter Arbeitsschutzbedingungen (Handschuhe, Schutzbrille, Atemschutz) möglich. Dies erhöht den Arbeitsaufwand bei ihrer Verwendung. 60%ige Essigsäure kostet bei Abnahme von 1000 kg bzw. 1000 l Gebinden rund 0,83 € zzgl. MwSt. und Transportkosten pro Liter (Online-AGB von ACTS-Worldwide GmbH vom 6.10.2011).

Glyzerin (C₃H₈O₃)

Glyzerin ist eine farblose, wassermischbare und viskose Flüssigkeit. Es handelt sich bei ihr um den einfachsten dreiwertigen Alkohol, ein Triol. Glyzerin ist in allen natürlichen Fetten und Ölen als Fettsäureester vorhanden. Glyzerin entsteht bei der Verseifung von natürlichen Fetten und Ölen. Inzwischen fallen auch große Mengen Rohglyzerin bei der Biodieselproduktion an. Glyzerin wird als Frostschutzmittel, Schmierstoff, Weichmacher und Feuchtigkeitsspender in Lebensmitteln und Kosmetik angewendet. Durch den hohen Anfall an Rohglyzerin aus der Biodieselproduktion wird aber verstärkt nach alternativen Anwendungsmöglichkeiten gesucht. Dabei wird es neben dem Einsatz als Nährmedium für Biogasanlagen auch im Tierfutter für Schweine, Wiederkäuer und Geflügel eingesetzt. Reines Glyzerin ist aufgrund des hohen Reinigungsaufwandes preislich deutlich über dem Futterglyzerin aus der Biodieselproduktion anzusetzen. Futterglyzerin besteht laut Lieferant (NAWARO GLYC) typischerweise zu 80% aus Glyzerin, 14% aus Wasser, 6% Rohasche und maximal 0,5% Methanol. Preislich liegt das Futterglyzerin bei einer Abnahme im

größeren Maßstab ab 25 t bei 280-300 €/t und somit bei rund 0,35 € bis 0,38 € je Liter zzgl. MwSt. und Transport (Mr.-Wetterau, telefonische AGB-Nachfrage vom 2.12.11). Reines Glycerin (98%) kostet im 35-l-Kunststoffgebinde ca. 8,54 € pro Liter, zzgl. MwSt. und Transport (Carl Roth Chemiebedarf Internetrecherche 14.12.11).

Die zur Untersuchung anstehenden C-Quellen wurden gleichmäßig über den Tag verteilt etwa viermal stündlich mithilfe des zeitgesteuerten Magnetventils in den Denitrifikationsreaktor eingebracht. Dazu wurde die täglich zu verabreichende Menge in 3 l Wasser gelöst und in den Vorlagebehälter überführt. Der Denitrifikationsreaktor wurde für den C-Quellenvergleich mit einer Zulaufwassermenge von etwa $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ beaufschlagt. Die Umwälzung des Reaktorbettes erfolgte über die Zirkulation des Innertgases für $2 \times 40 \text{ sec} \cdot \text{h}^{-1}$. Die Kreislaufanlage wurde mit einem Äquivalent von 3 kg aufgenommenem Alleinfuttermittel pro Tag (ca. 120 g $\text{NH}_4\text{-N}$ -Abgabe pro Tag) über Futter- und Harnstoffgaben gefahren. Hieraus resultieren $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im rezirkulierenden Kreislaufwasser und somit auch im Zulauf des Denitrifikationsreaktors von etwa $50 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$.

Während der Startphase wurde bei jeder zu testenden C-Quelle das Ablaufwasser aus dem Denitrifikationsreaktor zunächst nicht in die Kreislaufanlage zurückgeführt. Der Frischwasseraustausch in der KLA erfolgte somit durch Ablaufwasserabnahme über den Denireaktorablauf. Erst wenn Redoxpotenziale und Laborwerte eine stabilisierte Denitrifikationsleistung indizierten, erfolgte die Rückführung des Reaktorablaufs in die Kreislaufanlage und somit die Schließung des Kreislaufs. Von diesem Zeitpunkt an konnte die Auswirkung der verwendeten C-Quelle auf die Wasserparameter im Rezirkulationswasser sowie auf Futteraufnahme und Verhalten der Zander beobachtet werden.

Nach Beendigung eines Versuchsdurchgangs mit einer C-Quelle erfolgte wiederum die Ausleitung des Reaktorablaufs aus dem System. Die bislang genutzte C-Quelle wurde in Schritten durch die Vermischung mit der neu zu testenden C-Quelle substituiert. Der Übergang von einer auf die nächste C-Quelle erfolgte in jeweils vier Tagen.

Für die zu testenden C-Quellen wurden über einen Beobachtungszeitraum von jeweils mindestens 6 Wochen folgende Parameter ermittelt und ausgewertet:

- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im Reaktorablauf
- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Reduzierung während der Reaktorpassage (%)
- Q Reaktorzu- und -ablauf ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$)
- Verweilzeit (h)
- Denitrifikationsrate (g N pro m^3 Reaktorbettvolumen und Tag)
- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im Reaktorablauf
- $\text{NO}_2\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
- $\text{NO}_2\text{-N}$ -Konzentration ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im Reaktorablauf
- TOC ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
- TOC ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) im Reaktorablauf
- Redoxpotenzial (mV) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf

Redoxpotenzial (mV) im Reaktorablauf
pH-Wert im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
pH-Wert im Reaktorablauf
SBV ($\text{mval}\cdot\text{l}^{-1}$) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
SBV ($\text{mval}\cdot\text{l}^{-1}$) im Reaktorablauf
Trübung (FNU) im zirkulierenden Anlagenwasser / im Reaktorzulauf
Trübung (FNU) im Reaktorablauf
Änderungen in Futteraufnahme und Verhalten der gehaltenen Zander
C-Quellenbedarf ($\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$)

3.5 Untersuchungen zum Sauerstoffeliminationspotenzial und zur hydraulischen Belastungsfähigkeit des Denitrifikationsreaktors

Zur Bestimmung des Sauerstoffeliminationspotenzials und zur hydraulischen Belastungsfähigkeit des Denitrifikationsreaktors wurde anlagenüblich mit organischer Substanz und N-Verbindungen belastetes Haltungswasser der Kreislaufanlage bei zunächst mittlerer hydraulischer Belastung und O_2 -Zufuhr von einem Grundzustand ausgehend, in zunehmender Menge durch den Denitrifikationsreaktor geführt. Zur Bestimmung des Sauerstoffeliminationspotenzials wurde die Wasserzufuhr bei variierenden Mengen an zugeführtem gasförmigem Stickstoff und permanenter Zirkulation des Aufwuchskörperbettes so weit gesteigert, bis Sauerstoffkonzentrationen im Reaktorablauf von $0,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ überschritten wurden.

Für die Bestimmung der hydraulischen Belastungsfähigkeit bei gewährleisteter Denitrifikation wurde die Wasserzufuhr in den Reaktor in Stufen so weit erhöht, bis Redoxpotenziale von etwa -120 mV bis -150 mV und eine damit einhergehende effiziente Denitrifikationsleistung noch eingehalten werden konnten. Die hydraulische Belastbarkeit des Denitrifikationsreaktors wurde hinsichtlich der Umwälzungsintensität des Aufwuchskörperbettes, der Menge an zugeführter C-Quelle (Methanol) und des zugeführten N_2 -Volumenstroms bei unterschiedlichen Betriebszuständen getestet. Die Denitrifikationsrate nach Einstellung der gewünschten Betriebszustände wurde ermittelt.

3.6 Erfassung von Betriebsaufwand, Medienverbräuchen und Systemanfälligkeit im Dauereinsatz; ökonomische und ökologische Bewertung

In diesem Versuchsabschnitt erfolgte unter einem für den Praxiseinsatz optimierten Betriebszustand des Denitrifikationsreaktors die Ermittlung von Betreuungsaufwand, Wasser-, Energie-, Natriumhydrogencarbonat-Einsparpotenzial und Störanfälligkeit im Routinebetrieb. Anhand der erfassten Medienverbräuche mit/ohne Denitrifikationsreaktor sowie des für den Denitrifikationsreaktor zusätzlich zu kalkulierenden Arbeitszeitaufwands wurde unter Annahme praxisüblicher Preisniveaus für Frischwasserversorgung und Abwasserentsorgung der ökonomische Nutzen des entwickelten Denitrifikationsreaktors abgeschätzt. Das Potenzial des Reaktors zur Reduzierung der Emissionen geschlossener Kreislaufanlagen wurde evaluiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Der Selbstreinigende Innertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor)

Aus einem strömungstechnisch optimierten Moving bed Reaktor der Fa. Spranger wurde ein Denitrifikationsreaktor mit einem Reaktorvolumen von $0,65 \text{ m}^3$ hergestellt. Das Aufwuchskörperbett mit ca. 600 m^2 spezifischer Oberfläche pro m^3 weist ein Volumen von $0,39 \text{ m}^3$ auf. Für die Umwälzung des Aufwuchskörperbettes mit Innertgas ist ein zeitgesteuertes Ringkanalgebläse mit einer Leistungsaufnahme von $0,46 \text{ kW}$ angeschlossen. Das Gebläse verfügt bei 40 mbar über eine maximale Förderleistung von $1450 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Bei Betrieb am Reaktor bei einer Einblastiefe von $0,95 \text{ m}$ wurde ein maximales Fördervolumen von $380 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ausgeliefert. Für das erste Inbewegungbringen des Aufwuchskörperbettes ist ein Fördervolumen von minimal $90 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ notwendig. Ist das Bett angefahren, reicht ein Fördervolumen von $50 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ aus, um es dauerhaft in Bewegung zu halten.

Für die Serienausführung eines Denitrifikationsreaktors nach dem beschriebenen Verfahren bietet sich somit aus energetischen Gründen die Installation eines Gebläses mit geringer Leistungsaufnahme für den Dauerbetrieb an sowie eines Gebläses mit Leistungsreserven, welches lediglich kurzfristig für das Anfahren des Aufwuchskörperbettes zugeschaltet werden muss.

Für die Wasserzuführung steht eine Tauchpumpe mit einer Leistungsaufnahme von 5 W zur Verfügung. Die Zudosierung der C-Quelle erfolgt durch einen über dem Reaktor angebrachten Vorratsbehälter mithilfe eines zeitgesteuerten Magnetventils. Über einen Durchflussregler ($0,1$ bis $1,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) kann aus einer Gasflasche Stickstoff in den Reaktor eingespeist werden. Abb. 2 a/b zeigt den an die Kreislaufanlage im IfB angeschlossenen Denitrifikationsreaktor.



Abb. 2a: selbstreinigender Innertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor) im halbtechnischen Maßstab ($0,65 \text{ m}^3$ Reaktorvolumen); 2b: Verschlussdeckel mit Zu- und Abgängen.

In den ersten Monaten nach Installation des Denitrifikationsreaktors erfolgten Tests von Betriebszuständen, etwa zur Steuerung und Sicherung der hydraulischen Beaufschlagung, zur Zudosierung der C-Quelle und der Beaufschlagung und Schaltfrequenz des Gebläses für eine sichere Umwälzung des Aufwuchskörperbettes.

Für die folgenden Untersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen wurde ein energiesparender Betriebszustand mit stündlich zweimaliger Umwälzung des Aufwuchskörperbettes für jeweils 40 sec. gewählt. Hierdurch konnte auch langfristig ein Zusetzen und Zusammenballen des Aufwuchskörperbettes sicher vermieden werden. Die hydraulische Beaufschlagung des Reaktors erfolgte mit ca. $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ aus dem rezirkulierenden Wasserstrom der Kreislaufanlage. Diese Wassermenge entspricht der für eine Ausverdünnung von $\text{NO}_3\text{-N}$ auf eine Systemkonzentration von rund $55 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ benötigte Frischwassermenge bei täglicher Verfütterung von etwa 3 kg Trockenfutterfüttermittel. Die Reaktoraufenthaltszeit des zu denitrifizierenden Wasserstroms entsprach bei dieser hydraulischen Beaufschlagung etwa 7 h.

Abb. 3 stellt die Verläufe von Sauerstoffkonzentration, Redoxpotenzial und $\text{NO}_3\text{-N}$ im Reaktorablauf, sowie von $\text{NO}_3\text{-N}$ im Rezirkulationswasser der Kreislaufanlage (\Leftrightarrow Reaktorzulauf) während der Einfahrphase des Denitrifikationsreaktors dar.

Die Entwicklung der Sauerstoffkonzentration verdeutlicht, dass die Reaktoraufenthaltszeit von ca. 7 h allein nicht dazu führte, den über das Haltungswasser eingetragenen Sauerstoff bei einer Zulaufkonzentration von ca. $8 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ deutlich abzubauen. Ohne Zudosierung der externen C-Quelle pendelte sich der O_2 -Gehalt im Reaktorablauf zunächst bei etwa $6,5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ ein. Direkt nach der täglichen Zudosierung von $0,3 \text{ l}$ vergälltem Ethanol am 26.07.2010 sank der O_2 -Gehalt im Reaktor jedoch rapide ab und erreichte nach knapp drei Wochen mit unter $0,2 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ ein Niveau, bei dem von einem langsam einsetzenden Denitrifikationsprozess auszugehen war (METCALF & EDDY 2003).

Parallel zur Reduzierung des O_2 -Gehalts im Reaktor sank erwartungsgemäß das Redoxpotenzial im Reaktorablauf. Ab dem 20.08.2010, knapp vier Wochen nach Beginn der Ethanolzudosierung, indizierten minimale O_2 -Gehalte, ein Redoxpotenzial im Bereich von -120 mV sowie eine Verringerung der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen zwischen Reaktorzu- und ablauf im Bereich von 75 % die Funktionsfähigkeit des Denitrifikationsreaktors. Die Nitratkonzentrationen im zirkulierenden Wasserkörper der Kreislaufanlage pegelten sich auf Werte um $30 \text{ NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ ein.

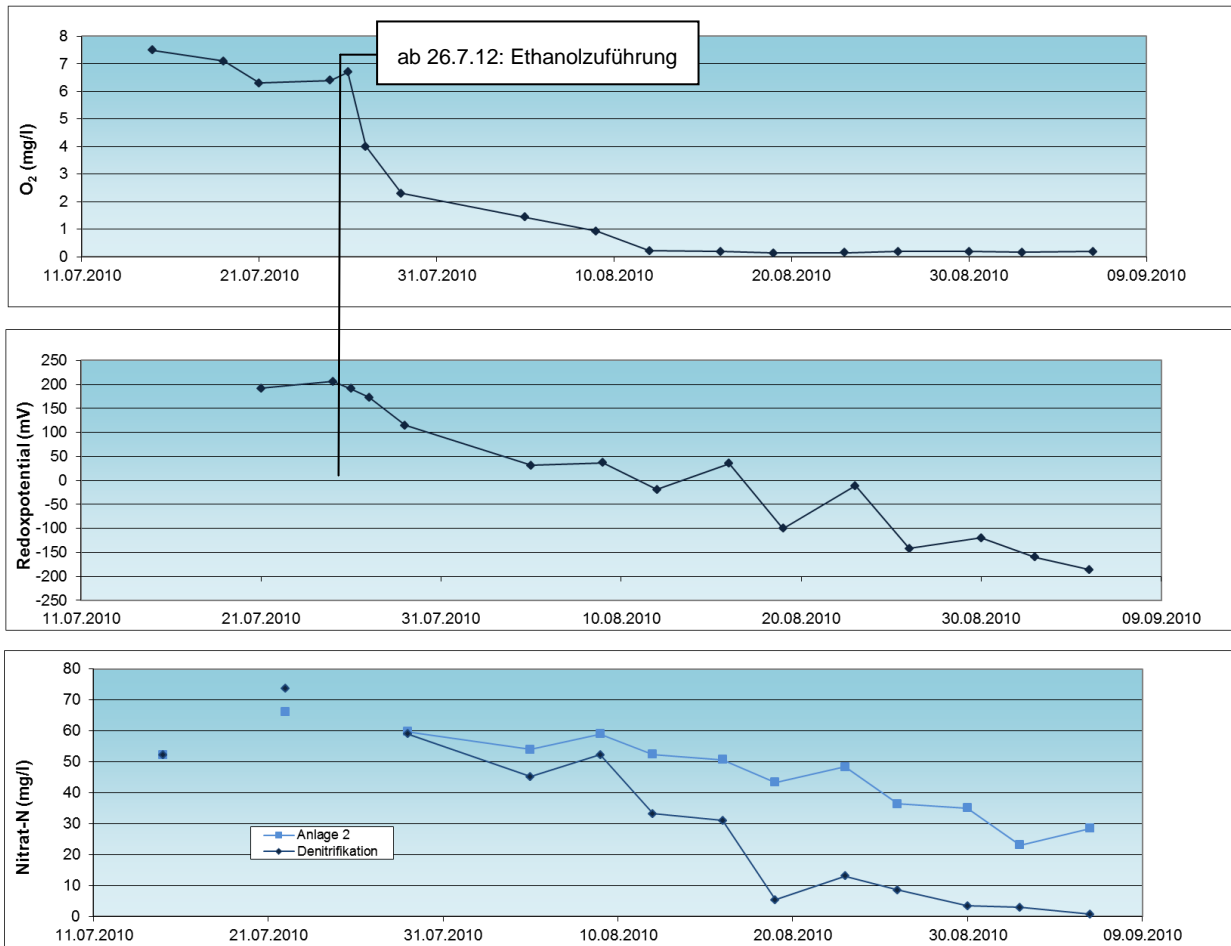


Abb. 3: Verläufe von Sauerstoffkonzentration, Redoxpotenzial und NO₃-N im Reaktorablauf, sowie von NO₃-N im Rezirkulationswasser der Kreislaufanlage (↔ Reaktorzulauf) während der Einfahrphase des Denitrifikationsreaktors.

4.2. Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors unter Nutzung unterschiedlicher C-Quellen

4.2.1 Betriebsweise

Die Untersuchungen zur Denitrifikationsleistung mit vier ausgewählten Kohlenstoffquellen erstreckten sich mit Unterbrechungen über einen Zeitraum von über einem Jahr. Für Auswertung der erzielbaren Denitrifikationsleistungen mit den unterschiedlichen C-Quellen wurden nur Tageswerte einbezogen, an denen auch die wöchentlichen Laboruntersuchungen durchgeführt wurden und somit komplette Informationen über die zum entsprechenden Zeitpunkt gegebenen relevanten Wasserparameter vorlagen. Für den Vergleich wurden lediglich Datensätze einbezogen, die auf ähnliche und optimale Voraussetzungen für hohe Denitrifikationsleistungen verwiesen. So wurden für die Auswertung Datensätze von Tagen ausgeschlossen, an denen die hydraulische Beaufschlagung des Reaktors durch Fehlregelung zu gering ($< 1,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) bzw. zu hoch ($> 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) ausfiel. Weiterhin erfolgte der Ausschluss, wenn NO₃-N-Konzentrationen im Kreislaufsystem / im Reaktorzulauf durch bereits massive Denitrifikationswirkung auf unter $33,9 \text{ NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ ($< 150 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$) gesunken waren. Schließlich standen 54, alle relevanten

Parameter umfassenden Datensätze für einen Vergleich der Denitrifikationsleistung mit den Kohlenstoffquellen Ethanol vergällt (23 Datensätze), Methanol (15 Datensätze), Essigsäure (6 Datensätze) und Glycerin (10 Datensätze) zur Verfügung.

Tab. 2 stellt die während des Leistungsvergleiches beobachteten Mittelwerte und Streuungsindikatoren für die wichtigsten Betriebsparameter dar.

Tab. 2: Zentrale Betriebsparameter während des Vergleichs der Denitrifikationsleistung bei Nutzung vier unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glycerin
NO₃ Reaktorzulauf (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	210,3	205,7	207,5	242,6
Min	154,0	152,0	161,0	173,0
Max	444,0	276,0	241,0	318,0
STABW	74,7	41,1	38,8	50,2
CV	35,5	20,0	18,7	20,7
NO₃-N Reaktorzulauf (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	47,5	46,5	46,9	54,8
Min	34,8	34,4	36,4	39,1
Max	100,3	62,4	54,5	71,9
STABW	16,9	9,3	8,8	11,4
CV	35,5	20,0	18,7	20,7
pH-Wert Reaktorzulauf				
Mittelwert	7,1	7,1	7,1	7,0
Min	6,9	6,7	7,0	6,8
Max	7,3	7,2	7,2	7,1
STABW	0,1	0,1	0,1	0,1
CV	1,8	1,9	1,2	1,4
SBV Reaktorzulauf (mval·l⁻¹)				
Mittelwert	0,8	0,6	0,7	0,5
Min	0,7	0,4	0,7	0,3
Max	1,3	0,9	0,8	0,7
STABW	0,2	0,2	0,1	0,1
CV	18,9	32,5	8,2	25,7
TOC Reaktorzulauf (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	22,3	19,7	27,7	24,0
Min	12,0	9,0	14,0	13,0
Max	38,5	32,0	37,0	37,0
STABW	9,5	8,7	12,1	9,0
CV	42,5	44,0	43,7	37,5
Reaktoraufenthaltszeit (h)				
Mittelwert	7,5	7,3	7,1	7,7
Min	5,4	5,4	7,0	6,5
Max	9,0	9,0	7,4	8,7
STABW	1,3	1,1	0,2	0,7
CV	17,1	15,1	2,5	9,6

Mittelwerte und Streuungen von Nitratkonzentrationen, pH-Werten, Säurebindungsvermögen und gesamtorganischem Kohlenstoff im zirkulierenden Wasserkörper und somit im Reaktorzulauf lagen in einem für Kreislaufanlagen zur Haltung sensibler Fischarten wie Zandern praxisüblichen Niveau. Mit 7,1 bis 7,7 h lag die Reaktoraufenthaltszeit des zu denitrifizierenden Wasserstroms für alle getesteten Kohlenstoffquellen in einem ähnlichen Bereich.

4.2.2 Denitrifikationsleistung

Tab. 3 gruppiert zentrale, zur Beurteilung der Denitrifikationsleistung benötigten Parameter.

Tab. 3: Zentrale Leistungsparameter zur Abschätzung der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glyzerin
NO₃-N Reaktorzulauf / KLA (mg*l⁻¹)				
Mittelwert	47,5	46,5	46,9	54,8
Min	34,8	34,4	36,4	39,1
Max	100,3	62,4	54,5	71,9
STABW	16,9	9,3	8,8	11,4
CV	35,5	20,0	18,7	20,7
NO₃-N Reaktorablauf (mg*l⁻¹)				
Mittelwert	12,8	11,2	11,5	9,4
Min	0,3	1,9	3,5	1,9
Max	45,0	25,3	19,2	31,0
STABW	12,0	7,2	6,5	8,4
CV	93,6	64,3	56,0	89,5
NO₃-N-Reduktion (%)				
Mittelwert	75,6	76,4	73,9	84,2
Min	50,2	53,4	55,3	56,9
Max	99,0	95,1	93,5	95,8
STABW	17,0	14,0	15,8	11,0
CV	22,5	18,3	21,4	13,1
Denitrifikationsrate (g N/d*m³ Aufwuchskörperbett)				
Mittelwert	206,0	201,1	199,1	234,6
Min	105,8	147,0	134,8	178,1
Max	383,3	315,8	289,4	290,5
STABW	82,5	41,5	75,4	31,6
CV	40,0	20,6	37,9	13,5
Volumen einzusetzender Kohlenstoffquelle (l*d⁻¹)				
Mittelwert	0,2	0,6	1,6	0,6
Min	0,1	0,2	1,2	0,5
Max	0,4	0,9	1,9	0,9
STABW	0,1	0,2	0,4	0,1
CV	34,2	35,9	26,1	24,2

Unter den beschriebenen Betriebsbedingungen und Zulaufkonzentrationen um $50 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ wurden im SID-Reaktor mit allen getesteten C-Quellen dauerhaft Denitrifikationsraten von etwa $200 \text{ g N pro m}^3 \text{ Aufwuchskörperbettvolumen und Tag}$ und erzielt. Durch geringe Streuungsparameter indiziert, wiesen Glycerin und Methanol die stabilste Denitrifikationsleistung auf.

Aufgrund stets unterschiedlicher Betriebsweisen sind die bislang publizierten Denitrifikationsraten unter Aquakulturbedingungen nur bedingt vergleichbar. Die im SID-Reaktor erzielten Denitrifikationsraten liegen im mittleren Bereich der in der intensiven Fischhaltung erzielten und publizierten Werte (Zusammenfassungen bei VAN RIJIN et al. 2006 und HAMLIN et al. 2008).

Bis zu einem gewissen Grad vergleichbar sind Untersuchungen von HAMLIN et al. (2008) zur Denitrifikation in Mooving bed-Filtern, die im Gegensatz zu den vorliegenden Untersuchungen jedoch statisch und über Kurzzeitintervalle von maximal 10 Tagen betrieben wurden. Zwischen den Betriebsintervallen mussten die Filter für die Rückspülung stets außer Betrieb genommen werden. Nur während der Rückspülungen arbeiteten die Filter nach dem Mooving bed-Prinzip. HAMLIN et al. (2008) erreichten mit unterschiedlichen C-Quellen bei $\text{NO}_3\text{-N-Konzentrationen von } 55 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ kurzfristig maximale Denitrifikationsraten von knapp $700 \text{ g NO}_3\text{-N pro Tag und m}^3 \text{ Aufwuchskörperbettvolumen}$. Die beobachteten Denitrifikationsraten sanken im statischen Mooving bed jedoch nach wenigen Tagen auf Werte zwischen $200 \text{ und } 300 \text{ g NO}_3\text{-N pro Tag und m}^3 \text{ Aufwuchskörperbettvolumen}$ ab. Sie lagen damit dann in der Größenordnung der auch in Tab. 3 dargestellten, dauerhaft unter den beschriebenen Betriebsbedingungen erzielten Werte im SID-Reaktor.

DUPLA et al. (2006) konnten in einem für die Meerwasseraquaristik entwickelten Mooving-Bed-Denitrifikationsreaktor im Labormaßstab ($33 \text{ l Reaktorvolumen}$) bei einer Ausgangs- $\text{NO}_3\text{-N-Konzentration um } 55 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ Denitrifikationsraten von bis zu $800 \text{ g NO}_3\text{-N pro Tag und m}^3 \text{ Aufwuchskörperbettvolumen}$ erreichen. Der in ihren Untersuchungen eingesetzte Reaktortyp wurde im Gegensatz zu klassischen Mooving bed-Reaktoren, in denen das Aufwuchskörperbett üblicherweise mit Luft in Bewegung gesetzt wird, mit über Düsen eingetragendem Druckwasser betrieben.

Das zugeführte Nitrat wurde während der Passage des SID-Reaktors um durchschnittlich etwa 75% eliminiert. In Abhängigkeit von hydraulischer Belastung und eingesetzter C-Quellen-Menge konnten jedoch mit allen Kohlenstoffquellen während der Reaktorpassage auch eine Reduzierung der Nitratfracht von deutlich über 90% beobachtet werden. Durch eine Erhöhung der zudosierten C-Quellenmenge bei gegebener hydraulischer Beaufschlagung kann bei Bedarf mit allen geprüften Kohlenstoffquellen eine Nitratabbaurate von nahe 100% erreicht werden. Die damit einhergehende weitere Absenkung des Redoxpotenzials birgt jedoch die Gefahr der Entstehung stark fischtoxischen Schwefelwasserstoffs. Somit wird für eine sichere Betriebsweise die Einstellung von Betriebsbedingungen empfohlen, die zu einer Restkonzentration an Nitrat im Reaktorablauf führen, seitens des Redoxpotenzials jedoch Sicherheiten zu dem Bereich von unterhalb -300 mV bis -400 mV bleiben, ab dem $\text{H}_2\text{S-Bildung}$ zu erwarten ist (VAN HOEK et al. 1988; LEE et al. 2000)

4.2.3 Redoxpotenzial als Steuergröße

Tab. 4 beinhaltet die während des Vergleiches der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen erzielten Redoxpotenziale.

Tab 4: Redoxpotenziale beim Betrieb des SID-Reaktors mit unterschiedlichen C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glyzerin
Redox-Potenzial Reaktorablauf (mV)				
Mittelwert	-162,4	-152,8	-60,4	-211,0
Min	-355,0	-268,0	-78,0	-297,0
Max	30,0	-27,0	-44,0	-103,0
STABW	114,1	62,0	15,3	57,0
CV	-70,2	-40,6	-25,3	-27,0

Nitratabbauraten von durchschnittlich rund 75 % (vergl. Tab. 3) gingen im SID-Reaktor bei der Verwendung von vergälltem Ethanol, Methanol und Glyzerin mit Redoxpotenzialen im Bereich von -150 und gut -200 mV einher (Tab. 4). Hohe Denitrifikationsleistungen wurden bei diesen C-Quellen hinsichtlich des Redoxpotenzials bereits zwischen -120 mV und -150 mV erreicht. Bei Nutzung von Essigsäure wurden Nitratabbauraten von knapp 75 % bereits bei Redoxpotenzialen von -60 mV beobachtet. Niedrige Redoxpotenziale korrelierten klar mit hohen Nitratabbauraten ($r = -0,65$).

4.2.4 Bildung von $\text{NO}_2^- / \text{NH}_4^+$

Wie in der Literatur beschrieben (SAUTHIER et al. 1998; LEE et al. 2000; HAMLIN et al. 2008) ging die gewählte Betriebsweise mit nicht ganz vollständiger Nitratabbauraten auch im SID-Reaktor mit der Anreicherung von Nitrit während der Reaktorpassage einher (Tab. 5). Die mittleren NO_2^- -N-Konzentrationen stiegen in allen Fällen zum Teil deutlich an und erreichten insbesondere bei knapper Zudosierung der C-Quelle über $20 \text{ mg NO}_2^- \cdot \text{l}^{-1}$. Die resultierenden NO_2^- -N-Konzentrationen führten aufgrund der starken Verdünnung im zirkulierenden Gesamtwasserstrom der KLA sowie des raschen Abbaus im Nitrifikationsfilter jedoch zu keinen Beeinträchtigungen für die gehaltenen Fische. Die im Haltungswasser maximal beobachteten Nitritkonzentrationen von $0,6 \text{ mg NO}_2^- \cdot \text{l}^{-1}$ sind insbesondere bei leichter Aufsatzung des Haltungswassers auch für sensible Fischarten unbedenklich (SCHRECKENBACH 2002).

Die Konzentration an NH_4^+ -N gingen im Falle aller getesteten C-Quellen auf Werte nahe der Nachweisgrenze zurück. Während des Denitrifikationsprozesses abnehmende Ammoniumkonzentrationen wurden auch in auf Basis von Belebtschlämmen arbeitenden Denitrifikationsreaktoren vorgefunden (VAN HOEK et al. 1988; KLAS et al. 2006). Die Ergebnisse von MENASVETA et al. (2001) und HAMLIN et al. (2008) deuten darauf hin, dass in diskontinuierlich betriebenen Denitrifikationsreaktoren (Festbett, fest liegendes Moving bed) hingegen mit der Gefahr eines Anstieges der Ammonium/Ammoniak-Konzentration zu rechnen ist. Offenbar können fermentative Bakterien unter diesen

Bedingungen mit zunehmender Zeitdauer NH_4/NH_3 produzieren. Bei HAMLIN et al. (2008) stellten sich bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen bereits nach 8 Tagen Ammoniakkonzentrationen bis über $5 \text{ mg NH}_3\text{-N}\cdot\text{l}^{-1}$ ein.

Tab. 5: Entwicklung von Nitrit- und Ammonium -N-Konzentrationen bei Nutzung vier unterschiedlicher C-Quellen während der Passage des SID-Reaktors (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glyzerin
NO₂-N Reaktorzufluss (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	0,25	0,10	0,08	0,13
Min	0,07	0,01	0,04	0,07
Max	0,60	0,29	0,12	0,20
STABW	0,17	0,11	0,04	0,05
CV	68,78	103,92	47,24	38,38
NO₂-N Reaktorabfluss (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	7,09	2,06	2,72	1,32
Min	0,12	0,59	0,06	0,03
Max	20,98	10,64	6,14	6,26
STABW	7,88	3,47	3,13	2,47
CV	111,12	168,28	114,97	186,80
NH₄-N Reaktorzufluss (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	0,47	0,34	0,28	0,22
Min	0,28	0,06	0,24	0,16
Max	1,04	1,53	0,35	0,25
STABW	0,25	0,43	0,05	0,03
CV	51,97	127,08	17,28	15,62
NH₄-N Reaktorabfluss (mg·l⁻¹)				
Mittelwert	0,12	0,03	0,04	0,03
Min	0,03	0,00	0,03	0,02
Max	0,35	0,13	0,06	0,05
STABW	0,12	0,04	0,01	0,01
CV	95,14	141,86	33,93	42,92

4.2.5 Mengenbedarf C-Quellen

Das für die erwünschte Denitrifikationsleistung täglich einzubringende Volumen der jeweiligen C-Quelle unterschied sich in Abhängigkeit der genutzten Kohlenstoffquelle (Tab. 3). Im Falle von Methanol und Glyzerin mit einem Reinheitsgrad nahe 100 % mussten im Mittel $0,6 \text{ l}\cdot\text{d}^{-1}$ und somit etwa $0,2 \text{ l}$ pro kg Futter und Tag eingesetzt werden. Von der verwendeten 60 %igen Essigsäure mussten täglich durchschnittlich $1,6 \text{ l}$ zudosiert werden. Mit einem Bedarf von durchschnittlich $0,2 \text{ l}$ pro Tag erwies sich die Nutzung von vergälltem Ethanol volumetrisch als am effizientesten zur Einstellung günstiger Betriebsbedingungen im SID-Reaktor.

Theoretisch werden im Zuge des Denitrifikationsprozesses für die vollständige Reduktion von $1 \text{ g NO}_3\text{-N}$ zu N_2 etwa $0,85 \text{ g}$ gesamtorganischer Kohlenstoff (TOC) benötigt (SAUTHIER et al. 1998). Für die Reduktion der über den Betrieb der Kreislaufanlage täglich eingetragenen $120 \text{ g NO}_3\text{-N}$ wären entsprechend etwa 100 g TOC notwendig.

Stöchiometrisch würden hierzu rund 243 ml Ethanol, 337 ml Methanol, 396 ml Essigsäure (60 %) bzw. 203 ml Glycerin benötigt. Die eingesetzten C-Quellen wurden zumeist höher dosiert. Über das rezirkulierende Haltungswasser, welches durchschnittlich $23 \text{ mg TOC} \cdot \text{l}^{-1}$ aufwies (Tab. 6), wurden dem Denitrifikationsreaktor bei der hydraulischen Beaufschlagung von ca. $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ zudem rund 45 g TOC über das Zirkulationswasser zugeführt.

Trotz des bilanzierten Überangebotes an TOC wurde im SID-Reaktor im Regelfall lediglich eine Nitratreduktion um etwa 75 % erreicht. Offenbar führen biochemische Prozesse neben der Denitrifikation dazu, dass höhere Zudosierungen an C-Quellen notwendig sind, um kontinuierlich gute Betriebsbedingungen für die Erzielung hoher Denitrifikationsleistungen zu schaffen. Die Notwendigkeit einer C-Quellen-Überdosierung zur Erzielung einer weitgehend kompletten Nitratreduktion zeigte sich auch in den Studien von DUPLA et al. (2006) und HAMLIN et al. (2008).

Eine geringe Steigerung des gesamtorganischen Kohlenstoffs während der Reaktorpassage trotz umfangreicher C-Quellen-Zudosierung insbesondere im Falle von Essigsäure und Glycerin (Tab. 6) könnten ein Hinweis auf die Festlegung von Kohlenstoff in Bakterienbiomasse sein. Bei Nutzung dieser Substanzen als C-Quelle konnte die massive Bildung von Bakterienbiomasse im SID-Reaktor beobachtet werden. Essigsäure, in abgeschwächter Form auch vergälltes Ethanol führten zu einer milchig schleimigen Optik des Ablaufwassers. Bei der Verwendung von Glycerin kam es zu einer massiven Flockenbildung. Methanol führte mit Abstand zur geringsten Bildung von Bakterienbiomasse und zur deutlichsten Erhöhung gesamtorganischen Kohlenstoffs im Reaktorablauf. Die im Ablaufwasser gemessene Trübung spiegelt das beobachtete Aufkommen von Bakterienbiomasse während der Reaktorpassage bei Nutzung der unterschiedlichen C-Quellen recht gut wieder (Tab. 7).

Tab. 6: Konzentrationen an gesamtorganischem Kohlenstoff (TOC) in Zu- und Ablauf des SID-Reaktors (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glycerin
TOC Reaktorzufluss ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)				
Mittelwert	22,3	19,7	27,7	24,0
Min	12,0	9,0	14,0	13,0
Max	38,5	32,0	37,0	37,0
STABW	9,5	8,7	12,1	9,0
CV	42,5	44,0	43,7	37,5
TOC Reaktorablauf ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)				
Mittelwert	33,5	41,3	25,7	30,2
Min	21,7	16,0	23,0	21,0
Max	46,0	52,0	29,0	43,0
STABW	10,6	11,2	3,1	9,7
CV	31,8	27,2	11,9	32,3

Tab. 7: Trübung im Zu- und Ablauf des SID-Reaktors bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glyzerin
Trübung Reaktorzufluss (FNU)				
Mittelwert	6	4	10	8
Min	2	1	5	3
Max	38	10	17	14
STABW	9	3	6	4
CV	145	64	56	50
Trübung Reaktorabfluss (FNU)				
Mittelwert	16	10	21	56
Min	6	3	14	17
Max	48	24	32	125
STABW	12	7	8	37
CV	71	66	38	66

Die massive Trübung im Reaktorabfluss bei Verwendung von Glyzerin führte nur zu einer moderaten Eintrübung des gesamten Kreislaufsystems (vergl. Trübung Reaktorzufluss). Aufgrund der recht grobflockigen Struktur der bei Glyzerin-Nutzung entstehenden Bakterienbiomasse ist der mit einer 60 µm Siebgaze ausgerüstete Trommelfilter offenbar in der Lage, ein Großteil der Schwebstoffbelastung zu entfernen. Weniger effizient gelang dem mechanischen Reinigungssystem die Eliminierung der Bakterienbiomasse bei Verwendung von Essigsäure und Ethanol.

Während des Langzeitbetriebes des SID-Reaktors konnte kein deutlicher Zusammenhang zwischen der durch Fütterung und Harnstoffzudosierung verursachten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Belastung im System und der einzusetzenden C-Quellen-Menge festgestellt werden. Sehr viel enger war die zur Einstellung des gewünschten Redoxpotenzials von etwa -120 bis -150 mV benötigte C-Quellen-Menge mit der hydraulischen Beaufschlagung des Reaktors und der Umwälzfrequenz des Aufwuchskörperbettes verknüpft. War für einen gewählten Betriebszustand die benötigte C-Quellen-Menge einmal gefunden, hatten Umstellungen der Futtermenge keinen darstellbaren Einfluss auf Redoxpotenzial und Denitrifikationsleistung.

Die Einstellung eines optimalen C/N-Verhältnisses für die Denitrifikanten spielt im SID-Reaktor offenbar nur eine untergeordnete Bedeutung für die Menge an zuzudosierender C-Quelle. Nennenswerte Mengen an Kohlenstoff scheinen für biochemische Nebenprozesse in Verbindung mit O_2 -Eliminierung aus dem Zulaufwasser und Aufbau von Bakterienbiomasse benötigt zu werden. Im Zusammenspiel aller biochemischen Prozesse kommt es, charakterisiert durch ein Redoxpotenzial von unter etwa -120 mV, schließlich zu Umgebungsbedingungen, in denen auch die heterotrophe Denitrifikation optimal ablaufen kann.

Die innerhalb der Rahmenbedingungen gegebene Unabhängigkeit der Betriebsweise des SID-Reaktors von der aktuell eingetragenen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht führt zu maßgeblichen Erleichterungen im praktischen Betrieb. So kann die einmal etablierte Betriebsweise auch bei in geschlossenen Kreislaufanlagen durch Besatz und Abfischung ständig gegebenen Änderungen bei Fischbestandsmasse und Futtermittelverabreichung als Dauerroutine

fortgeführt werden Die Regelung und Überwachung des SID-Reaktors kann sehr einfach gestaltet werden.

4.2.6 Einfluss auf SBV und pH-Wert

Im Falle aller getesteten C-Quellen konnte während der Reaktorpassage ein erheblicher Anstieg des Salzsäurebindungsvermögens von durchschnittlich $0,7 \text{ mval} \cdot \text{l}^{-1}$ im Reaktorzulauf auf $3,3 \text{ mval} \cdot \text{l}^{-1}$ festgestellt werden (Tab. 8). Bei vergälltem Ethanol und Methanol ging der SBV-Anstieg mit einer deutlichen pH-Wert-Steigerung einher. Die Nutzung von Essigsäure führte zu einer leichten Absenkung des pH-Wertes.

Erwartungsgemäß kompensiert der Denitrifikationsprozess somit einen Teil des durch die Nitrifikation verbrauchten Salzsäurebindungsvermögens und die damit einhergehende pH-Wert-Absenkung (VAN RIJN et al. 2006). Die ohne Denitrifikationsstufe in der eingesetzten Kreislaufanlage stets notwendige Pufferung mit Natriumbicarbonat konnte durch den Betrieb des SID-Reaktors drastisch reduziert werden (siehe auch Abschnitt 4.5.3).

Tab. 8: Entwicklung von Salzsäurebindungsvermögen und pH-Wert während der Passage des SID-Reaktors bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen (Mittelwerte, Minima, Maxima, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten).

Parameter	Ethanol	Methanol	Essigsäure	Glyzerin
SBV Reaktorzulauf ($\text{mval} \cdot \text{l}^{-1}$)				
Mittelwert	0,8	0,6	0,7	0,5
Min	0,7	0,4	0,7	0,3
Max	1,3	0,9	0,8	0,7
STABW	0,2	0,2	0,1	0,1
CV	18,9	32,5	8,2	25,7
SBV Reaktorablauf ($\text{mval} \cdot \text{l}^{-1}$)				
Mittelwert	2,8	3,2	3,0	4,0
Min	1,4	1,4	2,4	3,6
Max	4,0	4,0	4,0	4,7
STABW	0,9	0,7	0,8	0,5
CV	31,2	22,8	26,2	12,8
pH-Wert Reaktorzulauf				
Mittelwert	7,1	7,1	7,1	7,0
Min	6,9	6,7	7,0	6,8
Max	7,3	7,2	7,2	7,1
STABW	0,1	0,1	0,1	0,1
CV	1,8	1,9	1,2	1,4
pH-Wert Reaktorablauf				
Mittelwert	7,7	8,5	7,0	7,2
Min	6,8	6,9	6,8	6,9
Max	8,8	8,8	7,1	7,4
STABW	0,7	0,6	0,1	0,2
CV	9,2	7,0	1,4	2,7

4.2.7 Futteraufnahmeverhalten der Zander

Die Messung des Einflusses der getesteten C-Quellen auf das Futteraufnahmeverhalten der gehaltenen Zander fand pro C-Quelle über einen Zeitraum von 14 Tagen statt. Zunächst erfolgte die Umstellung des SID-Reaktors auf die jeweilige C-Quelle ohne Rückführung des Reaktorablaufs in das Kreislaufsystem. Der SID-Reaktor wurde für alle C-Quellen mit einer Rezirkulation des Aufwuchskörperbettes für 40 Sekunden im halbstündigen Abstand betrieben. Nachdem Redoxpotenzial und Denitrifikationsleistung das vollständige Einfahren des Reaktors mit der entsprechenden C-Quelle indizierten, erfolgte die Rückleitung des Reaktorablaufes in die Kreislaufanlage. In den folgenden zwei Wochen wurde die tägliche Futteraufnahme der Fische in jeweils vier Becken im Verhältnis zur Aufnahme in den Tagen vor Einbindung des Reaktorablaufs ins System ermittelt.

Kein Einfluss auf das Futteraufnahmeverhalten der Zander war lediglich bei der Nutzung von Methanol als C-Quelle festzustellen (Tab. 9). Am letzten Beobachtungstag konnten hier aufgrund des Ausfalls der automatischen Sauerstoffzudosierung nur 89 % der ursprünglichen Futtermenge verabreicht werden. Tags darauf, nach Instandsetzung der Sauerstoffzudosierung war wiederum die Verabreichung der vollen Futtermenge möglich. Somit indiziert der 14-tägige Beobachtungszeitraum auch bei Nutzung von Methanol einen marginalen Rückgang der zu verabreichenden Futtermenge um 0,7 %, der aber nicht auf die Methanolnutzung zurückzuführen ist.

Die anderen getesteten C-Quellen führten bei den gehaltenen Zandern stets zu erheblichen Einschränkungen in der Futteraufnahme auf ein wirtschaftlich nicht zu tolerierendes Niveau. Glycerin schnitt mit einer um rund 8 % reduzierten Futteraufnahme nach Methanol noch am günstigsten ab. Ein massiver Einbruch der aufgenommenen Futtermenge wurde bei Verwendung von vergälltem Ethanol (-37 %) und Essigsäure (-33 %) gemessen.

Abb. 4 veranschaulicht exemplarisch für die eingesetzte Essigsäure den typischen Verlauf der Futteraufnahme während der zweiwöchigen Beobachtungsphase. Zeigten die Fische in den ersten Tagen nach Rückführung des Reaktorablaufs noch keine beeinträchtigte Futteraufnahme, so kam es dann zu einer zunehmenden Verweigerung der Futteraufnahme. Es mussten Tage ganz ohne Futtergaben zwischengeschaltet werden. Auch nach Tagen ohne Futtergaben, nach denen Zander üblicherweise eine kompensatorische Futteraufnahme zeigen, war der Appetit stark eingeschränkt.

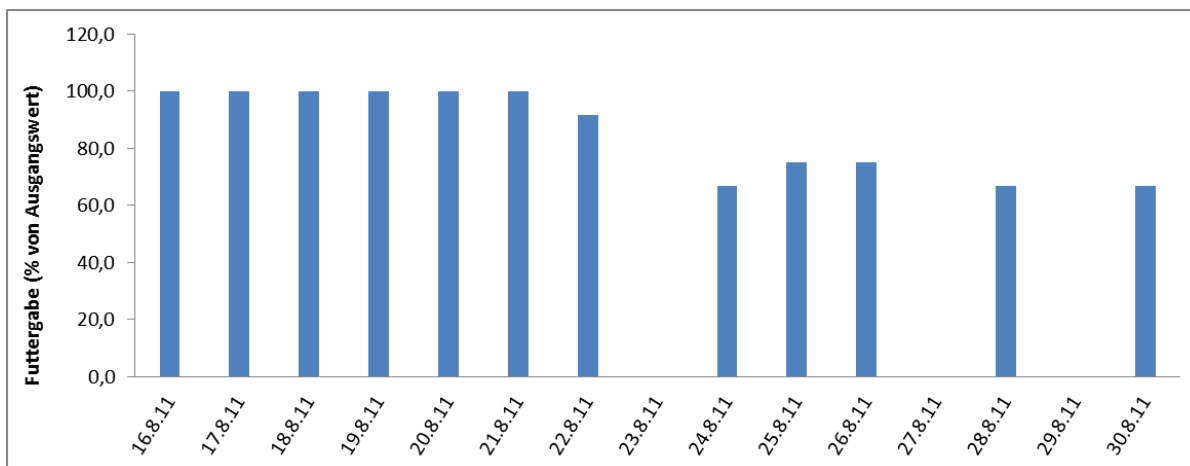


Abb. 4: Futteraufnahme der gehaltenen Zander nach Rückführung des SID-Reaktorablaufs in die Kreislaufanlage, bei Nutzung von Essigsäure.

Über mögliche Gründe für das drastisch negativ beeinflusste Futteraufnahmeverhalten der Zander bei Nutzung der C-Quellen vergälltes Ethanol und Essigsäure kann nur spekuliert werden. Möglicherweise wirkt sich das Vergällungsmittel im Ethanol auch bei Zandern sensorisch stark negativ aus. OIKE et al. (2007) wiesen nach, dass Zebrabärblinge (*Danio rerio*) Vergällungsmittel schmecken können. Die räumliche Meidung entsprechender Zusätze im Wasser konnte für den Zebrabärbling von GRELLA et al. (2010) dokumentiert werden. Die reduzierte Futteraufnahme könnte jedoch auch auf die Menge und Art der Bakterienbiomasse im Reaktorablauf bei Nutzung dieser C-Quellen bzw. auf Zwischenprodukte des bakteriellen Abbaus zurückzuführen sein. Andere Studien zur Futteraufnahme gehaltener Wirtschaftsfischarten bei Nutzung unterschiedlicher C-Quellen in Denitrifikationsreaktoren scheinen bislang nicht publiziert zu sein. Weitere Untersuchungen sollten zeigen, ob andere in geschlossenen Kreislaufanlagen gehaltene Wirtschaftsfischarten anders oder ähnlich sensibel wie die hier als Indikatoren genutzten Zander auf unterschiedliche C-Quellen reagieren.

4.3 Untersuchung der hydraulischen Belastungsfähigkeit des SID-Reaktors

4.3.1 Sauerstoffeliminationspotenzial

In einem ersten Schritt wurde das Sauerstoffeliminationspotenzial des SID-Reaktors ohne Berücksichtigung der Denitrifikationsleistung getestet. Hierzu wurde die hydraulische Beaufschlagung Q ($l \cdot \text{min}^{-1}$) in Schritten so weit erhöht, bis eine maximale Ablaufkonzentration von $0,2 \text{ mg O}_2 \cdot l^{-1}$ nicht mehr konstant gehalten werden konnte. Der Reaktor wurde während der Versuchsreihe täglich mit $0,1 \text{ l}$ Ethanol und permanenter Zirkulation des Aufwuchskörperbettes betrieben. Das Zulaufwasser erreichte den SID-Reaktor mit $8 \text{ mg O}_2 \cdot l^{-1}$. Tab. 9 stellt die bei unterschiedlichen Mengen zugeführten Stickstoffgases aus dem Wasserstrom eliminierte Sauerstofffracht dar.

Tab 9: Sauerstoffeliminationspotenzial des SID-Reaktors bei unterschiedlicher Eintragsmenge an gasförmigem Stickstoff

Eintrag N ₂ (l*min ⁻¹)	Q (l*min ⁻¹)	Reaktoraufenthaltszeit (h)	Eliminierte O ₂ -Fracht (g O ₂ *d ⁻¹)
0,10	3,5	3,1	39,3
0,25	4,3	2,5	48,3
0,60	6,7	1,6	75,3

Erwartungsgemäß gelang bei erhöhter N₂-Zufuhr eine bessere Ausgasung der Sauerstofffracht. Hinsichtlich des Ziels einer maximalen O₂-Ablaufkonzentration von 0,2 mg*l⁻¹ konnte mit noch überschaubarem Aufwand an Stickstoffgas eine Reaktoraufenthaltszeit von lediglich 1,6 Stunden erreicht werden. Allerdings stellte sich bei den Untersuchungen zum O₂-Eliminationspotenzial heraus, dass die gewählte Betriebsweise keine Absenkung des Redoxpotenzials auf Werte deutlich unter 0 mV erlaubte. Nur bei Redoxpotenzialen unterhalb von -120 mV konnte aber im SID-Reaktor eine gute Denitrifikationsleistung beobachtet werden (vergl. Abschnitt 4.2.3). Somit erwies sich die alleinige Bestimmung des O₂-Eliminationspotenzials während des Versuchsverlaufs als wenig hilfreich für die Planung und Dimensionierung dieses Reaktortyps.

4.3.2 Hydraulische Belastungsfähigkeit bei voller Denitrifikationsleistung

Für Studien zur hydraulischen Belastungsfähigkeit bei voller Denitrifikationsleistung wurde der SID-Reaktor mit Methanol betrieben. Auch hier wurde bei unterschiedlichen Betriebsweisen die hydraulische Beaufschlagung stufenweise erhöht, ohne jedoch ein Redoxpotenzial von etwa -120 mV zu überschreiten. Nach Einstellung stabiler Verhältnisse wurde die Denitrifikationsleistung analysiert. Die Betriebsweisen unterschieden sich hinsichtlich der Umwälzfrequenz des Aufwuchskörperbettes (Einschaltdauer und Intervall Gebläse), der Umwälzintensität (Gebläseleistung), der verwendeten Methanoldmenge sowie der Zudosierung von gasförmigem Stickstoff. Die Kreislaufanlage wurde über Futter- und Harnstoffgaben täglich mit einem Äquivalent von 3 kg aufgenommenem Alleinfuttermittel (120 g N) belastet. Bei der Wahl der Betriebsweisen wurden drei Varianten verfolgt:

A) Minimaler Energieverbrauch

Hier sollte eine Betriebsweise des SID-Reaktors gefunden werden, die eine gute Denitrifikationsleistung bei möglichst geringer Elektroenergieaufnahme für die Zirkulation des Aufwuchskörperbettes und moderatem Methanoleinsatz erlaubt. Das Gebläse zur Umwälzung des Aufwuchskörperbettes mit Inertgas wurde in dieser Betriebsweise halbstündlich für 40 Sekunden zugeschaltet und führte somit zu einem täglichen Elektroenergieverbrauch von lediglich 0,25 kWh. Bei dieser Betriebsweise konnten folgende Leistungskennzahlen erzielt werden:

C-Quelleneinsatz: 0,45 l Methanol*d⁻¹
 Hydraulische Beaufschlagung: 1,5 l*min⁻¹
 Reaktoraufenthaltszeit: 7,2 h

Redoxpotenzial:	-150 mV
NO ₃ -N-Zulaufkonzentration:	29,4 mg NO ₃ -N*I ⁻¹
NO ₃ -N-Ablaufkonzentration:	2,7 mg NO ₃ -N*I ⁻¹
Nitratreduktion:	91 %
Denitrifikationsrate:	163 g N pro Tag und m ³ Aufwuchskörperbett

Bei dieser Betriebsweise stellten sich erwartungsgemäß ähnliche Betriebs- und Leistungskennzahlen ein wie bereits während der Untersuchung der unterschiedlichen C-Quellen (vergl. Abschnitt 4.2.2). Bedingt durch die geringere NO₃-N-Fracht im Reaktorzulauf fiel jedoch die Denitrifikationsrate etwas geringer aus.

Diese Betriebsweise bietet sich für die Nutzung in geschlossenen Kreislaufanlagen an, in denen Wirtschaftsfischarten energieeffizient aufgezogen werden sollen und wo genug Platz und Kapital für die Ausstattung mit einem vergleichsweise großvolumigen SID-Reaktor vorhanden ist. Dimensionierung und Nutzung des Reaktors nach dieser Betriebsweise erscheint zumindest bei hoher Nutzungsdauer als die umweltverträglichste Variante.

B) Optimale Leistung

Durch die dauerhafte Umwälzung des Aufwuchskörperbettes konnte eine deutlich höhere hydraulische Beaufschlagung bei guter Denitrifikationsleistung erzielt werden. Bei einem täglichen Elektroenergieverbrauch des Gebläses von 11 kWh wurden folgende Leistungskennzahlen gemessen:

C-Quelleneinsatz:	0,45 l Methanol*d ⁻¹
Hydraulische Beaufschlagung:	3,0 l*min ⁻¹
Reaktoraufenthaltszeit:	3,6 h
Redoxpotenzial:	-120 mV
NO ₃ -N-Zulaufkonzentration:	29,6 mg NO ₃ -N*I ⁻¹
NO ₃ -N-Ablaufkonzentration:	4,1 mg NO ₃ -N*I ⁻¹
Nitratreduktion:	86 %
Denitrifikationsrate:	328 g N pro Tag und m ³ Aufwuchskörperbett

Bei Inkaufnahme eines erhöhten Elektroenergiebedarfs für das Gebläse ist somit die Verdopplung der hydraulischen Beaufschlagung und eine nahezu verdoppelte Denitrifikationsleistung zu erzielen. Bei moderatem C-Quellen-Einsatz (0,15 l Methanol pro kg Futtereintrag) ist diese Betriebsweise für Standorte geeignet, an denen eine optimale Denitrifikationsleistung bei geringem Platzbedarf notwendig ist. Aufgrund des bezogen auf die Leistung bei dieser Betriebsweise geringeren Reaktorvolumens ist mit niedrigeren Investitionen für die Reaktorbeschaffung zu rechnen. Die dauerhafte Umwälzung des Aufwuchskörperbettes führt zu einer maximalen Kontinuität und Stabilität beim Betrieb des SID-Reaktors. Durch Verwendung eines leistungsschwächeren Gebläses für die dauerhafte Umwälzung – nur etwa 15 % des maximalen Fördervolumens des im Versuchsreaktor genutzten Gebläses würden benötigt (vergl. Abschnitt 4.1) – ließe sich der Elektroenergiebedarf in einem Serienreaktor auch bei dieser Betriebsweise deutlich verringern.

C) Hochleistung

Wird eine weitere Leistungssteigerung des SID-Reaktors benötigt, kann diese durch die Erhöhung der täglich einzusetzenden C-Quellenmenge erreicht werden. Bei Verwendung von 0,9 l Methanol pro Tag ($0,3 \text{ l} \cdot \text{kg Futter}^{-1}$) konnten die nachfolgend aufgeführten Leistungskennzahlen erreicht werden:

C-Quelleneinsatz:	$0,9 \text{ l Methanol} \cdot \text{d}^{-1}$
Hydraulische Beaufschlagung:	$4,6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Reaktoraufenthaltszeit:	2,3 h
Redoxpotenzial:	-133 mV
$\text{NO}_3\text{-N}$ -Zulaufkonzentration:	$26,4 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$
$\text{NO}_3\text{-N}$ -Ablaufkonzentration:	$1,6 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$
Nitratreduktion:	94 %
Denitrifikationsrate:	451 g N pro Tag und m^3 Aufwuchskörperbett

Mit 451 g N pro Tag und m^3 Aufwuchskörperbett konnte die höchste bislang im SID-Reaktor gemessene Denitrifikationsrate ermittelt werden. Die hohe Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors während der Untersuchungen zur hydraulischen Belastungsfähigkeit führten zu einer ständig sinkenden Nitratfracht im Zulaufwasser. Eine Steigerung von Futter- und Harnstoffgaben zur Erhöhung der Nitratfracht konnte in der verwendeten Kreislaufanlage nicht realisiert werden, ohne den Nitrifikationsfilter zu überfordern. Schließlich wurde der SID-Reaktor bei für die Zander zu tolerierenden Ammonium- und Nitrit-Konzentrationen mit einer Zulaufkonzentration von lediglich $26,4 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ ($\Leftrightarrow 117 \text{ mg Nitrat pro l}$) beaufschlagt. Die maximal im SID-Reaktor erzielbare Denitrifikationsrate ist mit großer Wahrscheinlichkeit deutlich höher, wenn das Zulaufwasser eine höhere Nitratfracht aufweist. Bei der Dimensionierung der Denitrifikation in Kreislaufanlagen für die Zander- und Störhaltung können Konzentrationen im zirkulierenden Anlagenwasser von etwa $300 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$ ($\Leftrightarrow 68 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$) veranschlagt werden. Die für die Testung des SID-Reaktors eingesetzte Kreislaufanlage ist somit deutlich zu klein, um die maximale Leistungsfähigkeit des Reaktors mit einem Volumen von 650 l analysieren zu können.

Neben der Erhöhung der C-Quellenmenge zur Leistungssteigerung des SID-Reaktors wurden Untersuchungen zu einer zusätzlichen Leistungsanhebung durch die Zuführung von gasförmigem Stickstoff in die zirkulierende Inert-Gas-Phase durchgeführt. Erhofft wurde hier die Einbeziehung des Effektes der Sauerstoffeliminierung durch eingegasteten Stickstoff (vergl. Tab. 9). Eine weitere Erhöhung der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors wurde jedoch beim Eintrag von $0,25 \text{ l N}_2 \cdot \text{min}^{-1}$, $0,5 \text{ l N}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ und $1,0 \text{ l N}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ nicht erreicht. Der Effekt der Sauerstoffeliminierung durch Stickstoffeingasung scheint bei der Erreichung der für einen effizient verlaufenden Denitrifikationsprozess notwendigen reduzierenden Bedingungen (Redoxpotenzial von unter -120 mV) eine untergeordnete und zu vernachlässigende Rolle zu spielen. Auf die Vorhaltung von Einrichtungen zur N_2 -Eingasung und gasförmigen Stickstoffs kann somit bei der Verwendung des SID-Reaktors in Kreislaufsystemen für die Fischerzeugung verzichtet werden. Neben den entstandenen Kosten hätte die Stickstoffeingasung möglicherweise auch Akzeptanzprobleme bei den Kreislaufanlagenbetreibern zur Folge, die tunlichst den negativen Einfluss von durch

Stickstoffübersättigung verursachten Gasembolien bei den gehaltenen Fischen vermeiden wollen.

Eine weitere mögliche Stellschraube zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des SID-Reaktors wurde in der Menge des rezirkulierten Innertgases gesehen. Bei dauerhafter Zirkulation des Aufwuchskörperbettes ist das Gebläse während der bislang beschriebenen Versuchsdurchgänge mit Hilfe eines Kugelhahns auf einen Volumenstrom von $50 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ abgeregelt worden. Bei Verwendung von $0,9 \text{ l}$ Methanol pro Tag, dauerhafter Zirkulation mit vollem Gasdurchsatz ($340 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) kam es jedoch als erstem Indikator für sich verschlechternde Denitrifikationsbedingungen innerhalb weniger Stunden zu einer Erhöhung des Redoxpotenzials. Die hydraulische Beaufschlagung musste auf $4,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ reduziert werden. Die Denitrifikationsrate sank auf 425 g N pro Tag und m^3 Aufwuchskörperbett ab. Die Erhöhung des Gasdurchsatzes wirkte sich somit kontraproduktiv auf die Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors aus. Maximale Denitrifikationsraten werden bei kontinuierlicher aber moderater Umwälzung des Aufwuchskörperbettes erreicht. Zu starke Turbulenzen führen möglicherweise zu einer mechanischen Beeinträchtigung und Ablösung des Biofilms. Als Indiz dafür stieg die Trübung im Reaktorablauf von vorab $8,1 \text{ FNU}$ auf $15,9 \text{ FNU}$ an.

4.4 Betriebsaufwand und Systemanfälligkeit im Dauereinsatz

4.4.1 Elektroenergie

Die Einbindung des SID-Reaktors in die Kreislaufanlage des IfB führte zu einem Mehrbedarf an Elektroenergie für den Betrieb des 460 W -Ringkanalgebläses zur Umwälzung des Aufwuchskörperbettes sowie für die Pumpe (5 W) zur hydraulischen Beaufschlagung des Reaktors. Die Pumpe führte kontinuierlich zu einem Mehrbedarf an $0,12 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$. Bei diskontinuierlicher Umwälzung des Aufwuchskörperbettes für $2 \times 40 \text{ sec} \cdot \text{h}^{-1}$ (Betriebsweise für minimalen Energieverbrauch) summiert sich der zusätzliche Elektroenergiebedarf auf lediglich $0,37 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$. Eine höhere Denitrifikationsleistung kann durch die kontinuierliche Umwälzung des Aufwuchskörperbettes erreicht werden und führt somit im Versuchsreaktor aber zu einem deutlich höheren zusätzlichen Elektroenergiebedarf von $11 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$. Ein Seriengerät könnte jedoch, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, mit einem kleiner dimensionierten Gebläse mit geringerer Leistungsaufnahme konzipiert werden.

4.4.2 C-Quelle

Der untersuchte SID-Reaktor musste für die Aufrechterhaltung einer optimalen Denitrifikationsleistung, wie in Abschnitt 4.3.2 dargestellt, täglich mit $0,45 \text{ l}$ Methanol versorgt werden.

4.4.3 Arbeitsaufwand

Im SID-Reaktor ermöglicht die dauerhafte oder regelmäßige Umwälzung des Aufwuchskörperbettes einen kontinuierlich ablaufenden Denitrifikationsprozess. Auf zeitaufwendige und prozessunterbrechende Rückspülvorgänge kann komplett verzichtet werden. Damit beschränkt sich der Arbeitsaufwand auf tägliche Sichtkontrollen, die Dokumentation zentraler Betriebsparameter und das Auffüllen des Vorlagebehälters mit Methanol. Zudem muss die Methanolversorgung abgesichert werden.

Der Wartungsaufwand für den Routinebetrieb des SID-Reaktors beläuft sich somit auf wenige Minuten pro Tag. Etwa 3 Minuten werden für die Befüllung des Vorlagebehälters mit Methanol, die Dokumentation des Redoxpotenzials sowie die Kontrolle und ggf. Einstellung der hydraulischen Beaufschlagung benötigt. Im Falle des eingesetzten Versuchsreaktors war wöchentlich die Reinigung der zulaufseitigen Schläuche sowie der Pumpe nötig. Der wöchentliche Zeitaufwand hierfür betrug etwa 10 min. Für das Ordern und Bereitstellen des benötigten Methanols muss mit einem monatlichen Zeitaufwand von etwa 15 Minuten kalkuliert werden. Der zusätzliche Zeitaufwand für den Reaktorbetrieb beläuft sich somit auf rund 153 Minuten pro Monat, bzw. 5 Minuten pro Tag.

In einem SID-Reaktor im Praxismaßstab ist die hydraulische Beaufschlagung erheblich größer. Die Querschnitte der Pump- und Zulaufleitungen sind hier entsprechend höher. Auf eine wöchentliche Reinigung kann hier mit großer Wahrscheinlichkeit verzichtet werden. Hingegen ist die Menge täglich in den Vorlagebehälter zuzuführenden Methanols größer. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch der Betrieb eines SID-Reaktors im Praxismaßstab einen Zeitaufwand in ähnlicher Größenordnung verursacht.

4.4.4 Systemanfälligkeit

Die zunächst als banal erachtete Einstellung einer gleichmäßigen hydraulischen Beaufschlagung des SID-Reaktors im halbtechnischen Maßstab stellte sich zu Beginn der Untersuchungen als ein klar unterschätztes Problem heraus. Die eher geringe hydraulische Beaufschlagung im Bereich von einigen Litern pro Minute setzt dünne Schlauchleitungen und Querschnittsverjüngungen voraus, die sich bei Beaufschlagung mit dem Zirkulationswasser der Kreislaufanlage schnell zusetzen. Zunächst war täglich mehrfach die Nachregulierung und Reinigung der Zulaufeinrichtung notwendig. Über Nacht kam es häufig zur starken Reduzierung der Zulaufmenge. Erst die Vermeidung von Regeleinrichtungen (Hähne, Düsen) in der Zulaufleitung schaffte hier Abhilfe. Schließlich reduzierte sich der Wartungsaufwand für den Zulauf auf eine wöchentliche ca. zehnmündige Reinigung. Wie bereits beschrieben wird dieses Problem bei SID-Reaktoren im Praxismaßstab aller Voraussicht nach nicht auftreten.

Die absolute Dichtigkeit des Reaktorsystems ist eine Grundvoraussetzung für den sicheren Denitrifikationsbetrieb. Durch einen nach erfolgreicher Diagnose einfach zu behebbenden konstruktiven Mangel saugte das Gebläse zur Umwälzung des Aufwuchskörperbettes zunächst marginale Mengen an Außenluft in das Reaktorsystem. Die Denitrifikationsleistung

wurde stark negativ beeinträchtigt. Auch dieses Problem ist nun bekannt und kann bei der Konstruktion von SID-Reaktoren für den Praxiseinsatz eliminiert werden.

Während der Versuchsdurchführung musste der SID-Reaktor zur Beseitigung einer Störung der Reaktoreinbauten sowie zur Optimierung der Ablaufabgitterung einmalig außer Betrieb gesetzt und geöffnet werden. Das Aufwuchskörperbett wurde entfernt. Nach fünf Tagen konnte der Reaktor wieder in Betrieb genommen werden. Auch dieser Zwischenfall verhalf zu interessanten Erkenntnissen für die Konstruktion von SID-Reaktoren im Praxismaßstab. Sechs Tage nach Wiederinbetriebnahme hatte der Reaktor seine Ausgangsleistung wieder erreicht. Auch bei einer in diesem Zeitraum vorherrschenden Haltungswassertemperatur von lediglich 17°C erreichte der SID-Reaktor eine Nitrateliminierung von 87% und eine Denitrifikationsrate von 141 g N pro Tag und m³ Aufwuchskörperbett.

Schließlich wurde während der Zirkulation des Aufwuchskörperbettes in Intervallen eine leichte Beeinträchtigung der Gebläseleistung durch sich in den Anschlussleitungen bildendes Kondenswasser festgestellt. Bei dauerhafter Gebläsenutzung wurde keine Kondenswasserbildung beobachtet. Als Maßnahme gegen Kondenswasserbildung sollten die Gebläseanschlussleitungen zukünftig mit Gefälle hin zum SID-Reaktor verlegt werden.

Die vier aufgetretenen Beeinträchtigungen während der Entwicklung und Leistungsprüfung des SID-Reaktors können für den Praxiseinsatz ohne Schwierigkeiten ausgeräumt werden. Für die Nachfolger des getesteten Pilotsystems kann durch Vermeidung der erkannten Konstruktionsfehler von einem unkomplizierten Routinebetrieb und hoher Betriebssicherheit ausgegangen werden.

4.5 Einsparpotenzial von Betriebsmedien

4.5.1 Frischwasserbedarf / Ablaufwasseranfall

Die in geschlossenen Kreislaufanlagen benötigte Frischwassermenge und die damit verbundene Entsorgung von Ablaufwasser können einen maßgeblichen Kostenfaktor darstellen. Insbesondere in Systemen für die Erzeugung von gegenüber hohen Nitratkonzentrationen sensiblen Fischarten wie Störe und Zander sind ohne funktionierende Denitrifikationsfilter etwa 600 l Frischwasser (und Ablaufwasser) pro kg eingesetzten Alleinfuttermittels zu kalkulieren. Für eine Jahreserzeugung von 100 t summieren sich hier etwa 60.000 m³ Frisch- / Ablaufwasser auf. Durch den Einsatz des SID-Reaktors konnte die benötigte Frischwassermenge in der KLA zur Zandererzeugung am IfB (3 kg Futter pro Tag) auf durchschnittlich 70 l pro kg verabreichten Futtermittels reduziert werden. Eine Limitierung der benötigten Frischwassermenge war nun nicht mehr durch den Nitratgehalt des Haltungswassers sondern durch den technologisch bedingten Mindestfrischwasserbedarf des Systems gegeben. So kommt es täglich zu durchschnittlich etwa 150 l Wasserverlust für den Austrag sedimentierter Feststoffe aus Ablaufrinnen und wöchentlich zu rund 400 l Schlammwasserverlust durch die Entsorgung des Schlammauffangbehälters der mechanischen Wasseraufbereitung.

Abb. 5 veranschaulicht für einen Zeitraum von einem Monat $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Haltungswasser der Kreislaufanlage sowie die täglich zugeführte Frischwassermenge. In den ersten 15 Tagen wurde die Nitratkonzentration über die Zuleitung hoher Frischwassermengen eingestellt, in den folgenden 15 Tagen über die Einbeziehung der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors.

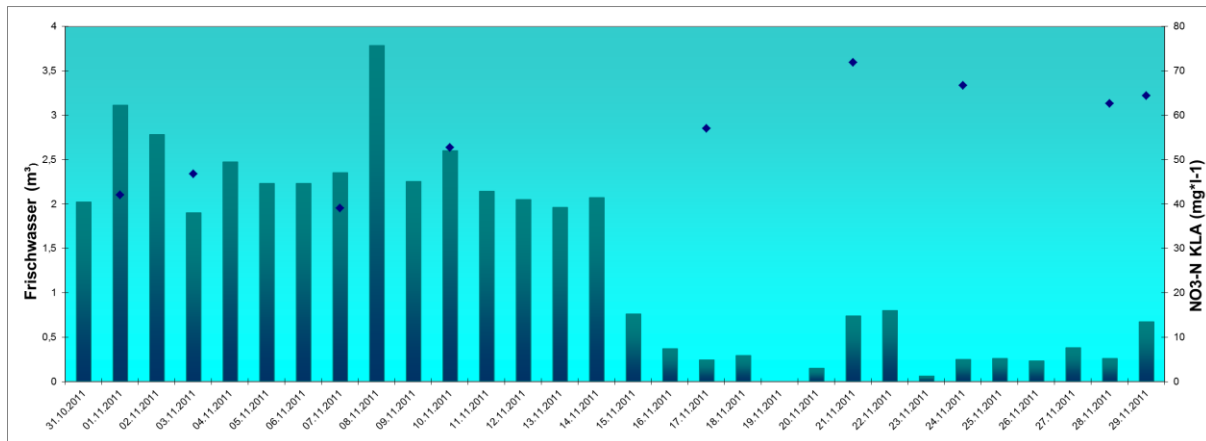


Abb. 5: Täglicher Frischwassereinsatz (Säulen) und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Haltungswasser der KLA (Punkte) ohne und mit Nutzung des SID-Reaktors. 31.11. bis 14.11.2011: Nitratverdünnung durch hohen Frischwassereintrag; 15.11. – 29.11.2011: Nitrateliminierung durch Nutzung des SID-Reaktors.

Trotz massiver Verringerung des Frischwassereinsatzes können die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen durch die Einbeziehung des SID-Reaktors in der für Zander akzeptablen Bandbreite gehalten werden.

4.5.2 Energie für Temperierung

Die Zuführung hoher Frischwassermengen führt zu einem vergleichsweise hohen Energieeinsatz für dessen Temperierung auf die Zieltemperatur. Für die Erwärmung eines Kubikmeters Wasser um ein Kelvin muss bei Annahme eines Wirkungsgrades der Heizeinrichtung von 100 % 1,16 kWh Energie eingesetzt werden. Häufig wird in geschlossenen Kreislaufanlagen in Deutschland Grundwasser in einem Temperaturbereich von rund 10°C als Frischwasserquelle genutzt. Zander weisen bei einer Haltungswassertemperatur um 24°C eine optimale Wachstumsleistung und Futterausnutzung auf (ZIENERT & HEIDRICH 2005). Eine Jahresproduktion von 100 t Zandern bedarf für die Frischwassertemperierung von 10°C auf 24°C ohne Nutzung von Denitrifikationsreaktoren (600 l Frischwasser pro kg Futter) und Wärmerückgewinnung aus dem Ablaufwasser rund 970.000 kWh. Bei Einsatz einer funktionsfähigen Denitrifikation (70 l Frischwasser pro kg Futter) wird mit rund 110.000 kWh knapp 90 % weniger Energie für die Temperierung des Frischwassers benötigt. In neueren KLA kommen Kreuzwärmetauscher und Wärmepumpen zum Einsatz, die zu einer Rückgewinnung von etwa 50 % der Wärme

aus dem Ablaufwasser beitragen. Die Verhältnisse beim Vergleich des Energiebedarfes für die Frischwassererwärmung mit / ohne Denitrifikationsstufe ändern sich jedoch dadurch nicht.

Zur Veranschaulichung der Wirkung des eingesetzten SID-Reaktors auf den Wärmeenergiebedarf der Versuchskreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab am IfB zeigt Abb. 6 den Gang der Wassertemperatur und die zu deren Aufrechterhaltung notwendigen Schaltzeiten der Wasserheizung (Screenshots aus der Siematic WinCC Datenvisualisierung des verwendeten Kontroll- und Steuerungssystems).

Für die Darstellung wurden beispielhaft die Wassertemperatur- und Heizverläufe aus zwei dreitägigen Untersuchungszeiträumen (14.-16.12.2011, oben im Bild; 29.-31.12.2011, unten im Bild) ausgewählt. In beiden Untersuchungszeiträumen wurden während einer ruhigen, bedeckten, südlichen Großwetterlage von einer Wetterstation 22 km nordöstlich des IfB (www.wetter-berlin-online.de) mit durchschnittlich 4,2°C bzw. 4,1°C nahezu identische mittlere Außentemperaturen, ähnliche durchschnittliche Windgeschwindigkeiten (19 km*h⁻¹; 13 km*h⁻¹) und Sonneneinstrahlungen (37 W*m⁻²; 57 W*m⁻² gemessen. Vom 14.-16.12.2011 erfolgte in der KLA ein täglicher Frischwasserwechsel von durchschnittlich 2,7 m³ zur Nitratausverdünnung, vom 29.-31.12.2011 wurde der SID-Reaktor zur Nitrateliminierung eingesetzt. Während dieses Zeitraumes mussten täglich durchschnittlich 0,2 m³ Frischwasser in die KLA eingespeist werden. Dargestellt durch die Häufigkeit und Breite der Heizzeitsäulen arbeitete die Wasserheizung der KLA bei Nutzung des SID-Reaktors (Zeitraum 29.-31.12.2011) sichtbar seltener um die Zieltemperatur von 21°C einzustellen.

Bei Modellierung des gesamten Wärmeenergiebedarfes einer modernen Kreislaufanlage zur Erzeugung von 100 t Zandern pro Jahr (Standort Norddeutschland) unter Einbeziehung von Wärmezugewinnen durch Elektroenergieverluste und Futterenergie und Berücksichtigung von Wärmeverlusten über Verdunstung, Gebäudehülle und Raumluftwechsel erlaubt die Einbindung einer funktionsfähigen Denitrifikationsstufe die Reduzierung des Wärmebedarfs von 10,3 kWh auf 5,6 kWh pro kg produziertem Fisch (MÜLLER-BELECKE, unveröffentlicht).

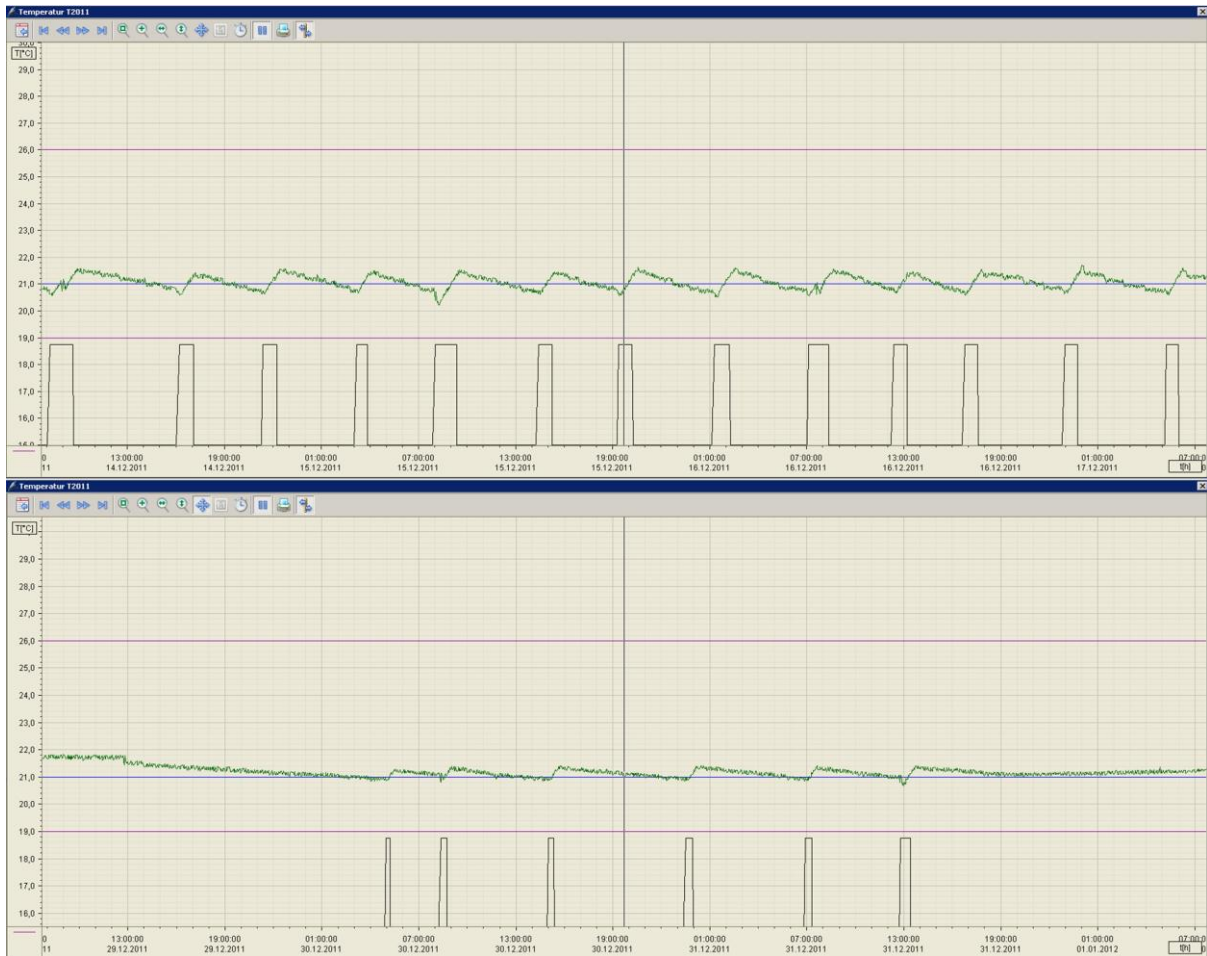


Abb. 6: Temperaturverläufe (Linien) und Heizzeiten (Säulen) in der Kreislaufanlage (Screenshots aus Siematic WinCC Datenvisualisierung) bei vergleichbarer Wettersituation. Oben (14.12. – 16.12.11): Nitratausverdünnung über Frischwassereinspeisung; unten (29.12. – 31.12.11): Nitrateliminierung durch Nutzung des SID-Reaktors.

4.5.3 Puffersubstanzen

Die Rückgewinnung von Härte-Äquivalenten im Zuge des Denitrifikationsprozesses erlaubt bei der Einbindung des SID-Reaktors die Einsparung von Puffersubstanzen wie Natriumbicarbonat. Bei einer regelmäßigen täglichen Zufuhr von 120 g $\text{NH}_4\text{-N}$ (\Leftrightarrow 3 kg verfüttertem Alleinfuttermittel, 45% RP) wurde über einen Zeitraum von 38 Tagen ohne Integration des SID-Reaktors sowie über 30 Tage mit Integration des SID-Reaktors die grammgenau zur Pufferung auf einen pH-Wert um 7,0 benötigte Natriumbicarbonat-Menge abgewogen.

Ohne Denitrifikationsstufe mussten über den Untersuchungszeitraum pro kg Futter 182 g Natriumbicarbonat zugeführt werden. Bei Integration des Denitrifikationsreaktors ging die benötigte Natriumbicarbonat-Menge um 83 % auf 31 g pro kg verabreichten Futters zurück.

Stöchiometrisch ist durch den Denitrifikationsprozess nach VAN RIJN et al. (2006) mit der Rückführung von 50 % des durch Nitrifikation verlorengegangenen Härtebildner-Äquivalentes zu rechnen. Offenbar führen unter den reduzierenden Bedingungen im SID-Reaktor biochemische Prozesse neben der Denitrifikation zu einer zusätzlichen Härterückgewinnung.

4.6 Ökonomische Betrachtungen

4.6.1 Versuchskreislaufanlage im halbtechnischen Maßstab, IfB

Jährlicher Betriebsaufwand:

Jährlich ist nach Abschnitt 4.4.3 mit einem zusätzlichen Arbeitszeitaufwand von etwa 31 h für den Betrieb des SID-Reaktors zu kalkulieren. Bei einem Stundenlohn von 30 € für den betreuenden Fischwirt resultieren daraus Arbeitskosten in Höhe von 930 €.

Der jährliche Methanolverbrauch beläuft sich auf 165 l, die in diesen Kleinmengen für 1,80 € pro l für 297 € bezogen werden können.

Der SID-Reaktor verursacht bei energiesparender Betriebsweise jährlich einen zusätzlichen Stromverbrauch von 135 kWh für einen Preis von 27 €

Bei einem angenommenen Preis von 10.000 € für einen SID-Reaktor in der verwendeten Größenordnung belaufen sich die jährlichen Abschreibungen auf etwa 1.500 € (Abschreibung über 7 Jahre).

Der Betriebsaufwand des SID-Reaktors am IfB summiert sich damit auf jährlich etwa 2.800 €.

Jährliche Einsparung Betriebsmedien:

Die Nutzung des SID-Reaktors erlaubt am IfB die Einsparung von jährlich rund 580 m³ Frischwasser / Ablaufwasser und spart damit Kosten im Rahmen von 2.600 € (4,50 € pro m³ für Frischwasserversorgung und Ablaufwasserentsorgung).

Jährlich werden ca. 9.400 kWh Energie für Frischwassererwärmung (580 m³ x 14 K x 1,16 kWh) eingespart. Frischwasser muss in der KLA des IfB elektrisch geheizt werden. Es kommt zu Einsparungen von jährlich rund 1.900 €.

Der Verbrauch an Natriumbicarbonat zur Pufferung reduziert sich pro kg verabreichtem Futtermittel um 150 g. Jährlich können 160 kg eingespart werden. Als Kleinmengenbezieher zahlt das IfB 1,80 € pro kg und somit jährlich rund 290 € weniger für Natriumbicarbonat.

Die Einsparungen durch den Einsatz des SID-Reaktors belaufen sich auf jährlich knapp 4.800 €.

Gesamtökonomie:

Bereits beim Einsatz im halbtechnischen Maßstab führt der SID-Reaktor am IfB zu einer Kostenreduzierung von jährlich etwa 2.000 €. Ein System dieser Größenordnung hätte sich nach rund fünf Jahren amortisiert.

4.6.2 Kreislaufanlage im Praxismaßstab, Jahreserzeugung von 100 t Zander

Beim Upscaling des SID-Reaktors in den Praxismaßstab wird in Bezug auf den täglichen Futtermiteinsatz von einem proportional steigendem Bedarf an aufzuwendender Elektroenergie und Methanoleinsatz ausgegangen. Es wird ein Futterquotient von 1,0 und die Realisierung von 330 Fütterungstagen pro Jahr (=> 300 kg Futtermittel pro Tag) angenommen.

Der Zeitaufwand für die tägliche Betreuung eines SID-Reaktors ist kaum größenabhängig. Kreislaufanlagen im Praxismaßstab werden jedoch in aller Regel in Form mehrerer, voneinander unabhängiger Module betrieben. Hierdurch bleibt die jeweils in einem Kreislaufsystem zu betreuende Bestandsmasse überschaubar, das seuchenhygienische Risiko wird aufgeteilt. In dieser Modellierung wird von einem Kreislaufsystem aus vier Einzelmodulen für eine tägliche Beaufschlagung von je 75 kg Futtermittel ausgegangen. Es müssen demnach vier SID-Reaktoren betrieben werden.

Aussagen zu den für SID-Reaktoren im Praxismaßstab notwendigen Investitionen können zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden. Es wird von Skalierungseffekten ausgegangen. Auf verschiedene Ausstattungsmerkmale, die am Forschungsreaktor vorgesehen waren, wie eine in ihrer Gesamtheit transparente Bauhülle oder ein Versorgungssystem für gasförmigen Stickstoff, kann für den Praxiseinsatz verzichtet werden. Für das folgende Berechnungsbeispiel eines 100 t Kreislaufsystems wird bezogen auf den Forschungsreaktor von einer Kapazitätssteigerung um den Faktor 100 und einer Preiserhöhung um den Faktor 25 (250.000 € für 4 SID-Reaktoren) ausgegangen.

Jährlicher Betriebsaufwand:

Der jährliche Arbeitszeitaufwand für den Betrieb der vier notwendigen SID-Reaktoren beläuft sich unter den getroffenen Annahmen auf rund 124 h. Bei einem Stundenlohn von 30 € für den betreuenden Fischwirt resultieren daraus Arbeitskosten in Bereich von 3.700 €.

Der jährliche Methanolverbrauch beträgt etwa 15.000 l. Für entsprechende Großmengen wird mit einem Literpreis von 0,51 € (vergl. Abschnitt 3.4) zzgl. MwSt. und Transportkosten von rund 12.000 € ausgegangen.

Die SID-Reaktoren verursachen bei energiesparender Betriebsweise jährlich einen zusätzlichen Stromverbrauch von 13.500 kWh für einen Preis von 2.700 €

Die jährlichen Abschreibungen belaufen sich in diesem Berechnungsbeispiel bei siebenjähriger Abschreibung des Neupreises für die vier einzusetzenden SID-Reaktoren auf 36.000 €.

Der Betriebsaufwand von SID-Reaktoren für ein 100 t-Kreislaufsystem summiert sich damit in dieser Modellierung auf jährlich rund 54.000 €.

Jährliche Einsparung Betriebsmedien:

Jährlich können rund 58.000 m³ Frischwasser / Ablaufwasser eingespart werden. Die Kosten für Frischwasser und Ablaufwasserentsorgung sind stark standortabhängig. An landwirtschaftlichen Standorten mit Möglichkeit der Verwertung des Ablaufwassers, welches schadstofffrei aber reich an Pflanzennährstoffen ist, können die Kosten für die Ablaufwasserentsorgung sehr gering ausfallen. Steht dort zusätzlich qualitativ geeignetes Brunnenwasser als Frischwasserquelle zur Verfügung, liegen die Wasserkosten ggf. in einer Bandbreite um 1 € pro m³. Als anderes Extrem können Standorte für Kreislaufsysteme angesehen werden, an denen besonderer Wert auf Marktnähe gelegt wird. Eine Lage in Ballungsgebieten impliziert in der Regel für die kommunale Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung übliche Wasserkosten für Kreislaufanlagen im Bereich von 4 € pro m³. Im hier dargestellten Berechnungsbeispiel wird von Wasserkosten von 2,50 € pro m³ ausgegangen. Jährlich belaufen sich die Einsparungen somit auf 145.000 €.

Für die Erwärmung von 58.000 m³ um 14 Kelvin wären rund 942.000 kWh notwendig. Bei Unterstellung eines Gaspreises von 0,05 € pro kWh belaufen sich die Einsparungen für Heizenergie für die Frischwassererwärmung auf etwa 47.000 €.

Der Verbrauch an Natriumbicarbonat zur Pufferung reduziert sich pro kg verabreichtem Futtermittel um 150 g. Mit SID-Reaktoren können jährlich 15.000 kg Natriumbicarbonat eingespart werden. Natriumbicarbonat kostet bei Großmengenabnahme rund 0,55 EUR pro kg zzgl. MwSt. und Transport. Die Einsparungen für Natriumcarbonat betragen somit etwa 12.000 €

Durch die Nutzung von SID-Reaktoren in einer KLA zur Erzeugung von jährlich 100 t Zandern können aufsummiert pro Jahr Einsparungen im Bereich von 200.000 € erzielt werden.

Gesamtökonomie:

Im Praxismaßstab kann sich der Einsatz von SID-Reaktoren in Abhängigkeit der gegebenen Standortvoraussetzungen als noch vorteilhafter erweisen als im halbertechnischen Maßstab. Trotz zumeist günstigerer Preise für die einzusetzenden Medien wirkt sich hier auch der im Vergleich zur Reaktordimension geringere Arbeitszeitbedarf für den Betrieb aus. Insgesamt weist dieses Berechnungsbeispiel das Potenzial einer jährlichen Kostenreduzierung für eine 100 t-Zander-KLA in der Größenordnung von 150.000 € auf. Eine Amortisation der Investitionen für SID-Reaktoren wäre nach diesem Beispiel innerhalb von knapp zwei Betriebsjahren gegeben.

Bedingt durch hohe Setzlingspreise, ein nur moderates Wachstumspotenzial, niedrigere Besatzdichten und schlechte Nitratoleranz sind die Gesteungskosten für die Erzeugung von Speisezandern in geschlossenen Kreislaufanlagen vergleichsweise hoch. In der noch jungen Branche kursieren derzeit in Abhängigkeit von propagiertem Kreislaufanlagentyp und Standortvoraussetzungen Gesteungskosten in der Bandbreite von 7 bis 10 € pro kg

Speisefisch (lebend ab Farm). Belegbare Kalkulationen für unter Praxisbedingungen realisierte Gestehungskosten wurden bislang nicht veröffentlicht. Die Implementierung effizienter Denitrifikationsreaktoren könnte die Reduzierung der Gestehungskosten für Speisezander in geschlossenen Kreislaufanlagen in einer Größenordnung von oberhalb 10 % bedeuten.

4.7 Ökologische Betrachtungen

Nach ökologischen Gesichtspunkten stellt die Einsparung der Betriebsmedien Frischwasser, Wärmeenergie und Puffersubstanzeinsatz einen Beitrag zur Ressourcenschonung dar. Die Implementierung funktionstüchtiger Denitrifikationsstufen in geschlossene Kreislaufanlagen zur Erzeugung aquatischer Organismen ermöglichen genau das. Die zukünftige Nutzung von SID-Reaktoren erlaubt die Steigerung der Nachhaltigkeit entsprechender Haltungsverfahren.

Die N_{ges} -Fracht im zirkulierenden Haltungswasser und damit verbunden im Ablaufwasser geschlossener Kreislaufanlagen wird vornehmlich durch die NO_3 -N-Konzentration und die anfallende Ablaufwassermenge bestimmt. NH_4 -N- und NO_2 -N-Konzentrationen sind für das Wohlergehen der gehaltenen Fische sehr gering zu halten. Ihr Anteil an der N_{ges} -Fracht kann vernachlässigt werden (vergl. Tab. 3 und Tab. 5). Mithilfe von SID-Reaktoren gelingt es, die NO_3 -N-Konzentration im rezirkulierenden Haltungswasser auf einem geringen Niveau zu halten und die anfallende Ablaufwassermenge zu minimieren. Der von der LAWA für das Ablaufwasser in Kreislaufanlagen vorgegebene Belastungshöchstwert von 40 g Gesamtstickstoff pro kg eingesetztem Futtermittel (LAWA 2003) kann durch die Nutzung von SID-Reaktoren in einer Größenordnung von etwa 80 % unterschritten werden.

Es ist davon auszugehen, dass für die Erteilung von Genehmigungen zur Einleitung von Ablaufwasser aus Kreislaufanlagen zukünftig vermehrt Auflagen hinsichtlich der maximal tolerierbaren N_{ges} -Konzentrationen gestellt werden. Zur Diskussion stehende Ablaufwasserkonzentrationen im Bereich von $50 \text{ mg } N_{\text{ges}} \cdot \text{l}^{-1}$ können durch die Einbindung von SID-Reaktoren realisiert werden. Trotz verschärfter Umweltauflagen ließe die Verwendung effektiver Denitrifikationsstufen eine Option zur Steigerung des in Deutschland derzeit mit unter 15 % sehr geringen Selbstversorgungsgrades mit aquatischen Organismen durch den Einsatz geschlossener Kreislaufanlagen. Die in vielen Exportländern durch deutlich geringere Auflagen häufig weniger umweltschonende Aquakulturerzeugung könnte so ggf. eingeschränkt werden. Die gesamtökologische Bilanz würde hierdurch günstiger ausfallen.

Die mit der Nutzung von SID-Reaktoren einhergehende deutliche Reduzierung der Ablaufwassermenge von geschlossenen Kreislaufanlagen, insbesondere für die Erzeugung hinsichtlich der Nitratkonzentration sensibler aquatischer Organismen, ermöglicht eine Effizienzsteigerung der weitergehenden Ablaufwasseraufbereitung. So könnte bei Nutzung von SID-Reaktoren eine Phosphorfällanlage für eine um knapp 90 % geringere hydraulische Beaufschlagung ausgelegt werden. Die P-Eliminierung im Ablaufwasser von KLA wäre somit technologisch und ökonomisch einfacher umsetzbar.

Negativ in der Umweltbilanz wirkt sich bei Nutzung von SID-Reaktoren zur Nitrateliminierung der Bedarf einer externen C-Quelle aus. Der Einfluss auf die organische Fracht des Ablaufwassers sowie das Schlammaufkommen aus der mechanischen Filterung wird zwar insbesondere bei Verwendung von Methanol als eher gering eingeschätzt, sollte jedoch in zukünftigen Untersuchungen genauer quantifiziert werden. Eine Einsparung der notwendigen C-Quellen-Menge kann ggf. durch die Zuführung von Schlamm aus der mechanischen Filterung in den SID-Reaktor erreicht werden. Zukünftige Tests sollten zeigen, ob im SID-Reaktor, ähnlich wie im UASB-Reaktor (vergl. Abschnitt 1) die Mitverwertung leicht abbaubaren Kohlenstoffs aus dem Schlamm ohne Inkaufnahme der komplexen hydraulischen Ansteuerung eines UASB-Reaktors möglich ist.

4.8 Weitere Beobachtungen während des Betriebs des SID-Reaktors

Während der dargestellten Untersuchungen am SID-Reaktor konnten einige bis zu dieser Stelle nicht dokumentierte Beobachtungen gemacht werden, die jedoch bei seinem zukünftigen Einsatz hilfreich sein können. Die entsprechenden Erfahrungen werden nachfolgend kurz aufgeführt:

Zum Einfahren des SID-Reaktors sind für etwa vier Wochen erhöhte C-Quellen-Mengen einzubringen. Es sollte dadurch zunächst ein Redoxpotenzial von etwa -200 mV eingestellt werden. Stellt sich nach diesem Einfahrzeitraum eine stabil hohe Denitrifikationsleistung ein, kann die C-Quellenmenge so weit verringert werden, bis das Redoxpotenzial in einer Bandbreite von -120 mV bis -150 mV liegt. Die Einsparung an C-Quellenmenge erreicht so ohne nennenswerte Einbußen an der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors je nach Betriebsweise eine Größenordnung um 30 %.

Die Umstellung von einer auf eine andere C-Quelle konnte ohne einen größeren Rückgang der Denitrifikationsleistung innerhalb von vier Tagen vorgenommen werden. Über einen Zeitraum von drei Tagen wurden dabei beide C-Quellen im Verhältnis 1:1 zugeführt, am vierten Tag folgte die komplette Umstellung auf die neue C-Quelle.

Bei einer gewählten Betriebsweise ist die Einhaltung der entsprechenden hydraulischen Beaufschlagung von hoher Bedeutung. Eine deutliche Erhöhung der hydraulischen Beaufschlagung von etwa 50 % kann zu einem schnellen Anstieg des Redoxpotenzials im Reaktor in Verbindung mit dem Einbruch der Denitrifikationsleistung führen. Nach Wiederherstellung der gewünschten hydraulischen Beaufschlagung kann die ursprüngliche Denitrifikationsleistung nach ein bis zwei Tagen wieder erreicht sein.

Bei Nutzung von Essigsäure als C-Quelle ist ein Einbruch der hydraulischen Beaufschlagung zu vermeiden. Bei geringer Wasserzufuhr kann es durch die zudosierte Essigsäure zu einer massiven Absenkung des pH-Wertes im Reaktor kommen. Bei einem pH-Wert von 3,7 wurde während eines entsprechenden Havariefalls der komplette Zusammenbruch des Denitrifikationsprozesses beobachtet. Vier Tage nach der Havarie hatte sich die Denitrifikationsleistung wieder stabilisiert.

Sollen SID-Reaktoren in Kreislaufanlagen eingebunden werden, sollten Nitrifikationsfilter und mechanische Wasseraufbereitung gewisse Leistungsreserven aufweisen. Der SID-Reaktor-Auslauf führt zu einer leichten Erhöhung der Nitritfracht (vergl. Tab. 5) und der die Schwebstofffracht charakterisierenden Trübung (vergl. Abschnitt 4.1, Tab. 5, Tab. 7).

5 Fazit

Die Umrüstung des für die Nitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen bewährten Moving bed –Filters zu einem unter anoxischen Bedingungen arbeitenden Denitrifikationsreaktor ist möglich und zielführend.

Der **Selbstreinigende Inertgas-Denitrifikations-Reaktor** erlaubt durch seine kontinuierliche Betriebsweise eine stets stabile Denitrifikation ohne Notwendigkeit zeitaufwendiger, den Prozess unterbrechender Rückspülvorgänge. Der SID-Reaktor zeichnet sich deshalb durch einen geringen Arbeitszeitaufwand für die Betreuung und Wartung sowie einfache Bedienbarkeit aus.

Alle getesteten C-Quellen erlaubten einen problemlosen Betrieb des SID-Reaktors und verhalten bei energiesparender Betriebsweise zu guten Denitrifikationsleistungen im Bereich von 200 g NO₃-N pro m³ Füllkörperbettvolumen und Tag.

In Kreislaufanlagen zur Zanderanzucht bietet sich lediglich die Nutzung von Methanol an. Die verbleibenden C-Quellen üben einen z.T. stark negativen Einfluss auf das Futteraufnahmeverhalten der Tiere aus. Die optimale Ausnutzung von Futter und Wachstumspotenzial der gehaltenen Spezies sind jedoch von maßgeblicher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Fischerzeugung in intensiven Haltungssystemen.

Der Einfluss der verschiedenen C-Quellen im SID-Reaktor bei anderen, ggf. weniger sensiblen Wirtschaftsfischarten sollte zukünftig getestet werden. Die Eliminierung negativer Einflüsse durch Feinfiltration und / oder Desinfektion des Reaktorablaufes vor Rückleitung in das Kreislaufsystem sollte geprüft werden.

Durch permanente Zirkulation des Aufwuchskörperbettes und die Steigerung der zugeführten C-Quellen-Menge ist eine gegenüber der energiesparenden Betriebsweise deutliche Steigerung der Denitrifikationsleistung auf mindestens 450 g NO₃-N pro m³ Aufwuchskörperbettvolumen und Tag möglich. Die maximal im SID-Reaktor erzielbare Denitrifikationsleistung konnte bislang nicht ermittelt werden. Die über die angeschlossene Kreislaufanlage zu generierende Nitratfracht reichte für die komplette Auslastung des SID-Reaktors in der getesteten Größenordnung nicht aus.

Durch den Einsatz des SID-Reaktors gelang die Reduzierung der benötigten Frischwassermenge für den Betrieb der Kreislaufanlage zur Zandererzeugung um knapp 90 %. In entsprechender Größenordnung verringert sich der Energiebedarf zur Frischwassertemperierung. Weiterhin ging die benötigte Natriumbicarbonat-Menge zur Pufferung des zirkulierenden Haltungswassers um 83 % zurück. Die Nutzung von SID-Reaktoren könnte die Gestehungskosten für Speisezander in geschlossenen Kreislaufanlagen um mehr als 10 % reduzieren.

Die Einsparung an Betriebsmedien stellt einen Beitrag zur Ressourcenschonung dar. Aus ökologischer Sichtweise positiv wirkt sich auch eine deutliche Verringerung der Stickstofffracht über das Ablaufwasser von Kreislaufanlagen aus. Die Verringerung der resultierenden Ablaufwassermenge erlaubt bei Nutzung von SID-Reaktoren eine

Effizienzsteigerung bei der weitergehenden Ablaufwasseraufbereitung von Kreislaufanlagen. So ließe sich eine Phosphoreliminierung im Ablaufwasser von KLA technisch und ökonomisch einfacher umsetzen.

Zukünftig sollte die Mitverwertung leicht abbaubaren Kohlenstoffs aus dem Schlamm der mechanischen Wasseraufbereitung von Kreislaufanlagen zur Reduzierung des externen C-Quellen-Bedarfs im SID-Reaktor getestet werden.

Der neu entwickelte SID-Reaktor bietet ein großes Potenzial zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit geschlossener Kreislaufanlagen, insbesondere für die Erzeugung von Fischarten mit geringer Nitrattoleranz wie Zander, Stör und Steinbutt. Der SID-Reaktor repräsentiert ein Werkzeug zur weiteren Verbesserung der Nachhaltigkeit geschlossener Kreislaufanlagen.

6 Literatur

- BALDERSTON, W., SIEBURTH, J.M. (1976): Nitrate removal in closed-system aquaculture by columnar denitrification. *Appl. Environ. Microbiol.* 32, 808-818
- BOLEY A., MÜLLER, W.R. (2005): Denitrification with polycaprolactone as solid substrate in a laboratory-scale recirculated aquaculture system. *Water Sci Technol.* 52: 495-502.
- BUSACKER, G. P., ADELMAN, I. R., GOOLISH, E. M. (1990): Growth. In SCHRECK, C. B. & MOYLE, P. B. (eds), *Methods for Fish Biology*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, USA: 363–387.
- DUPLA, M., COMEAU, Y., PARENT, S., VILLEMUR, R., JOLICOEUR, M. (2006): Design optimizations of a self-cleaning moving-bed bioreactor for seawater denitrification. *Water Research* 40, 249-258
- GRELLA, S.L., KAPUR, N., GERLAI, R. (2010): A Y-maze Choice Task Fails to Detect Alcohol Avoidance or Alcohol Preference in Zebrafish. *International Journal of Comparative Psychology*, 23, 26-42
- HAMLIN, H.J. (2006): Nitrate toxicity in Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*). *Aquaculture* 253: 688-693.
- HAMLIN, H.J., MICHAELS, J.T., BEAULATON, C.M., GRAHAM, W.F., DUTT, W., STEINBACH, P., LOSORDO, T.M., SCHRADER, K.K., MAIN, K.L. (2008): Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 38, 79-92
- HEIDRICH, S., WEDEKIND, H., PFEIFER, M. (2006): Optimierung biologischer und technologischer Parameter für die Aufzucht von Stören in geschlossenen Kreislaufanlagen. *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft* 13 (2006): 56-109.
- HOSANG, W., BISCHHOF, W. (1998): *Abwassertechnik*, 11. neubearbeitete und erweiterte Auflage – Stuttgart; Leipzig: Teubner, 530 pp.
- KIM, E.W., BAE, J.H. (2000): Alkalinity requirements and the possibility of simultaneous heterotrophic denitrification during sulfur utilizing autotrophic denitrification. *Water Sci. Tech.* 42, 233-238.
- KLAS, S., MOZES, N., LAHAV, O. (2006): Development of a single-sludge denitrification method for nitrate removal from RAS effluents: Lab-scale results vs. model prediction. *Aquaculture* 259, 342-353.
- LAWA (2003): Hinweise zur Verringerung der Belastung der Gewässer durch Fischhaltung. Arbeitskreis 61 der LAWA. 80 pp.
- LEE, C.J., SHIN, H.S., HWANG, S.J. (2004): Characteristics of granular sludge in a single upflow sludge blanket reactor treating high levels of nitrate and simple organic compounds. *Water Science and Technology* 50/8, 217-224.
- LEE, P.G., LEA, R.N., DOHMANN, E., PREBILSKY, W., TURK, P.E., YING, H., WHITSON, J.L. (2000): Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem: *Aquacultural Engineering* 23, 37-59.
- MARTINS, C.I.M, PISTRIN, M.G., ENDE, S.S.W., EDING, E.H., VERRETH, J.A.J. (2009): The accumulation of substances in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) affects embryonic and larval development in common carp *Cyprinus carpio*. *Aquaculture* 291, 65-73.

- MARTINS, C.I.M., EDING, E.H., VERDEGEM, M.C.J., HEINSBROEK, L.T.N., SCHNEIDER, O., BLANCHETON, J.P., ROQUE D'ORBCASTEL, E., VERRETH, J.A.J. (2010): New developments in recirculating aquaculture systems in Europa: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 43, 3, 83-93
- MENASVETA, P., PANRITDAM, T., SIHANONTH, P., POWTONGSOOK, S., CHUNTAPA, B., LEE, P. (2001): Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering* 25, 35-49.
- MESKE, C. (1976): Fish culture in a recirculating system with water treatment by activated sludge. In : PILLAY, T.V.R., DILL, W.A. (Eds.), *Advances in Aquaculture*. Fishing News Ltd, Farnham, U.K., pp. 527-531
- METCALF, EDDY , INC (2003): *Wastewater engineering. Treatment and Reuse*, Fourth edition. McGraw-Hill, Inc. 1819 pp.
- MOSKWA, G. (1991): Stickstoffelimination in einer Anlage mit Wasserrückführung zur intensiven Fischhaltung unter dem Einfluss verschiedener Alleinfutter. Dissertation, Rheinische Friedrich Wilhelm-Universität, Bonn. Pp. 116.
- OH, S.E., YOO, Y.B., YONG, J.C., KIM, I.S. (2001): Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions. *Journal of Biotechnology* 92, 1-8
- OIKE, H., NAGAI, T., FURUYAMA, A., OKADA, S., AIHARA, Y., ISHIMARU, Y., MARUI, T., MATSUMOTO, I., MISAKA, T., ABE, K. (2007): Characterization of Ligands for Fish Taste Receptors. *The Journal of Neuroscience* 27(21), 5584-5592
- OTTE, G., ROSENTHAL, H. (1979): Management of closed brackish –water system for high density fish culture by biological and chemical water treatment. *Aquaculture* 18, 169-181
- POELMAN, M. (2010): CO₂ Footprint – Parameter für „klimafreundliche Fischwaren“ – Fisch vom Hof contra Pangasius aus Vietnam? Vortrag Forum Aquakultur EuroTier 2010, Hannover, 17.11.10
- RÜMMLER, F., PFEIFER, M. (1998): Aufzuchtversuche von Stören in verschiedenen Anlagentypen. *Fischer u Teichwirt* 46: 231-234.
- RÜMMLER, F., PFEIFER, M. STIEHLER, W. (2011): Abwasserabgabe für Warmwasser-Durchflussanlagen der Fischproduktion. *Fischer u Teichwirt* 62: 373-376.
- SAUTHIER, N., GRASMICK, A., BLANCHETON, J.P. (1998): Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. *Wat. Res.* 32,6: 1932-1938
- SCHRECKENBACH, K. (2002): Einfluss von Umwelt und Ernährung bei der Aufzucht und beim Besatz von Fischen. *Fischerei & Naturschutz, Nachhaltige Fischereiausübung, VDSF-Schriftenreihe* 04: 55-73.
- VAN BUSSEL, C.G.J., SCHROEDER, J.P, WUERTZ, S., SCHULZ, C. (2012): The chronic effect of nitrate on production performance and health status of juvenile turbot (*Psetta maxima*) *Aquaculture* 326-329, 163-167.
- VAN DER HOEK, J.P., LATOUR, P.J.M., KLAPWIJK,A. (1988): Effect of hydraulic residence time on microbial sulfide production in an upflow sludge blanket denitrification reactor fed with methanol. *Appl Microbiol Biotechnol*28, 493-499
- VAN RIJN, J., TAL, Y., SCHREIER, H.J. (2006): Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 34: 364-376.

- YANG, S.F., TAY, J.H., LIU, Y. (2003): A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater. *Journal of Biotechnology* 106: 77-86.
- ZIENERT, S., HEIDRICH, S. (2005): Aufzucht von Zandern in der Aquakultur. *Schriften des Instituts für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow* 18, pp. 1-60.