

LEITFADEN AQUAKULTURANLAGEN

TEIL 2: STAND DER TECHNIK ZUR REDUKTION VON EMISSIONEN



Impressum

Der vorliegende Leitfaden wurde mit aller Sorgfalt und nach bestem Wissen erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität kann jedoch keine Gewähr übernommen werden. Haftungsansprüche gegen den VSA wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche durch die Benützung und Anwendung des vorliegenden Leitfadens entstehen könnten, werden ausgeschlossen.

Rechtlicher Stellenwert

Dieser Leitfaden dokumentiert den schweizerischen Stand der Technik und die gute Praxis bezüglich Einleitung/Entsorgung von Ablaufwasser und Verwertung von Schlamm aus Aquakulturanlagen. Der Leitfaden richtet sich an die Vollzugs- resp. Bewilligungsbehörden, Gesuchsteller, Planer und Betreiber von Aquakulturanlagen. Andere Lösungen sind nicht ausgeschlossen. Gemäss Gerichtspraxis muss jedoch nachgewiesen werden, dass sie rechtskonform sind.

Autoren und Mitglieder des Kernteams

Fridolin Tschudi, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

Luca Regazzoni, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

Herausgeber

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute

Association suisse des professionnels de la protection des eaux

Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

Titelfoto

Fischzuchtkreislaufanlagen an der ZHAW Wädenswil (© ZHAW), Foto: Frank Brüderli

Gestaltung

SLS Nadler, Peter Nadler, 8610 Uster

Bezugsquelle

VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg,

Telefon 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

EINLEITUNG

Einführung

Die in einer Aquakulturanlage mit Fütterung (=intensive Aquakulturanlage) verwendete Technik beeinflusst in hohem Masse deren Emissionen in Gewässer. Je nach Produktionsmethode ist diese Technik sehr unterschiedlich, was zur Folge hat, dass eine gesetzlich geforderte Reinigung nicht einheitlich für alle Produktionsmethoden festgelegt werden kann. Eine Definition, welche Technologien vorschreibt, würde weder der Branche noch dem Gewässerschutz dienen. Deshalb wird in diesem Leitfaden «Aquakulturanlagen, Teil 2» der Fokus auf eine Übersicht zum verfügbaren **Stand der Technik** gelegt, um die im Leitfaden «Aquakulturanlagen, Teil 1» [53] geforderten Massnahmen, im Rahmen der Wirtschaftlichkeit und ohne Reduktion der Produktionsmenge, erreichen zu können. Dieses Dokument soll deshalb Betreibern wie Behörden als Hilfe dienen, die Emissionen von Aquakulturanlagen wo nötig kosteneffizient reduzieren zu können.

Ziel

Ziel ist es, in Bezug auf Aquakulturanlagen aufzuzeigen:

- woher die Emissionen aus Aquakulturanlagen stammen und wie diese zu beeinflussen sind;
- wie sich die Stoffströme in unterschiedlichen Anlagen unterscheiden;
- welche Wasserinhaltsstoffe mit welchen Massnahmen kosteneffizient beseitigt werden können;
- welche technischen Elemente für die Wasseraufbereitung zur Verfügung stehen.

Abgrenzung

Der vorliegende Leitfaden kann für Durchfluss – und Kreislaufanlagen verwendet werden, jedoch nur bedingt für geschlossene Teichanlagen und offene Netzgehege. Es beinhaltet keine rechtlichen Vorgaben, sondern Informationen und Empfehlungen zur Reduktion von Emissionen und ist als Entscheidungshilfe für Bewilligungsverfahren und den behördlichen Vollzug sowie für die Planung von neuen und der Betrieb von bestehenden Anlagen ausgelegt. Der Leitfaden beinhaltet keine Angaben zu Regelungen betreffend Fischerei, Tierschutz und Lebensmittel.

Adressaten

Dieser Leitfaden richtet sich an:

- Gesuchstellende, welche Aquakulturanlagen (gewerbliche Produktion von Fischen und Krebstieren unter Zufütterung) planen;
- Betreibende von Aquakulturanlagen, welche die Emissionen ihrer Anlage reduzieren müssen/wollen;
- Behörden, welche sowohl die projektspezifischen Auflagen für die Einleitung und Entsorgung von Abwässern sowie die Verwertung von Schlamm bestimmen als auch den Stand der Technik überprüfen.

Dieser Leitfaden setzt ein grundsätzliches Verständnis von intensiven Aquakulturanlagen voraus. Bei mangelndem Verständnis wird das Beiziehen von im Bereich Aquakultur fachkundigen Personen¹ dringend empfohlen.

¹ z. B. Koordinationsstelle Aquakultur, Schweizer Aquakultur Verband, Fachplaner

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	3
1 GELTUNGSBEREICH	6
1.1 Rechtliche Einordnung	6
1.2 Anwendung des Leitfadens	7
2 STRATEGIEN ZUR REDUKTION DER GEWÄSSERBELASTUNG	8
2.1 Entstehung von Emissionen	8
2.2 Vermeidung von Emissionen	9
2.2.1 Futterreste	9
2.2.2 Optimierung Futterqualität	10
2.2.3 Ideale Haltungsbedingungen	10
3 STOFFSTRÖME UND PROZESSE IN AQUAKULTURANLAGEN	12
3.1 Beschreibung Stoffströme	12
3.2 Beschreibung Prozesse	13
3.2.1 Mechanische Filtration und Schlammindickung	13
3.2.2 Nitrifikation	14
3.2.3 Denitrifikation	16
3.2.4 Phosphatfällung	18
3.2.5 Gastransfer (Entgasung, Sauerstoffanreicherung, Ozonierung)	19
3.2.6 Keimreduktion	20
4 TECHNOLOGIEN	22
4.1 Übersicht	22
4.1.2 Technisierungsgrad unterschiedlicher Anlagentypen	26
4.1.3 Nachgeschaltete Massnahmen zur Emissionsreduktion	29
4.2 Mechanische Feststoffentfernung und Schlammmentwässerung	30
4.2.1 Sedimentationsbecken	30
4.2.2 Dortmundbrunnen	32
4.2.3 Trommelfilter	34
4.2.4 Lamellenklärer	36
4.2.5 Proteinskimmer	38
4.2.6 Vliesfilter	40
4.2.7 Bandfilter	42
4.2.8 Membraneindickung (Membranfiltration)	44
4.2.9 Zentrifugeneindickung	46
4.2.10 Filterpresse	47
4.3 Biologische und chemische Reinigungsschritte	48
4.3.1 Bewegtbettfilter zur Nitrifikation	48
4.3.2 Bewegtbettfilter zur Denitrifikation	50
4.3.3 Belebtschlammfilter zur Denitrifikation	52
4.3.4 Rieselfilter	54
4.3.5 Festbettfilter zur Nitrifikation oder Denitrifikation	56
4.3.6 Pflanzenkläranlagen	58
4.3.7 Phosphatfällung (nachgeschaltet)	60
4.3.8 Phosphatfällung durch die Einstellung des pH	62
4.4 Sauerstoffeintrag, Gasaustrag und Keimzahlreduktion	64
4.4.1 Low-Head-Oxygenator	64

4.4.2	Sauerstoffkonus (engl. Cone)	66
4.4.3	Luft- und Sauerstoffausströmer	68
4.4.4	U-Rohr	70
4.4.5	Teichbelüftungssysteme (Schaufelrad)	71
4.4.6	Venturi	72
4.4.7	Ozonierung	74
4.4.8	Entgasung	76
4.4.9	UV-Bestrahlung	78

5	OPTIMIERUNGSHILFEN	80
5.1	Phosphor (Phosphat)	80
5.2	Stickstoff	82
5.3	Kohlenstoff	84
5.4	Gesamte ungelöste Stoffe	86
5.5	Sauerstoff	88

VERZEICHNISSE	92
Literaturverzeichnis	92
Abkürzungsverzeichnis	95

1 GELTUNGSBEREICH

1.1 Rechtliche Einordnung

In der Gewässerschutzverordnung (GSchV) sind Fischzuchtanlagen explizit erwähnt und konkrete Mindestanforderungen vorgeschrieben (Anh. 3.3 Ziff. 27). Die Verordnung hält ausserdem fest, dass die Behörde die «Anforderungen an die Einleitung auf Grund der Eigenschaften des Abwassers, des Standes der Technik und des Zustandes des Gewässers im Einzelfall» festlegt (Anh. 3.2 Ziff 1). Auch in der «Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen» (VVEA) wird der Stand der Technik verlangt (Art. 11 Abs. 2).

Bei der Beurteilung des Standes der Technik und bei der Festlegung von Anforderungen ist zwischen neuen und bestehenden Betrieben zu unterscheiden (Bestandesschutz):

- Neue Betriebe müssen zum Zeitpunkt der Baueingabe die gewässerschutzrechtlichen Anforderungen einhalten, also auch den zu diesem Zeitpunkt geltende Stand der Technik. Die Behörde kann in Abhängigkeit des Standes der Technik und der Standortverhältnisse die bestehenden Anforderungen an die Abwasserqualität verschärfen, ergänzen oder erleichtern sowie weitere Anforderungen an die Gewässerqualität festlegen. In diesem Sinne empfiehlt der VSA für neue Anlagen ergänzende Anforderungen an die Abwasser- und Gewässerqualität.
- Bestehende Betriebe verfügen über eine rechtskräftige gewässerschutzrechtliche Bewilligung. Sie erfüllen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlagen die gesetzlichen Anforderungen, also auch den Stand der Technik. Gegebenenfalls enthält die Bewilligung spezifische Anforderungen der Behörde an die Abwasser- und Gewässerqualität, die ebenfalls einzuhalten sind.

Die Beurteilung des Standes der Technik in bestehenden Betrieben im Laufe der Zeit erweist sich in der Praxis als anspruchsvoll. Massnahmen, die vor einigen Jahren dem damaligen Stand der Technik entsprochen haben, sind unter Umständen überholt. Behörden und Betriebe müssen sich deshalb in regelmässigen Abständen die Frage stellen, inwieweit der Stand der Technik sich verändert hat und Anpassungen erforderlich sind. Massgebend ist die Beurteilung folgender Aspekte:

- Einhaltung der Anforderungen der bestehenden Einleitbewilligung;
- Ungenügende Wasserqualität des betroffenen Gewässers;
- Unverhältnismässig hohe Verunreinigung des Gewässers durch die Abwassereinleitung;
- Massgebende Störungen beim Betrieb der öffentlichen Kanalisation oder der zentralen Abwasserreinigungsanlage;
- Absehbare Betriebs- oder Produktionsumstellungen;
- Alter der Anlage (Abschreibungen);
- Absehbare Aufgabe der Produktionsprozesse.

Die Entscheidung, ob sich ein Betrieb an den Stand der Technik anpassen muss, ist von der Behörde unter Berücksichtigung der Verhältnisse im Einzelfall zu treffen. Eine Veranlassung muss dabei ausreichend begründet werden können (Bestandesschutz). Punkto Alter und Abschreibung der Anlage darf eine Grössenordnung von 20 Jahren für unbewegliche und 10 Jahre für bewegliche Anlagen als Bewertungsmassstab angenommen werden. Je nach Dringlichkeit und finanziellen Auswirkungen einer Sanierung kann die Behörde mit dem Betrieb eine befristete Übergangsregelung mit angemessener Sanierungsfrist vereinbaren.

Der VSA empfiehlt den Behörden und Betrieben bei anspruchsvollen, komplexen Fragestellungen zusätzlich ausgewiesene Fachleute (auch aus der betroffenen Branche) miteinzubeziehen.

1.2 Anwendung des Leitfadens

Dieser Leitfaden umfasst mehrere Teilbereiche. Kapitel 2 fokussiert auf die Entstehung und die Vermeidung von Emissionen aus Aquakulturanlagen mittels betrieblicher Massnahmen. Für eine einheitliche Betrachtung werden dann in Kapitel 3 die gängigen Stoffströme und physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse beschrieben, die in Aquakulturanlagen zur Verbesserung der Wasserqualität zu finden sind. Das Kapitel 4 zeigt, welche Prozesse in unterschiedlichen Anlagentypen mit welchen Technologien bevorzugt eingesetzt werden und was das Funktionsprinzip der Technologien ist. Wo möglich, sind übliche Kenngrössen und Funktionsparameter beschrieben, die für die Planung und den Betrieb hilfreich sind. Diese Angaben ersetzen jedoch keine Planung durch entsprechende Fachkräfte. Die Optimierungshilfen in Kapitel 5 sollen helfen, für eine bestehende oder geplante Anlage die Emissionen bei gleichbleibender oder erhöhter Produktion zu reduzieren. Hierfür werden ausgewählte Stoffe, welche für die Einleitung limitierend sind, durch eine gezielte betriebliche oder technische Massnahme begrenzt. Finden sich keine Lösungen durch Anpassungen im Anlagenbetrieb, so werden technische Lösungen vorgeschlagen, wobei sich der Nutzer an den Prozessen und Technologien in diesem Leitfaden orientieren kann.

Die Technologie von Aquakulturanlagen entwickelt sich ständig weiter, wodurch dieser Leitfaden keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat.

Für ein vereinfachtes Verständnis zur Anwendung des Leitfadens sei hier folgendes Beispiel angeführt, anhand dessen die einzelnen Teilbereiche des Leitfadens charakterisiert werden.

Beispiel

Der existierende Fischzuchtbetrieb Musterfisch betreibt eine Durchlaufanlage mit 20 t Jahresproduktion ohne zusätzlichen Sauerstoffeintrag und möchte seine Produktion durch den Einsatz von Sauerstoff auf 100 t Jahresproduktion erweitern. Die verfügbaren Becken würden eine höhere Produktion zulassen. Um mehr produzieren zu können, benötigt er eine neue Einleitbewilligung für das Ablaufwasser der Fischzucht. Gemäss der aktuellen Betriebsform der Anlage würde die DOC-Belastung im Gewässer nach Durchmischung die zulässige Konzentration überschreiten (vergl. Leitfaden «Aquakulturanlagen, Teil 1»). Die anderen Abwasserparameter wären im vorliegenden Beispiel nicht limitierend. Die Einleitbewilligung würde durch die Behörde nur erteilt, wenn die DOC-Emissionen unter einen gewissen Grenzwert gesenkt werden können.

Die Fischzucht Musterfisch wählt folgendes Vorgehen

Stoffströme Prozesse und Technologien der bisherigen und neu geplanten Anlage werden schematisch abgebildet unter Verwendung der korrekten Begriffe. Die Anlage wird einem Anlagentyp zugeordnet und die bereits bestehenden, nachträglichen Reinigungsschritte definiert. Wasserdurchfluss, Futtermiteinsatz und Ablaufwasserparameter der aktuellen Anlage werden erhoben. Dadurch entsteht eine einheitliche Diskussionsgrundlage, um mit der Behörde und allenfalls weiteren Fachkräften eine Lösung zu finden.

Die Optimierungshilfe für TOC wird beigezogen, und auf DOC angewendet. Die Wasseranalysen zeigen, dass das Ablaufwasser einen hohen Anteil an leicht abbaubarem DOC aufweist. Bei einer Begehung vor Ort werden Sedimente innerhalb der Fischbecken festgestellt. Anstelle einer nachgeschalteten biologischen Reinigungsstufe einigen sich Betreiber und Behörden darauf, durch eine verbesserte Beckenhydraulik die Selbstreinigung zu erhöhen, somit die Rücklösung zu reduzieren und die Feststoffe über die bestehende Feststoffabscheidung abzutrennen (vermeiden statt behandeln).

2 STRATEGIEN ZUR REDUKTION DER GEWÄSSERBELASTUNG

Dieser Leitfaden «Aquakulturanlagen, Teil 2» fokussiert auf Massnahmen, mit denen die Gewässerbelastung durch Aquakulturanlagen reduziert werden kann. Diese umfassen:

- Verschmutzungsquellen reduzieren (vermeiden statt behandeln);
- interne Wiederverwendung von Wasser fördern, Wasseraustausch reduzieren;
- hohe Konzentrationen von Stickstoff und Phosphor bei tieferem Wasseraustausch anstreben, um die Reinigungseffizienz zu erhöhen;
- Vermischung von Abwasserströmen vermeiden (erreichte Reinigungseffekte erhalten);
- nachgeschaltete Wasserreinigung nur als letzte Massnahme.

2.1 Entstehung von Emissionen

Bei der Futteraufnahme eines Fisches wird nur ein Teil des Futters tatsächlich in Wachstum umgesetzt (Assimilation). Der nicht assimilierte Teil des Futters wird über den Urin, den Kot, die Exkretion oder die Atmung des Fisches ausgeschieden (Abbildung 1) und ist in der Haltungsumwelt des Fisches zu finden. Das Ablaufwasser aus Aquakulturanlagen enthält Stoffe, welche je nach Menge zu negativen Umweltauswirkungen führen können, wenn diese ungereinigt in die Gewässer eingeleitet werden. Die Stoffe, welche zu negativen Umweltauswirkungen führen können, sind Stickstoff, Phosphor und partikuläre Stoffe bzw. organische Substanz. Wird zum Beispiel Phosphor in grossen Mengen in ein Oberflächengewässer eingebracht, führt dies zu starkem Algenwachstum. Dies kann zu toxischen Algenblüten und beim anschliessenden Absterben und biologischen Abbau zu starker Sauerstoffzehrung im Gewässer führen. Stickstoff und Phosphor können im Wasser gelöst oder als Bestandteil von organischer Substanz vorkommen. Emissionen bezeichnen also Stoffe, welche vom Fisch ausgeschieden werden und negative Auswirkungen auf das Gewässer haben können.

Wie hoch die Emissionen aus einer intensiven Aquakulturanlage sind, hängt davon ab:

- wie viel gefüttert wird;
- wie gut das Futter vom Fisch in Wachstum umgesetzt wird und wieviel der Futterbestandteile ausgeschieden wird (Emissionen);
- wie gut die abgegebenen Emissionen entfernbar sind bzw. entfernt werden.

Die Futterbestandteile werden mit einer gewissen Effizienz vom Fisch aufgenommen. Je nach Qualität und Herstellung des Futters wie auch der Fütterungsstrategie des Betreibers sind diese mehr oder weniger verdaulich. Bei einer hohen Verdaulichkeit ist der Anteil an partikulären Ausscheidungen (Kot) gering. Inwiefern die verdauten Futterbestandteile vom Fisch aufgenommen (assimiliert) werden, hängt wiederum von mehreren Faktoren ab:

- von der Fütterungsrate der Tiere (Zuwachs oder Deckung des Energiebedarfs);
- von der Wasserqualität und dem Gesundheitszustand der Fische;
- von weiteren Haltungsbedingungen (Temperatur, Besatzdichte, Aktivität etc.).

Findet beispielsweise wegen Wasserknappheit nur eine Erhaltungsfütterung statt, wird ein grosser Teil des Futters in den Erhaltungsstoffwechsel investiert. Dies führt dazu, dass Proteine im Futter als Energielieferant anstatt für den Zuwachs eingesetzt werden, was zu erhöhten Stickstoff- und Phosphoremissionen im Verhältnis zum Zuwachs führt.

Auch Futterreste können Emissionen verursachen: Wenn die Fische die Futterpellets nicht finden oder erreichen, geht ein bestimmter Teil des Futters verloren. Diese Futterpellets setzen sich als Sediment ab oder werden durch eine anlageninterne Feststoffabscheidung entfernt. Bei einer langen Kontaktzeit mit dem Wasser können sich Stoffe aus den Futterpellets oder dem Kot (also aus Feststoffen) lösen und dadurch auch gelöste Emissionen verursachen (Abbildung 1).

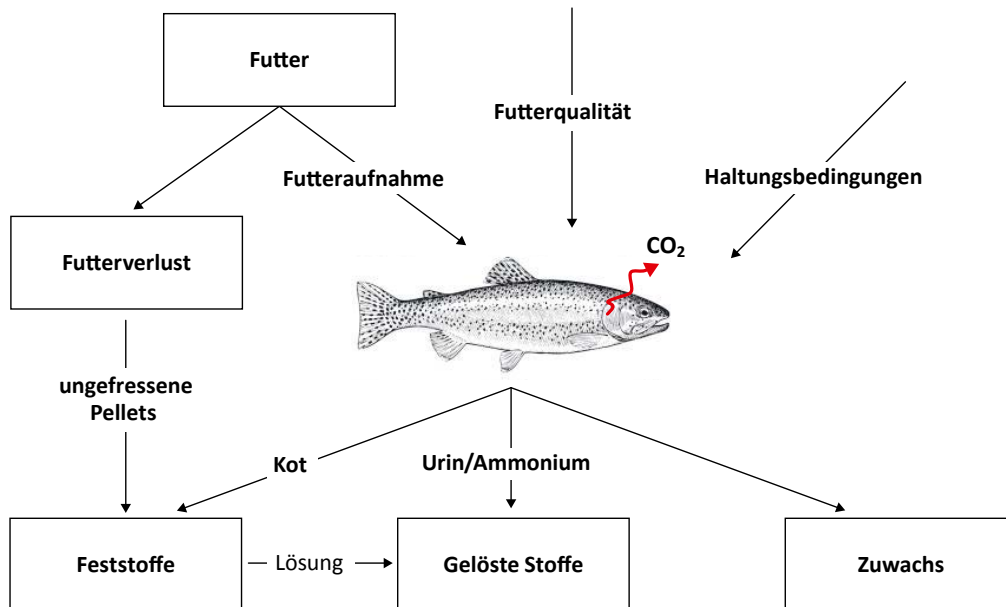
Abbildung 1

Quellen von Schadstoffemissionen und die Möglichkeiten, diese zu beeinflussen.

Verabreichtes Futter wird entweder von den Fischen gefressen oder geht als Futterverlust verloren.

Aufgenommenes Futter wird entweder assimiliert (Zuwachs) oder partikulär über den Kot oder gelöst als Urin/Ammonium ausgeschieden.

Ungefressene Pellets tragen zu den Feststoffemissionen bei und können, wie auch Kot, bei langen Kontaktzeiten im Wasser zu einer erhöhten Emission von gelösten Stoffen führen.



Als erster Schritt sollten deshalb durch eine dem Tier angepasste Fütterung die Emissionen pro Kilogramm Zuwachs minimiert werden. Dies wird erreicht durch eine Auswahl geeigneter Futtermittel, eine bedarfsgerechte Fütterung und die Aufrechterhaltung einer hohen Wasserqualität. Aus diesem Grund fokussiert dieser Leitfaden auch auf Technologien, welche die Wasserqualität für die Tiere verbessern (z. B. Sauerstoff), und dadurch indirekt die Emissionen aus Fischzuchtanlagen reduzieren.

Als zweiter Schritt können die Emissionen aus Fischzuchtanlagen durch eine interne und/oder eine nachgeschaltete Wasseraufbereitung stark beeinflusst und reduziert werden. Grundsätzlich ist der Einsatz von solchen Aufbereitungsanlagen abhängig von der nötigen Emissionsreduktion und vom Wasserverbrauch. Unabhängig vom Anlagentyp werden meistens zuerst partikuläre Stoffe, d. h. Fischkot und Futterreste, so schnell und schonend wie möglich aus dem Wasser entfernt, um eine Rücklösung zu vermeiden. In einem weiteren Schritt, besonders in Kreislaufanlagen, wird mittels eines Biofilters (Nitrifikation) fischtoxisches Ammonium zu Nitrat umgewandelt. An Standorten, an welchen eine weitere Emissionsreduktion nötig oder erwünscht ist, können das Nitrat weiter mittels einer Denitrifikationsstufe zu Luftstickstoff (N₂) reduziert und Phosphor gefällt werden. Die verschiedenen Anlagentypen und deren Technologien werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

2.2 Vermeidung von Emissionen

Die Entstehung von Fischzuchtemissionen lässt sich durch verschiedene operative Praktiken auf ein Minimum reduzieren. Für die Entstehung von Emissionen steht die Futterverwertung des Fisches im Zentrum (Abbildung 1). Diese ist wiederum von der Futteraufnahme und der Futterqualität sowie den Haltungsbedingungen abhängig. Zusätzlich gehören Futterreste zu den vermeidbaren Emissionsquellen. Massnahmen zur Emissionsreduktion spezifischer Parameter sind im Kapitel 5 Optimierungshilfen zu finden.

2.2.1 Futterreste

Futterreste führen zu Emissionen und bedeuten einen Betriebsverlust, wenn Futter nicht durch den Fisch verwertet wird. Das Ziel des Betreibers ist, bedarf- und bestandsgerecht zu füttern. Übermäßige Futterreste bedeuten, dass der Fütterungsprozess nicht optimiert ist. Dies kann vielfältige Gründe haben:

- **Überfütterung:** Futtermenge pro Fütterung zu gross (mehr als die Fische aufnehmen können).
- **Falscher Futtertyp:** Schwimm- oder Sinkverhalten des Futters der Futteraufnahme des Bestandes anpassen.

- **Fütterungsintervall:** Das Fütterungsintervall muss so eingestellt sein, dass alle Fische ans Futter kommen.
- **Fütterungsdauer:** Wenn zu viel Futter in einem kurzen Fütterungsintervall gefüttert wird, können die Fische das Futter nicht aufnehmen, bevor es weggeschwemmt wird.
- **Grösse der Futterpellets:** Sind die Pellets zu gross, können die Fische das Futter nicht aufnehmen, sind sie zu klein, wird es zu mühsam für den Fisch, die Partikel einzusammeln, bevor sie aus dem Futterbereich treiben (auf den Boden sinken oder weggeschwemmt werden).
- **Futterqualität:** Mangelnde Futterqualität, z. B. zu altes oder falsch gelagertes Futter, kann zu reduziertem Appetit und damit Futterresten führen.
- **Futterverteilung:** Wird das Futter nicht bestandsgerecht verteilt, reduziert sich die Futteraufnahme auf die dominanteren Tiere.
- **Störungen:** Wird während der Fütterung der Bestand gestört (z. B. Lärm), werden die Tiere von der Futteraufnahme abgelenkt.

2.2.2 Optimierung Futterqualität

Die Futterqualität beeinflusst das Wachstum und die Gesundheit der Fische sowie die Emissionsmenge im Abwasserstrom. Die Futterqualität variiert von Hersteller zu Hersteller und zwischen den Produktlinien eines Herstellers. Es können aber auch Qualitätsunterschiede im selben Futter von Charge zu Charge bestehen, weil nicht immer zwingend dieselben Qualitäten und Mengen der Inhaltsstoffe verwendet werden.

In Bezug auf die Abwasserwerte ist in erster Linie die Verdaulichkeit bzw. die Verwertbarkeit der Inhaltsstoffe relevant. Die Verwertbarkeit bestimmter Inhaltsstoffe ist dabei stark abhängig von der Fischart, da diese sich in der Natur auf verschiedene Nahrungsquellen spezialisieren. Somit ist nicht jedes Fischfutter für jede Fischart gleich gut geeignet. Dies ist besonders bei der Futterwahl zu berücksichtigen, da nicht für jede Fischart ein spezifisch entwickeltes Fischfutter verfügbar ist und somit ein Fischfutter, welches für eine andere Fischart entwickelt und optimiert wurde, verfüttert werden muss. Eine Auswirkung kann demnach sein, dass ein Futter verfüttert wird, welches einen hohen Proteingehalt hat, der von der gehaltenen Fischart nicht optimal verwertet werden und deshalb zu vergleichsweise hohen Stickstofffrachten im Abwasser führen kann. Ein Austausch mit verschiedenen Anbietern von Fischfutter ist bei der Wahl des Futters zwingend zu empfehlen.

Die Futterqualität wird zusätzlich durch die Lagerung und die Handhabung des Fischfutters beeinflusst. Fischfutter sollte immer korrekt gelagert werden, weil ansonsten die Futterqualität verringert wird. Zum Beispiel kann eine Lagerung an einem zu feuchten Ort zu Schimmelbildung führen. Weiter ist bei der Handhabung wichtig, dass die Pellets möglichst schonend umgefüllt und verteilt werden, da der entstehende Abrieb zu einer Belastung des Anlagenwassers führt.

2.2.3 Ideale Haltungsbedingungen

Die Haltungsbedingungen sind entscheidend für eine optimale Futterwertung und damit für eine Minimierung der entstehenden Emissionen. Dabei sind besonders die folgenden Parameter wichtig:

- **Temperatur:** Zu geringe oder zu hohe Temperaturen führen zu einer verringerten Nahrungsaufnahme der Fische (aufgrund von Inaktivität und Stress). Dies kann zu Futterresten führen. Fische, welche in ihrem Temperaturoptimum gehalten werden, verfügen über einen verbesserten Metabolismus, verwerten das Futter besser und haben ein besseres Wachstum.
- **Stress:** Stress führt zu einer verringerten Futteraufnahme, Futterverwertung und/oder Futterresten.
- **Wasserqualität:** Eine den Tieren angepasste Wasserqualität ist eine wichtige Grundlage für eine gute Futterverwertung. Werden die Tiere optimal gefüttert, wird ein grösserer Teil des Futters in Wachstum umgesetzt und es resultieren geringere Emissionen in die Haltungsumgebung pro Kilogramm Fischzuwachs. Aus diesem Grund fokussiert dieser Leitfaden auch auf Massnahmen, welche die Wasserqualität innerhalb der Fischzucht verbessern.

- **Fischgesundheit:** Eine beeinträchtigte Fischgesundheit wirkt sich oft negativ auf die Futteraufnahme und die Futtermittelverwertung aus. Dies wiederum führt zu erhöhten Emissionen pro Kilogramm Fischzuwachs. Die Aufrechterhaltung einer guten Wasserqualität unterstützt die Fischgesundheit.
- **Licht:** Eine falsche Beleuchtung kann bei Indoor-Anlagen zu verringerter Futteraufnahme führen.
- **Lärm:** Werden die Fische während ihrer Futteraufnahme gestört, führt dies, je nach Fischart, zu Futtermittelverlusten.

3 STOFFSTRÖME UND PROZESSE IN AQUAKULTURANLAGEN

3.1 Beschreibung Stoffströme

In Aquakulturanlagen werden verschiedene Technologien eingesetzt, welche die Qualität und die Zusammensetzung des durch die Anlage fließenden Wassers beeinflussen oder verändern. Die Bezeichnung der verschiedenen Stoffströme und deren Eigenschaften sorgen immer wieder für Verwirrung, besonders, wenn Stoffströme getrennt und vermischt werden. Um Missverständnissen entgegenzuwirken, werden die in der Fischzucht typischerweise vorkommenden Stoffströme definiert und deren Bezeichnung konsistent verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1

Definition der in der Fischzucht vorkommenden Stoffströme.

Stoffstrom	Art	Bedeutung	Typische Eigenschaften	Symbol
Frischwasser	Input	Frisches Wasser (meist Quell-, Grund- oder Bachwasser bzw. Leitungswasser), welches der Anlage zufließt.	Sehr geringe Nährstoffkonzentrationen; teilweise erhöhte Metallionen- (z. B. Eisen) oder Gaskonzentrationen (CO_2 oder N_2); selten Pestizidbelastung	 FW
Kreislaufwasser	Intern	Wasser, welches zwecks Wiederverwendung in der Aquakulturanlage in unterschiedlichem Masse aufbereitet und zirkuliert wird	TS meist tiefer als 5 mg l^{-1} ; DOC-Konzentrationen oft $< 25 \text{ mg l}^{-1}$; Nährstoffkonzentrationen von $\text{NH}_4^+-\text{N} < 1 \text{ mg l}^{-1}$ und $\text{NO}_2^--\text{N} < 0.1 \text{ mg l}^{-1}$ (und manchmal $\text{NO}_3^--\text{N} < 100 \text{ mg l}^{-1}$)	 KW
Rückspülwasser	Intern/Output	Kontinuierlich oder diskontinuierlich anfallender, stärker belasteter Wasserstrom aus der Rückspülung von Filtereinheiten, Abschäumen etc. Kann intern nach Aufbereitung wiederverwendet oder direkt entfernt werden.	Erhöhte Feststoffkonzentration (TS im Bereich von 0.05 bis 0.1 %) (z. B. Rückspülwasser des Trommelfilters)	 RW
Ablaufwasser	Output	Wasserstrom, welcher die Aquakulturanlage typischerweise am tiefsten Punkt über einen Überlauf verlässt. Ablaufwasser kann je nach Anlagentyp auch ohne zusätzliche Reinigung bereits Einleitqualität haben.	Bspw. Kreislaufwasser nach Filtration im Trommelfilter oder der Überlauf aus Durchlaufanlagen	 AW
gereinigtes Ablaufwasser	Output	Auf Einleitqualität aufbereitetes Ablauf- oder Rückspülwasser.	Geringere Belastung an organischer Substanz als Ablaufwasser	 gAW
Schlamm	Output	Eingedicktes Rückspülwasser oder abgesetzter Schlamm.	Hohe Feststoffkonzentration (TS üblicherweise $> 2\text{--}20\%$). Selten entwässert auf bis 95 % TS.	 S
Luft/Sauerstoff	Input	In Wasser eingetragene Luft oder technischer Sauerstoff (Sauerstoffkonzentrator oder Reinsauerstoff)	Luft oder hochprozentiger Sauerstoff ($> 95\text{--}100\%$)	 Luft/O₂
Zusatzmittel	Input	In einigen Prozessen (z. B. Denitrifikation oder Schlammeindickung) eingetragenes Zusatzmittel, welches für den Prozess benötigt wird (z. B. Kohlenstoffquelle, Koagulations-/Flockulationsmittel etc.)	Teilweise toxische Stoffe (in hohen Konzentrationen)	 Zm

3.2 Beschreibung Prozesse

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten **Prozesse** der (Ab-)Wasseraufbereitung von Aquakulturanlagen beschrieben und deren Funktionsprinzipien erklärt. Darauf folgen Beschreibungen der dafür verwendeten Technologien.

3.2.1 Mechanische Filtration und Schlammeindickung

Im Folgenden werden Funktionsprinzipien zur Entfernung von partikulären Stoffen in Aquakulturanlagen beschrieben. Futterreste und Kot sind die primären Quellen für Feststoffe in Aquakulturanlagen. Feststoffe sollten für eine gute Fischgesundheit schnell aus dem System entfernt werden. Werden sie mineralisiert, kann fischtoxisches Ammonium entstehen und zu Kiemenschäden und damit Stress führen [1]. Weiter fördern organische Stoffe im Biofilter das Wachstum unerwünschter heterotropher Mikroorganismen und reduzieren dadurch die Leistungsfähigkeit der nitrifizierenden Bakterien (siehe Nitrifikation). Verbleiben abbaubare organische Stoffe im Ablaufwasser der Aquakulturanlage, kann dies im Gewässer zu Verschlämmung und Sauerstoffzehrung führen. Aus diesen Gründen stellt eine schnelle Abtrennung organischer Feststoffe einen wichtigen ersten Schritt in der Wasseraufbereitung von Aquakulturanlagen dar.

In der Feststoffabtrennung werden massgeblich drei Prinzipien angewendet:

- 1. Filtration:** Abtrennung von Stoffen aufgrund ihrer Grösse (meist $> 20\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$). Dafür übliche Technologien sind:
 - a) für grosse Volumenströme mit geringem Feststoffgehalt: Trommelfilter (TMF), Festbettfilter (FBF);
 - b) für geringe Volumenströme mit hohem Feststoffgehalt: Vliesfilter (VF), Bandfilter (BandF), Filterpressen (FP), Membraneindickungen² (ME).
- 2. Sedimentation:** Abtrennung von grösseren Stoffen aufgrund höherer Sinkgeschwindigkeit (Dichte und Grösse). Je höher die Dichte und je grösser das Partikel, desto schneller sinkt es. Dafür übliche Technologien sind:
 - a) für grosse Volumenströme mit geringem Feststoffgehalt: Lamellenklärer (LK), Absetzbecken (SED);
 - b) für geringe Volumenströme mit hohem Feststoffgehalt: Dortmundbrunnen (DMB).
- 3. Flotation:** Reduktion der Partikeldichte durch Anheften von Gasblasen und dadurch Aufschwimmen (Flotieren) der Partikel als Schaum. Nur einsetzbar für Volumenströme mit geringem Feststoffgehalt und kleiner Partikelgrösse. Wird in Proteinabschäumern eingesetzt.

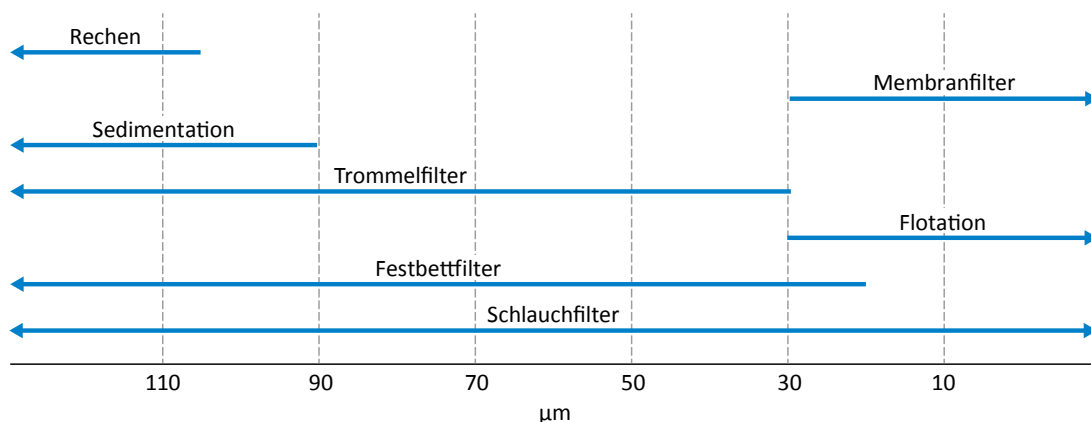


Abbildung 2
Übersicht der Partikelgrössen, welche durch verschiedene Technologien entfernt werden können (aus Cripps und Bergheim).

² Auch < 1 Mikrometer. Vorsicht vor hohen Anschaffungs- und Betriebskosten (Energie, Wartung).

Tabelle 2

Übersicht über hemmende und fördernde Faktoren zur Filtration.

+	-
• Ozonierung / UV-Behandlung fördert die Koagulation von Partikeln durch Änderung der Oberflächenladung und verbessert die Abscheidbarkeit. • Eine gute Futtermittelformulierung verbessert die Stabilität und die Abscheidbarkeit nicht gefressener Pellets und des Kots. • Die Strömung in allen Schmutzwasserleitungen muss höher als die Sinkgeschwindigkeit der grössten Futterpellets sein, um Sedimentation und dadurch Mineralisierung zu vermeiden. • Durch eine gezielte Fütterung kann die Menge an Futterresten und Fischkot reduziert werden.	• Pumpen oder starke Turbulenz / Verwirbelung vor der Feststoffabscheidung verkleinern Partikel und verschlechtern dadurch deren Abscheidbarkeit. • Eine hohe hydraulische Aufenthaltszeit im Fischbecken erhöht die Mineralisierung und verringert die Abscheidbarkeit der Feststoffe. • Strömungsberuhigte Zonen (z. B. in falsch dimensionierten Kotgruben von Fischbecken) führen zu unkontrollierter Sedimentation. • Direkter Eintrag von Gasblasen (Luft / Sauerstoff) in die Becken führt zu ungewollter Flotation und erhöht die Aufenthaltszeit der Partikel im Becken. Dadurch wird deren Mineralisierung gefördert.

Gut zu wissen

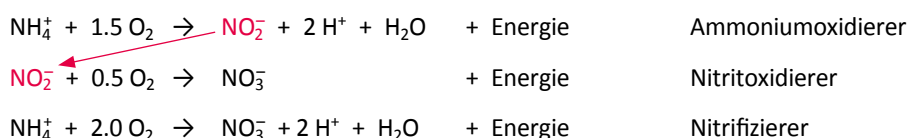
- Die Aufrechterhaltung einer angemessenen Fließgeschwindigkeit von 0.8 bis 1.2 m s⁻¹ in allen Leitungen zwischen Fischbecken und Feststoffabscheidung verhindert Sedimentation in den Leitungen.
- Die Feststoffabscheidung sollte über 60% der Feststoffe entfernen (besser mehr), sonst ist sie unterdimensioniert.
- Feststoffe, welche eine Pumpe passieren, werden so fein verkleinert, dass sie grösstenteils nur noch biologisch abgebaut werden können.

3.2.2 Nitrifikation

Die Nitrifikation ist der biologische Vorgang, während dem Harnstoff und Ammonium zu Nitrit und dann zu Nitrat oxidiert werden [3]. Von Fischen wird vorwiegend Ammonium³ über die Kiemen ausgeschieden [4]. In der Nitrifikation wird Ammonium (NH₄⁺) von zwei verschiedenen Bakteriengruppen mit Sauerstoff über Nitrit (NO₂⁻) zu Nitrat (NO₃⁻) oxidiert (siehe Formel 1). Nitrifizierende Bakterien in der Aquakultur sind auf die Bildung eines Biofilms angewiesen und brauchen deshalb eine grosse Oberfläche für ihr Wachstum. Diese Oberfläche wird im Biofilter in der Form von Füllkörpern (Biocarrier) zur Verfügung gestellt.

Formel 1

Übersicht über den biochemischen Vorgang der Nitrifikation. Ammonium wird in zwei Schritten zu Nitrat oxidiert. Dabei werden Säure (H⁺), Wasser und Energie frei.



Abhängig vom pH-Wert liegt Ammonium vorwiegend als NH₄⁺ oder als NH₃ (Ammoniak) vor. Ammoniak ist bereits in tiefen Konzentrationen fischtoxisch. Letale Grenzwerte⁴ für Ammoniak liegen zwischen 0.08 mg l⁻¹ bei Lachs und bis zu 2.2 mg l⁻¹ bei Karpfen. Generell gilt, dass die Ammoniakkonzentration unter 0.05 mg l⁻¹ liegen soll, um auch chronische Auswirkungen auf die Fischgesundheit zu verhindern [5]. Die Schweizer Tierschutzverordnung sieht Ammoniakkonzentrationen von <0.01 mg l⁻¹ für Forellen und <0.02 mg l⁻¹ für Karpfenartige vor.

Verschiedene Faktoren inhibieren die Nitrifikation und können eine Nitrit-Akkumulation verursachen: Sauerstofflimitation, Substrat- und Produktinhibition (zu viel Nitrat, zu tiefer pH), Temperatur sowie hohe Lichtintensitäten. Hohe Nitritkonzentrationen im System können Anzeichen für einen bevorstehenden Ausfall der Nitrifikation oder überhöhte Nitratwerte sein und sollten daher sofort angegangen werden [6]. Nitrit ist ausserordentlich toxisch für Fische, weil es die Sauerstoffaufnahme der Fische beeinträchtigt

³ Ammoniumwerte von 51 g kg⁻¹ Fischfutter bei einem Proteingehalt von 35% [4].

⁴ 96 h LC50-Werte, d. h. 50% der Fische sterben bei diesen Konzentrationen innert 96 h.

(Englisch: brown-blood disease). Nitrit oxidiert das im Hämoglobin enthaltene Eisen und verunmöglicht dadurch die Bindung von Sauerstoff. Chlorid wirkt diesem Effekt entgegen und kann in Form von Natriumchlorid bzw. Salz zugegeben werden. Dies kann als Sofortmassnahme bei zu hohen Nitritkonzentrationen angewendet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das Salz niemals direkt in den Biofilter gegeben wird, weil die hohe Salzkonzentration ansonsten den geschwächten Biofilter schädigt. Zusätzlich können auch Denitrifikationsbakterien eine Nitrit-Akkumulation verursachen [1].

Eine hohe Konzentration von organischer Substanz im Reaktor fördert heterotrophe Bakterien⁵, was die Nitrifikationsrate im Reaktor reduziert. Die deutlich schneller wachsenden heterotrophen Bakterien konkurrieren mit den autotrophen Nitrifikanten um Sauerstoff, Nährstoffe und Oberfläche [7–9]. Entscheidend ist dabei das Verhältnis zwischen im Wasser gelöstem Kohlenstoff und Ammonium-Stickstoff (dem C/N-Verhältnis): Dieses sollte tief sein und bereits bei einem C/N-Verhältnis von 1 kann die Nitrifikationsleistung um 50 bis 70% reduziert sein [7, 8]. Dies ist insofern problematisch, da in Kreislaufanlagen, aufgrund der Fischtoxizität, eine tiefe Ammoniumkonzentration aufrechterhalten werden muss und dadurch das C/N-Verhältnis im Zulauf der Reinigung relativ hoch ist. **Daher wird in einer Kreislaufanlage mit einer leistungsfähigen Feststoffabscheidung eine deutlich bessere Leistung des Nitrifikationsreaktors erreicht**, da die verbesserte Feststoffabscheidung organische Substanz entfernt und dadurch das Wachstum der heterotrophen Bakterien verringert, die somit weniger stark mit den Nitrifizierern konkurrieren.

Die tiefe Ammoniumkonzentration im Kreislaufwasser bedingt ausserdem eine kurze hydraulische Aufenthaltszeit (3–15 min) im Biofilter (Nitrifikation), damit genügend Ammonium an die Füllkörper gelangt (und sich somit zwischen Fischtank und Biofilter kein starker Konzentrationsgradient einstellt) [10]. Eine optimale Turbulenz im Filter stellt eine ausreichende Durchmischung dar, verhindert jedoch einen zu hohen Abrieb vom Biofilmbewuchs.

Nitrifikation ist ein säurebildender Prozess, welcher, abhängig von der Alkalinität des Wassers, zu einer Reduktion des pH-Werts führt. Dem kann mittels einer Zugabe von z. B. Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3 , Backpulver), Kalk (CaCO_3), Natronlauge (NaOH) oder Calciumhydroxid ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) entgegengewirkt werden. Die Stoffe unterscheiden sich bezüglich Kosten, Applikation (flüssig/fest), Betriebssicherheit und Pufferwirkung. In kleineren Betrieben mit wenig Regeltechnik werden oft die etwas teureren, jedoch puffernd wirkenden Carbonat-Verbindungen bevorzugt.

In der Fischzucht wird eine Vielzahl unterschiedlicher Nitrifikationsreaktoren eingesetzt, welche sich grundsätzlich darin unterscheiden, wie die Bakterien im Reaktor angeheftet bzw. vorhanden sind. Vorwiegend werden Reaktoren mit Füllkörpern verwendet [11], die als Wachstumsoberfläche für die Bakterien dienen. Würden die Bakterien in Suspension wachsen, würden sie aufgrund der hohen benötigten Durchflussraten aus dem Reaktor ausgeschwemmt werden. Dadurch benötigen Nitrifikationsreaktoren eine relativ lange Einlaufzeit bevor Fische in das System eingesetzt werden können (z. B. bei einem Neubau einer Anlage) [12]. Damit ein System bereits einen funktionierenden Nitrifikationsfilter vor Einsatz der Fische hat, sind folgende Massnahmen hilfreich:

- mit der kontinuierlichen Zugabe von Ammonium⁶, Kohlenstoff und Mikronährstoffen kann die Besiedlung durch Nitrifizierer auch ohne Fische ermöglicht werden. Wichtig ist jedoch, dass vor dem Einsatz der Fische die Konzentrationen von Ammonium und Nitrit überprüft und eine ausreichende Abbaurate nachgewiesen wird;
- der Einsatz von bereits besiedeltem Biofilter-Material (oder Teilersatz). Dabei ist aber insbesondere auf die Seuchenhygiene, d. h. die Möglichkeit durch das besiedelte Material Krankheiten oder Wassertiere (Schnecken) einzuschleppen, zu achten;
- der Einsatz von aktiven Mikroorganismen aus Kulturen⁷;
- der stufenweise Einsatz von Fischen und die stufenweise Steigerung der Futtermenge.

Eine tiefe Alkalinität führt zu stark reduzierter Nitrifikationsleistung. Generell wird eine Alkalinität (in CaCO_3 -Äquivalent = $\text{CaCO}_3_{\text{eq}}$) von 70 bis 200 mg l^{-1} empfohlen [13].

⁵ Heterotrophe Bakterien sind Bakterien, welche organische Substanz als «Nahrung» nutzen.

⁶ z. B. in Form von Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) zugegeben. Idealerweise von Anfang an auch Nitrit-Salze.

⁷ Im Aquaristik-Handel/Teichbedarf erhältlich.

Tabelle 3

Übersicht über hemmende und fördernde Faktoren der Nitrifikation.

+	–
Angemessene Turbulenz im Biofilter	Hohe Lichtintensität
pH-Wert > 7.2	Organische Substanz (hohes C/N-Verhältnis)
Temperatur > 20 °C	Tiefer pH (unter pH 6 passiert fast nichts mehr) [14]
Hohe Sauerstoffkonzentration	Schwankende Ammonium- und Nitrit-Konzentrationen (z. B. Fütterungsstopp)
Alkalinität: 70 bis 200 mg l ⁻¹ (CaCO _{3 eq})	Hohe Nitratkonzentration
Phosphatkonzentration > 0.5 mg l ⁻¹	Desinfektionsmittelrückstände (Wasserstoffperoxid, Ozon etc.)
	Fehlende Mikronährstoffe: Beim Hochfahren des Biofilters müssen neben Ammonium auch Nährstoffe und Kohlenstoff zugeführt werden.

Gut zu wissen

- Pro kg Fischfutter müssen in Kreislaufanlagen ca. 50 bis 100 m³ Wasser über den Biofilter geleitet werden.
- Pro kg Futter und Tag werden in Kaltwasseranlagen (< 20 °C) ca. 200 l Füllkörper (ca. 500 m² m⁻³) und in Warmwasseranlagen (> 20 °C) ca. 100 l Füllkörper (ca. 500 m² m⁻³) benötigt.
- Pro m² Biofilter wird eine Luftmenge von 5 bis 10 m³ h⁻¹ benötigt, um eine ausreichende Durchmischung zu ermöglichen.
- Muss der Anlage Salz zugefügt werden, das Salz nicht in den Biofilter oder den Beckenablauf geben, da der dadurch entstehende osmotische Druck die Zellen der Bakterien zerstört.
- Pro Gramm oxidiertem NH₄-N werden inklusive dem Wachstum der Mikroorganismen 4.18 g Sauerstoff verbraucht [6].
- Durch den Säureeintrag der Nitrifikation wird pro Kilogramm gefüttertem Fischfutter eine Alkalinität in der Größenordnung von 0.1 bis 0.3 kg verbraucht (g CaCO_{3 eq}/g N_{nitrifiziert} = 7) [6]. Dies entspricht einer NaHCO₃-Menge von 0.17 bis 0.5 kg, bzw. einer Ca(OH)₂-Menge von 0.075 bis 0.22 kg.
- Die hydraulische Aufenthaltszeit des Kreislaufwasser (KW) in der Nitrifikation beträgt 3 bis 15 min.
- Bei erhöhten Ammoniumwerten in Kreislaufanlagen, welche mit basischem Frischwasser betrieben werden, sollte der Wasseraustausch nicht erhöht werden, um ein Anstieg des pH und damit eine Umwandlung von Ammonium zu Ammoniak zu verhindern.
- Vorsicht beim Hochfahren des Biofilters mit Harnstoff. Dieser kann auch nach dem Einsetzen der Fische noch in Ammonium umgewandelt werden und eine toxische Wirkung haben.

3.2.3 Denitrifikation

Die Denitrifikation ist der biologische Vorgang, während dem Nitrat via Nitrit zu Stickstoffgas (N₂) reduziert bzw. abgebaut wird. In der Fischzucht wird die Denitrifikation in Kreislaufanlagen eingesetzt, in denen ein möglichst kleiner Wasseraustausch stattfinden soll. Ein weiterer, aber wenig verbreiteter Einsatzort ist die Ablaufwasserreinigung. Eine Denitrifikation kann durch hohe Kosten für Frisch- und Ablaufwasserentsorgung, hohe Heizkosten (thermische Energie), Salzverlustreduktion, oder eine Reduktion der Stickstofffracht im Ablaufwasser begründet sein.

Die Hauptquelle von Nitrat in Fischzuchtanlagen ist von der Nitrifikation umgewandeltes Ammonium, welches ursprünglich durch den Metabolismus der Fische ausgeschieden wurde. Denitrifikation wird von verschiedenen heterotrophen Bakterien, d. h. Bakterien die organische Substanz abbauen, durchgeführt [6]. In vier Teilschritten wird Nitrat (NO₃⁻) zu Nitrit (NO₂⁻), Stickstoffmonoxid (NO), Distickstoffmonoxid (N₂O) und schliesslich zu gasförmigem Luftstickstoff (N₂) reduziert, welcher schliesslich aus der Anlage entgasen muss [15] (siehe Formel 2).

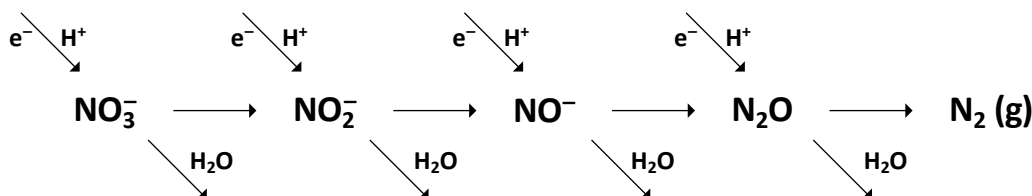
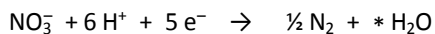


Abbildung 3

Schrittweise Reduktion von Nitrat zu gasförmigem Luftstickstoff (N_2), unter Verbrauch von Elektronen (e^-) und Protonen, d. h. Säure (H^+).



Formel 2

Die chemische Bilanz der Denitrifikation.

Die chemische Bilanz der Denitrifikation. Zur Reduktion eines Nitratmoleküls werden Protonen und Elektronen verbraucht, wovon letztere in Aquakulturanlagen meist⁸ von einer Kohlenstoffquelle stammen.

Wie in Formel 2 ersichtlich benötigt die Denitrifikation Protonen (H^+) und Elektronen (e^-) um das Nitrat zu reduzieren. Diese stammen von einer Kohlenstoffquelle, welche, aufgrund der tiefen Kohlenstoffkonzentration im Kreislaufwasser, zugegeben werden muss.

Wenn Methanol als Kohlenstoffquelle benutzt wird, werden stöchiometrisch 2.47 g Methanol/g NO_3^- -N benötigt; in der Praxis liegen die Werte zwischen 3 g Methanol/g NO_3^- -N und 5 g Methanol/g NO_3^- -N, da ein gewisser Verlust durch Sauerstoffzehrung und Zellwachstum entsteht. In der Praxis ist es wichtig, dass die Kohlenstoffquelle nicht zu stark überdosiert wird, da dies mehrere unerwünschte Auswirkungen haben kann: a) Förderung fermentativer Prozesse, b) Sauerstoffzehrung bei einer Ausschwemmung des Kohlenstoffs in die Anlage und c) Appetitlosigkeit der Fische⁹. Beim Hochfahren der Denitrifikation fördern höhere Dosismengen der Kohlenstoffquelle die Ausbildung der Bakterienkultur im Denitrifikationsreaktor [17].

Typischerweise werden Methanol, Ethanol, Glycerin, Acetat oder Glukose in flüssiger Form als Kohlenstoffquelle verwendet. Die gängigste Kohlenstoffquelle ist Methanol, da sie günstig ist und zu guten Resultaten in der Denitrifikation führt. Die anderen Stoffe sind aber wegen höherer Betriebssicherheit gerade bei kleineren Anlagen beliebter.

Nitrit-Akkumulation kann auf eine zu geringe Dosierung der Kohlenstoffquelle hindeuten [18], welche mit einer leichter Überdosierung verhindert werden kann [16].

Das Redoxpotenzial (Englisch: oxidation/reduction potential, ORP) kann als Kontrollparameter für die Denitrifikation verwendet werden (zur Abschätzung der Vollständigkeit des Denitrifikationsprozesses). Eine vollständige Denitrifikation führt zu einem Redoxpotenzial zwischen -150 und -250 mV (abhängig vom Ausgangssubstrat) und wird durch einen «Knick» in der abfallenden Redoxpotenzial-Kurve signalisiert. Das Redoxpotenzial kann in sequenziellen Reaktoren zur Kontrolle bei der Befüllung und in kontinuierlichen zur Kontrolle der Zulaufmenge und Dosierung der Kohlenstoffquelle verwendet werden.

Wird die Denitrifikation im Bypass zur Nitrifikation betrieben, bietet es sich an die eine hydraulische Aufenthaltszeit < 2 h zu wählen (d. h. den Durchfluss durch den Reaktor zu erhöhen), um dadurch unkontrollierte Reduktionsprozesse¹⁰ (z. B. Sulfat zu Schwefelwasserstoff) zu verhindern [19]. Jedoch ist dies stark vom Durchfluss und der gewünschten Rate der Nitratreduktion abhängig. Zusätzlich kann der Denitrifikation ein Ozonreaktor nachgeschaltet werden, der im Ablaufwasser enthaltenes toxisches Nitrit zu unbedenklichem Nitrat oxidiert.

Spurenelemente und Salze (Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, NaCl, etc.) sind Teil von verschiedenen wichtigen biochemischen Vorgängen in der Denitrifikation [20, 21]. Dadurch können besonders die Ozonierung oder der Einsatz von Fällmitteln in Salzwasser-Anlagen ein Defizit an Spurenelementen und damit eine Limitierung der Denitrifikationsrate verursachen. Durch die Zugabe von Spurenelementen kann die Denitrifikationsrate erhöht werden [21].

⁸ Andere Formen der Denitrifikation existieren, werden hier jedoch nicht behandelt.

⁹ bei verschiedenen Kohlenstoffträgern starker Rückgang der Futteraufnahme der Fische, z. B. -37% bei vergälltem Ethanol oder -33% bei Essigsäure [16].

¹⁰ DNRA: dissimilative Nitratreduktion zu Ammonium.

In der Theorie kann die Denitrifikation mit kohlenstoffreichem Anlagenschlamm betrieben werden. In der Forschung wurde dies erfolgreich erprobt [22–31]. Verschiedene Fragen, z. B. nach der Verträglichkeit des zurückgeführten Substrats für die Fische, sind aber noch unzureichend geklärt.

Tabelle 4

Übersicht über hemmende und fördernde Faktoren der Denitrifikation.

+	–
pH-Wert 7 bis 8.5 [6]	Sehr hohe Salzkonzentrationen ($>35 \text{ g l}^{-1}$)
CSB/N: 2 bis 5 (abhängig von der Kohlenstoffquelle!)	Überdosierung der Kohlenstoffquelle
Spurenelemente (Eisen, Mangan etc.)	

Gut zu wissen

- Wird der Anlage Salz hinzugefügt, dieses nicht in den Denitrifikationsreaktor geben!
- Die Denitrifikation erhöht den pH. Pro Gramm Nitratstickstoff, das zu N_2 abgebaut wird, wird ein $\text{CaCO}_3_{\text{eq}}$ von 3.57 g generiert [15]. Dadurch kann der Einsatz von Chemikalien zur Kontrolle des pH in der Nitrifikation ungefähr halbiert werden.
- Methanoldosierung: 3 bis 5 g Methanol/g NO_3^- -N
- Nitritakkumulation weist auf eine unvollständige Denitrifikation und damit auf eine zu geringe Dosierung der Kohlenstoffquelle hin [16, 18].
- Denitrifikation findet bei einer Sauerstoffkonzentration $<0.3 \text{ mg l}^{-1}$ statt.
- Eine starke Reduktion des Wasseraustausches verringert den Abtransport von Wärme und kann bei fehlender Kühlung im Sommer sogar bei Warmwasserarten zu Problemen führen.
- Der Betrieb einer Denitrifikation erfordert viel Fachwissen und sollte immer auf die Verhältnismässigkeit überprüft werden. Die wenigsten Kreislaufanlagen haben deshalb eine Denitrifikation.

3.2.4 Phosphatfällung

In der Schweiz ist Phosphor der limitierende Stoff für das Pflanzen-, Algen- und Bakterienwachstum in Gewässern. Phosphoreintrag ins Gewässer kann schon bei kleinen Mengen zu Massenwachstum von Algen und Bakterien führen. Aufgrund dessen ist die Phosphorkonzentration im Schlamm und Ablaufwasser von Fischzuchten relativ streng geregelt. Phosphor ist im Fischfutter als Phosphat und organischer Phosphor vorhanden und wird vom Fisch in gelöster Form über den Urin und in partikulärer Form über den Kot ausgeschieden.

Um Phosphate aus Abwasser zu entfernen, gibt es verschiedene Möglichkeiten: Neben klassischen chemischen Ausfäll- oder Flockungsmethoden sind Technologien, welche eine Bioakkumulation durch Bakterien, Algen oder Pflanzen nutzen, bekannt. Gemeinsam haben die Methoden, dass sie gelöstes Phosphat in eine partikuläre Form überführen, welche durch Sedimentation, Abschöpfung oder ähnliche Prozessen aus dem System entfernt werden kann [32].

Reicht in einer Fischzucht die Abtrennung des partikulären Phosphors nicht, so wird dieser meist über klassische Ausfällmethoden mit Aluminium- und Eisensalzen entfernt. Oft ist dieser Schritt mit der Schlammeindickung kombiniert. Die Metallsalze werden dem Ablauf- oder Rückspülwasser zugeführt und der gelöste Phosphor wird in eine partikuläre Form überführt (Ausfällung). Da die ausgefällten Partikel in der Regel sehr klein und nur schwer abtrennbar oder absetzbar sind, werden in einem zweiten Schritt durch Zugabe eines Flokkulationsmittels grössere Aggregate gebildet. Diese Flocken können in einem anschliessenden Schritt abgetrennt werden (oftmals mittels Bandfilter). Die Phosphatfällung ist insbesondere im Hinblick auf Unterhalt und Wartung ein kostenintensives Verfahren.

+	-
Punktueller Zugabe von Calciumhydroxid zur pH-Kontrolle erhöht die Ausfällung von Phosphor innerhalb der Anlage.	Unzureichende Turbulenz bei der Einmischung der Fällungs- und Flokkulationsmittel.
Feine organische Partikel helfen bei der Ausfällung und Abtrennung der Phosphorsalze.	Zu hohe oder tiefe Turbulenz in der Flokkulationsphase.
Bei korrekter Dosierung des Fällmittels kann viel Geld gespart werden.	Zu geringe hydraulische Aufenthaltszeit in der Flokkulation.
	Unzureichende Abtrennung der ausgefällten Phosphorsalze.

Tabelle 5

Übersicht über hemmende und fördernde Faktoren der Phosphatfällung.

- Phosphatfällung im Ablaufwasser ist nur für Kreislaufanlagen mit einem tiefen Wasserverbrauch pro kg Fischfutter eine zweckmässige Lösung. In Durchlaufanlagen sind die Konzentration von Phosphor zu tief und die Wassermenge zu hoch.
- Der effizienteste Einsatzort von Metallsalzen (höchste Kosten/Nutzen-Effizienz) ist das Rückspülwasser der Trommelfilter.
- Zur Fällung gehört auch die Abtrennung. Ist diese falsch dimensioniert, erfüllt die Fällung ihren Zweck nicht.

Gut zu wissen

3.2.5 Gastransfer (Entgasung, Sauerstoffanreicherung, Ozonierung)

In der Fischzucht können zwei Ziele im Vordergrund stehen, wenn von Gastransfer gesprochen wird: der Eintrag von Sauerstoff (O_2) oder der Austrag von Kohlenstoffdioxid (CO_2) oder Luftstickstoff (N_2). Ein Gastransfer erfolgt dann, wenn in einer Phase (d.h. entweder in der Luft oder im Wasser) eine Über- oder Untersättigung besteht. Ist beispielsweise zu wenig Sauerstoff im Wasser gelöst als eigentlich sein könnte, löst sich gasförmiger Sauerstoff im Wasser. Die Löslichkeit eines Gases in Wasser ist abhängig von der Temperatur, dem Salzgehalt, der Gaszusammensetzung und dem Druck [6]. Der Transfer zwischen Gas und Flüssigkeit findet über die Kontaktflächen der beiden Medien statt.

Ist ein Gas im Wasser übersättigt (z.B. CO_2) kann dieses natürlicherweise wieder aus dem Wasser ausgasen. Da die Kontaktfläche zwischen Wasser- und Gasphase in Aquakulturanlagen jedoch gering ist und dadurch Gas nur sehr langsam ein- oder ausgetragen wird, werden oftmals Rieselfilter oder Bewegtbettfilter eingesetzt. Diese erhöhen die Kontaktfläche zwischen den zwei Phasen und beschleunigen daher auch den Gasaustrag. Gasübersättigung kann vielerlei Ursachen haben: CO_2 im Frischwasser stammt von mikrobiellen Abbauprozessen im Quellgebiet und kann wie auch Stickstoffgas bei Erwärmung des Wassers zu einer Übersättigung führen. Innerhalb der Fischzuchtanlage stammt CO_2 vorwiegend vom Metabolismus der Fische und Mikroorganismen. Stickstoffgas kann aus der Denitrifikation stammen, Hauptquelle ist jedoch oft Luft, die unter hohem Druck mit dem Wasser in Kontakt kommt (tiefer Lufteintrag im Biofilter, Luftblasen oder saugseitiges Leck in Pumpleitungen, Stickstoff im Sauerstoffkonus bei Verwendung von Sauerstoffkonzentratoren etc.). Fehlende Kenntnis im Anlagenbau, mangelndes Fachwissen von Betreibern und verhältnismässig teure (und dadurch fehlende) Messtechnik sind Gründe für erhöhte N_2 - und CO_2 -Werte in manchen Aquakulturanlagen (insbesondere in Kreislaufanlagen).

Generell muss in der Fischzucht Sauerstoff ins Wasser eingetragen werden: Die Verfügbarkeit von Sauerstoff ist in der Regel der erste Faktor, der die Intensivierung einer Fischzuchtanlage begrenzt. Da die maximale Sauerstoffkonzentration bei normalem Atmosphärendruck im Wasser vergleichsweise gering ist (9.1 mg l^{-1} bei 20°C), kann bei Durchlaufanlagen, die den gesamten Sauerstoff aus dem Frischwasser beziehen, nur eine geringe Produktion bei hohem Wasserverbrauch erreicht werden (pro kg Fischfutter werden ungefähr 0.5 bis 1 kg Sauerstoff benötigt). Wenn die Produktion intensiviert werden soll, muss künstlich Sauerstoff eingetragen werden. Dies kann erreicht werden, indem die Kontaktfläche zwischen Sauerstoff und Wasser maximiert wird (durch kleine Verwirbelungen oder kleine Blasendurchmesser). Zusätzlich können die Kontaktzeit zwischen Sauerstoff und Wasser maximiert und der Druck erhöht werden. Bei tiefen Temperaturen und tiefen Salzgehalten kann grundsätzlich mehr Sauerstoff im Wasser gelöst werden. Wird Reinsauerstoff ins Wasser eingetragen können sehr hohe Sauerstoffsättigungen

erreicht werden; dadurch kann die benötigte Umwälzung z. B. in einer Kreislaufanlage deutlich reduziert werden.

Ein weiterer Ort, an welchem ein Gas in das Anlagenwasser eingebracht wird, ist die Ozonierung: Ozon (O_3) ist ein Sauerstoffmolekül mit einem zusätzlichen Sauerstoffatom. In Kontakt mit Wasser bildet Ozon Hydroxylradikale. Diese greifen sämtliche chemischen Reaktionspartner an und können organische Substanzen wie suspendierte Feinpartikel, für die Wassertrübung verantwortliche Huminstoffe, aber auch Bakterien, Algen, Pilze und Viren, abbauen, inaktivieren oder töten. Ozon greift auch die Kiemen und Schleimhäute von Fischen an. Dadurch sind eine korrekte Dosierung und Messung sowie eine Zerstörung von Restozon (z. B. durch UV) unentbehrlich, damit die Fische nicht geschädigt werden.

Tabelle 6

Übersicht über den Gastransfer hemmende und fördernde Faktoren.

+	–
Kleiner Blasendurchmesser bzw. grosse Kontaktfläche.	Hohe Turbulenz, die kleine Blasen zu grösseren anwachsen lässt und damit die Kontaktfläche verringert.
Lange Kontaktzeit von Gas und Wasser.	Geringer Gasvolumenstrom.
Hohes Gasvolumen.	Geringe Kontaktzeit.
Hohe Konzentrationsgradienten.	

Gut zu wissen

- Pro kg gefüttertem Fischfutter benötigen Fische ungefähr 0.5 bis 1 kg Sauerstoff für die Atmung.
- Technologien, welche bei erhöhten Druck Sauerstoff anreichern, niemals mit Druckluft oder nicht-reinem Sauerstoff betreiben, weil dadurch auch unerwünschte Fremdgase angereichert werden. Regelmässig (täglich bis wöchentlich) entlüften.

3.2.6 Keimreduktion

Bakterielle und virale Erkrankungen sowie Parasiten (hier verallgemeinernd «Keime») können zu schwerwiegenden Ausfällen und betrieblichen Problemen führen. Oftmals gelangen Keime über das Frischwasser ins System. Dem sind vor allem Aquakulturanlagen ausgesetzt, die mit Oberflächenwasser betrieben werden. Aber auch in Aquakulturanlagen, welche mit Frischwasser mit sehr geringer Keimzahlbelastung betrieben werden, kann dies ein Problem sein, da auch innerhalb des Systems eine Vermehrung stattfinden kann. Weiter können der Fischbesatz, eine fehlende Betriebshygiene (z. B. Personalkleidung, Gegenstände etc.) sowie Vögel und andere Tiere zur Verbreitung von Keimen beitragen.

Gängige in Aquakulturanlagen eingesetzte Technologien zur Keimreduktion sind UV-Anlagen (UV-Bestrahlung) und Ozon-Reaktoren (Ozonierung). UV-Strahlen, besonders in der Form von UV-C-Strahlen, führen zu einer Beschädigung der DNA der Mikroorganismen, welche dadurch inaktiviert werden. Ozon ist ein ausserordentlich starkes Oxidationsmittel, das Zellen oxidiert und zerstört und damit effektiv gegen Bakterien und Viren ist.

Die Effektivität der Desinfektionswirkung ist abhängig von Partikeln, gelöster organischer Substanz (entspricht DOC) und anorganischen Substanzen:

- Partikel im Wasser erhöhen die Trübung des Wassers, was wiederum zu einer Absorbierung und Streuung von UV-Strahlen und somit zu einer Reduktion der Effektivität der Keimreduktion führt. Ebenfalls reagiert Ozon unspezifisch mit organischer Substanz.
- Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) führt zu einer Reduktion der Transmission von UV-Strahlung und dadurch zu einer Senkung der Effektivität der UV-C-Behandlung. Dies kann insbesondere in Kreislaufanlagen mit geringem Wasseraustausch eine Herausforderung sein, da sich schwer abbaubare Huminstoffe (DOC) im Kreislaufwasser anreichern. DOC wird typischerweise mittels einer Ozonierung (und kombiniert mit einem Proteinskimmer) entfernt.
- Anorganische Stoffe sind oft leicht oxidierbar und führen bei hoher Konzentration zu einer Reduktion der Effektivität von Ozonierungsanlagen.

Bei Aquakulturanlagen ist die Desinfektion von Frischwasser empfehlenswert, wenn dieses aus Oberflächenwasser stammt. In Kreislaufanlagen wird das Kreislaufwasser konstant über keimreduzierende

Behandlungsschritte geleitet, wobei hier der Fokus auf einer hohen Keimreduktion, jedoch keiner kompletten Desinfektion liegt. Der Durchfluss durch die Keimreduktionstechnologie muss dabei so hoch sein, dass sich die Mikroorganismen nicht schneller vermehren können, als dass sie abgetötet werden. Zudem wird durch den Betrieb der UV-Anlage das Verhältnis von mobilen zu sessilen Mikroorganismen beeinflusst, was sich unter Umständen auch nachteilig auf das mikrobielle Gleichgewicht im System auswirken kann.

+	–
Geringe Menge an gelösten organischen Verbindungen (hohe Transmission von UV-C Strahlung). Leichte Ozonierung des Wassers oder Wasseraustausch erhöht Transmission von UV-Strahlung. Hohe Reinheit des Quarzglases verbessert die Abstrahlung der UV-Lampe ins Wasser.	Zu geringe Kontaktzeit schwächt Dosis der UV-Anlage. Tiefe Transmission schwächt Dosis der UV-Anlage. Hohe Trübung schwächt die Dosis der UV-Anlage.

Tabelle 7

Übersicht über hemmende und fördernde Faktoren zur Keimreduktion.

- Je geringer die Trübung des Anlagenwassers, desto effektiver ist die Technologie zur Keimreduktion.
- Je höher die Transmission, desto effektiver die UV-C Behandlung.
- Die UV-C-Dosis muss auf den Zielorganismus (Erreger) abgestimmt werden. Transmission beachten.
- Trübung wird durch Partikel im Wasser hervorgerufen.
- Färbung wird durch DOC (färbende Huminstoffe) hervorgerufen.
- UV-Anlagen werden in der Aquakultur üblicherweise mit einer elektrischen Leistung von 5 bis 10 W pro m³ Durchfluss betrieben.
- UV-C-Strahler sind alle 1 bis 2 Jahre zu ersetzen, da die UV-C Strahlung mit der Zeit abnimmt.
- Systeme mit UV-Sensor helfen, die Effektivität des Systems besser zu überwachen.
- Quarzgläser der UV-Anlagen halbjährlich auf Verschmutzung und Trübung prüfen (Fett, Biofilm, Kratzer)
- Kein Anlagenbetrieb mit ausgeschalteten UV-Strahlern, damit sich kein Biofilm auf den Gläsern bilden kann.

Gut zu wissen

4 TECHNOLOGIEN

Die vorgängig beschriebenen Prozesse können mit unterschiedlichen Technologien umgesetzt werden. Manche dienen der Schlammeindickung, andere der Entfernung oder Umwandlung gelöster Stoffe und wieder andere der Keimreduktion usw. Die nachfolgende Übersicht präsentiert eine Auswahl von technischen Möglichkeiten, mit denen die Wasserqualität in Aquakulturanlagen verbessert werden kann. Es werden sowohl interne als auch nachgeschaltete Möglichkeiten vorgestellt. Eine interne Wasseraufbereitung und -wiederverwendung führt zu geringeren Abwasserströmen mit höheren Konzentrationen, was eine effizientere Reinigung ermöglicht. Aus diesem Grund beginnt eine gute Ablaufwasserreinigung bereits innerhalb der Aquakulturanlage.

Die vorgestellten Technologien sind nicht abschliessend. Neue Entwicklungen ergeben neue Möglichkeiten zur Wasseraufbereitung. Je nach Standortvoraussetzungen, Raumverfügbarkeit, finanziellen Rahmenbedingungen, Energieverfügbarkeit, Betriebsgrösse etc. stellen unterschiedliche Technologien die richtige Lösung dar. So kann beispielsweise für den einen Betrieb eine starke Eindickung des Schlammes aufgrund hoher Transportwege sinnvoll sein, wogegen bei einem anderen Betrieb die Verwertung des Schlammes als Hofdünger mit einem tieferen Feststoffgehalt Vorteile bringt.

Neben den einzelnen Technologien ist auch die richtige Kombination derselben von hoher Wichtigkeit. Gereinigte Wasserströme sollen nicht mit belasteten Wasserströmen gemischt werden, um den bereits erzielten Reinigungserfolg nicht zu schmälern. Ebenso wichtig ist es, die Kontaktzeiten von Feststoffen mit dem Wasser in allen Fällen so tief wie möglich zu halten, um die Mineralisierung zu verringern.

Zusätzlich zur eigentlichen Reinigungswirkung haben einige dieser Technologien auch eine zweite, ebenso wichtige Funktion. Durch eine Aufrechterhaltung einer guten Wasserqualität in der Aquakultur können die Gesundheit der Fische unterstützt, damit die Futteraufnahme und Verwertung verbessert und schliesslich die Fischemissionen reduziert werden. Der korrekte Betrieb dieser Technologien ist somit ausschlaggebend, um die Wasserbelastung pro Kilogramm Fischfutter von Anfang an tief zu halten. Deshalb beinhalten die folgenden Technologieblätter auch Informationen zum Betrieb der Technologien.

4.1 Übersicht

4.1.1 Schematische Darstellung

Für die im Leitfaden aufgeführten Technologien wird in den Tabellen 8, 9 und 10 eine Übersicht über die folgenden Punkte geschaffen:

- **Bezeichnung:** die im Leitfaden verwendete Benennung der Technologien;
- **Symbol:** die in den Prozessflussdiagrammen verwendeten Symbole und Beschriftungen;
- **Prozess:** den durch die Technologie erreichten massgeblichen Prozess (hier wurde bewusst darauf verzichtet mögliche Nebenprozesse aufzuführen);
- **Parameter:** die chemischen und physikalischen Parameter, auf welche die Technologie einen massgeblichen Einfluss haben kann. Verschiedenen Farben stellen dar, ob der entsprechende Parameter durch die Technologie entfernt (bzw. reduziert) oder möglicherweise produziert wird.

Mechanische Feststoffabscheidung und Schlammmentwässerung

Bezeichnung	Symbol	Prozess	N _{gel}			N _{part}	P _{gel}	P _{part}	POC/ GUS	DOC
			NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N					
Feststoffabscheidung	FA	Überbegriff für die mechanische Feststoffabscheidung								
Sedimentationsbecken/ Absetzbecken	SED	Mechanische Feststoffabscheidung								
Dortmundbrunnen	DMB	Schlammmentwässerung (Vorsicht vor Rücklösung)								
Trommelfilter	TMF	Mechanische Feststoffabscheidung								
Lamellenklärer	LK	Mechanische Feststoffabscheidung								
Proteinskimmer	PS	Mechanische Feststoffabscheidung, Ozonierung								
Vliesfilter	VF	Mechanische Feststoffabscheidung, Schlamm- entwässerung								
Bandfilter	BandF	Mechanische Feststoffabscheidung, Schlamm- entwässerung								
Membraneindickung	ME	Schlammmentwässerung								
Zentrifugeneindickung	ZED	Schlammmentwässerung								
Filterpresse	FP	Schlammmentwässerung								

Tabelle 8

Übersicht über Techno-
logien zur mechanischen
Feststoffabscheidung und
Schlammmentwässerung.

Zellenfarben weisen auf
das Reduktionspotenzial
■ starke Reduktion
■ mittlere Reduktion
■ schwache Reduktion

und auf ein
■ Risiko zur Produktion
des jeweiligen Parameters
aufgrund von Mineralisie-
rung hin.

Biologische und chemische Reinigungsschritte

Bezeichnung	Symbol	Prozess	N _{gel}			N _{part}	P _{gel}	P _{part}	POC/ GUS	DOC	CO ₂ (aq)
			NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N						
Biofilter	BF _{Nit}	Überbegriff: Biofilter zur Nitrifikation (Nit), Nitrat als Endprodukt			Produkt						
Biofilter	BF _{Den}	Überbegriff: Biofilter zur Denitrifikation (Den).									
Bewegtbettfilter	BBF _{Nit}	Nitrifikation, Entgasung, DOC-Reduktion			Produkt						
Bewegtbettfilter	BBF _{Den}	Denitrifikation, DOC Reduktion									
Anoxischer Belebtschlammfilter zur Den.	BSF	Denitrifikation, DOC-Reduktion									
Rieselfilter	RF	Nitrifikation, Entgasung, DOC-Reduktion			Produkt						
Festbettfilter/Beadfilter	FBF _{Nit}	Nitrifikation, mechanische Feststoffentfernung			Produkt						
Festbettfilter/Beadfilter	FBF _{Den}	Denitrifikation, mechanische Feststoffentfernung									
Pflanzenkläranlagen	PKA	Nitrifikation, DOC-Reduktion.			Produkt						
Phosphatfällung	PF	Phosphatfällung (mit Feststoffabtrennung)									
Phosphatfällung durch die Einstellung des pH	PF	Phosphatfällung, pH-Kontrolle									

Tabelle 9

Übersicht über Technologien der biologischen und chemischen Reinigungsschritte.

Zellenfarben weisen auf das Reduktionspotenzial

- starke Reduktion
- mittlere Reduktion
- schwache Reduktion

und auf ein

- Risiko zur Produktion des jeweiligen Parameters aufgrund von Mineralisierunghin.

Alle Arten der biologischen Filtration können durch Mineralisierung oder Aufbau mikrobieller Biomasse, gelöste oder partikuläre Stoffe geringfügig beeinflussen.

Technologien zu Gaseintrag, Gasaustrag und Desinfektion

Bezeichnung	Symbol	Prozess	POC/ GUS	DOC	O ₂	O ₃	CO ₂ /N ₂	Keime
Sauerstoff- /Lufteintrag	Oxy	Überbegriff: Sauerstoff oder Lufteintrag						
Low-Head-Oxygenator	LHO	Sauerstoffanreicherung				optional		
Sauerstoffkonus	SK	Sauerstoffanreicherung				optional	N ₂ ungewollt	
Luft- und Sauerstoffausströmer	A	Gaseintrag (Sauerstoff)			variiert stark			
U-Rohr	U-Rohr	Gaseintrag (Sauerstoff)					N ₂ ungewollt	
Teichbelüftung (Schaufelrad)	SR	Gaseintrag (Sauerstoff)						
Venturi	Vent	Gaseintrag (Sauerstoff, Ozon)						nur mit Ozon
Ozoneintrag	O ₃	Ozonierung						
Entgasung	Entg	Reduktion der Gaskonzentration im Anlagenwasser						
UV-Bestrahlung	UV	Keimdichtereduktion				teils mit O ₃ -Produktion		

Tabelle 10

Übersicht über Technologien zum Gaseintrag, Gasaustrag und Desinfektion.

Zellenfarben weisen auf das Eintragspotenzial

- starker Eintrag
- mittlerer Eintrag
- schwacher Eintrag

und

Austrags-/Eliminationspotenzial hin.

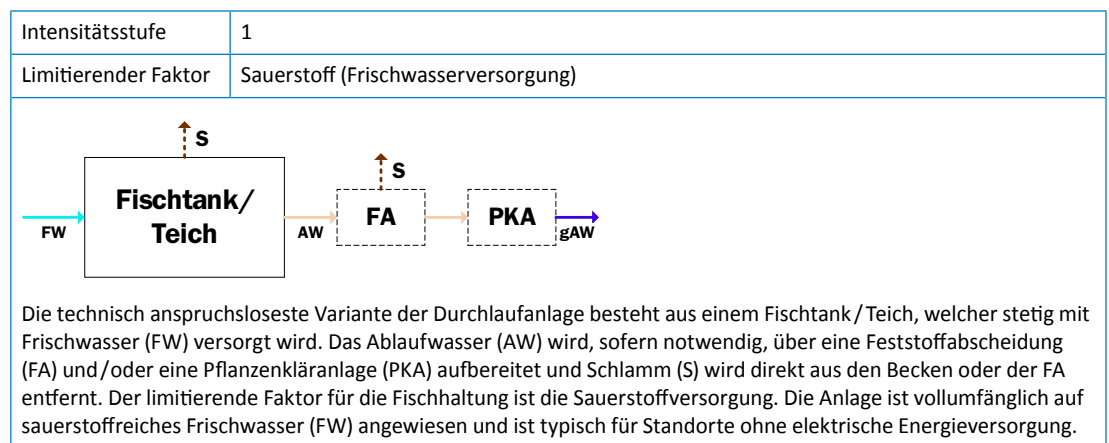
4.1.2 Technisierungsgrad unterschiedlicher Anlagentypen

Folgend werden verschiedene Varianten der technischen Umsetzung von Aquakulturanlagen beschrieben. Die hier definierten Anlagentypen sind keine abschliessende Aufzählung, in der Praxis ist die Konfiguration von Anlagen oftmals sehr unterschiedlich und aufgrund der vielen Möglichkeiten nicht präzise zusammenfassbar. Die **ausgezogenen Linien** definieren diejenigen technischen Elemente, welche für die Variante massgebend sind. Die **unterbrochenen Linien** zeigen optionale Elemente und Stoffströme. Mögliche Technologien zur Schlammbehandlung werden hier für eine verbesserte Übersicht nicht abgebildet und separat diskutiert.

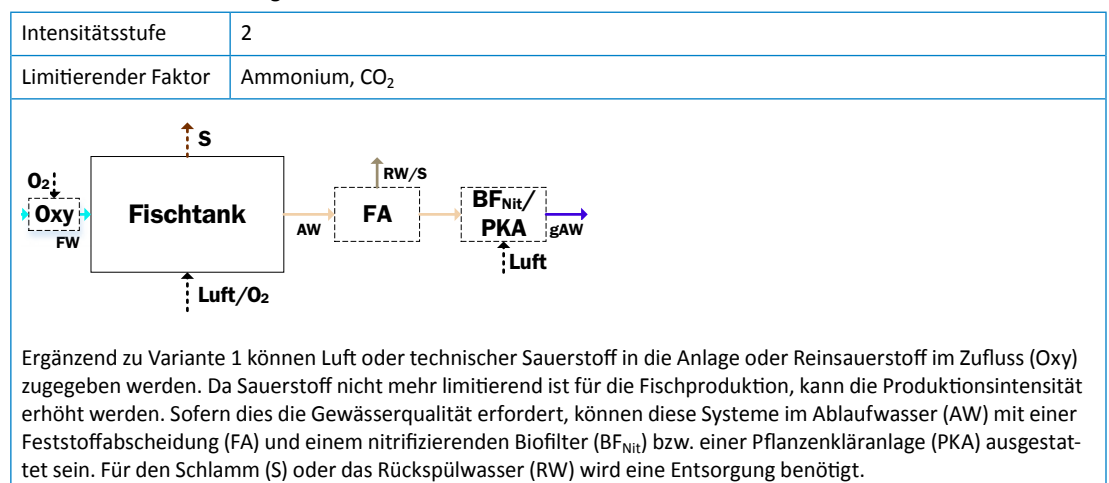
Durchlaufanlagen

Das wichtigste Erkennungsmerkmal einer Durchlaufanlage ist, dass kontinuierlich Frischwasser (FW) zugeführt und mehrfach täglich ausgetauscht wird und grundsätzlich keine Kreislauf Flüsse bestehen, welche das Wasser zur Wiederverwendung aufbereiten (Ausnahme Variante 2.2 mit Sauerstoffanreicherung). Ab einer gewissen Intensitätsstufe und Wasserbelastung muss das Ablaufwasser gereinigt werden, bevor es in den Vorfluter eingeleitet werden kann. Die nachfolgenden Anlagentypen zeigen einen Ausschnitt aus der Vielfalt von Anlagenkonfigurationen, welche für Durchlaufanlagen möglich sind.

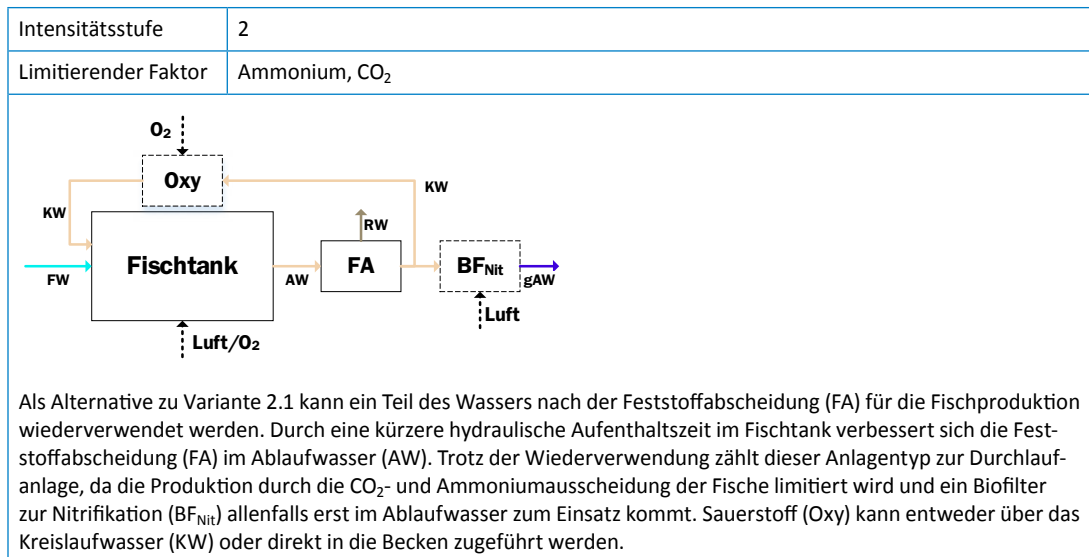
Variante 1: ohne technische Hilfsmittel



Variante 2.1: Durchlaufanlage mit Sauerstoffzufuhr



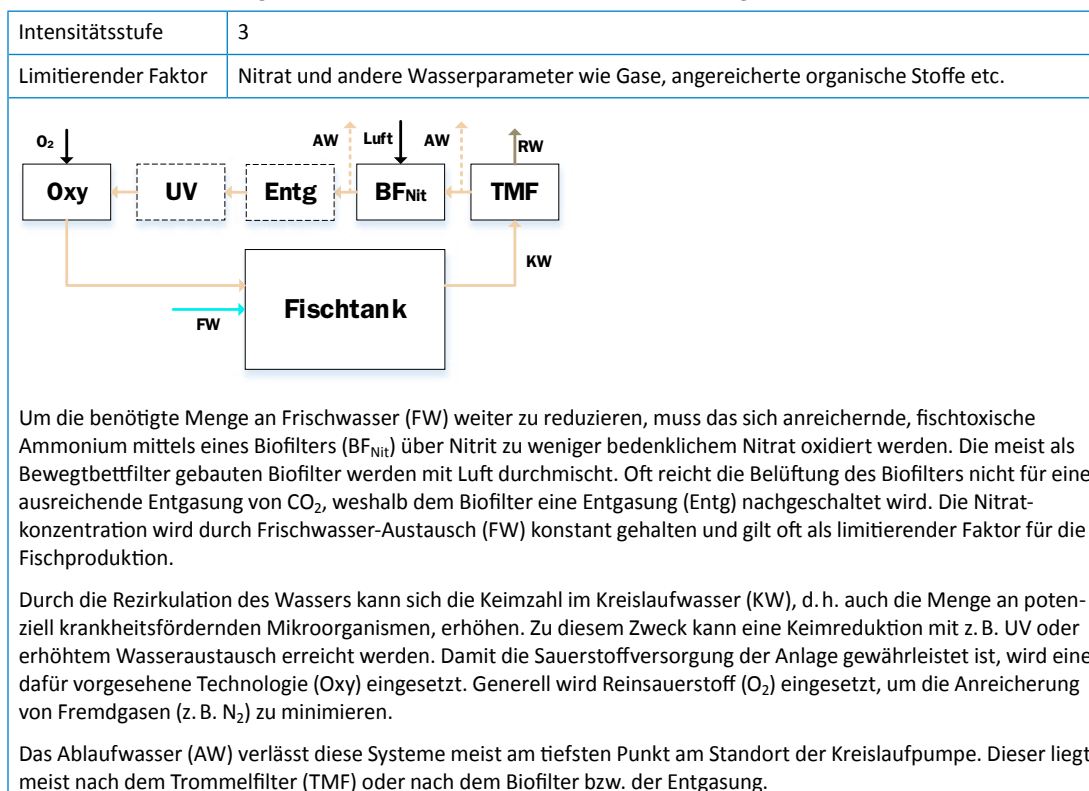
Variante 2.2: Durchlaufanlage mit Sauerstoffzufuhr und Trommelfilter mit Rückführung



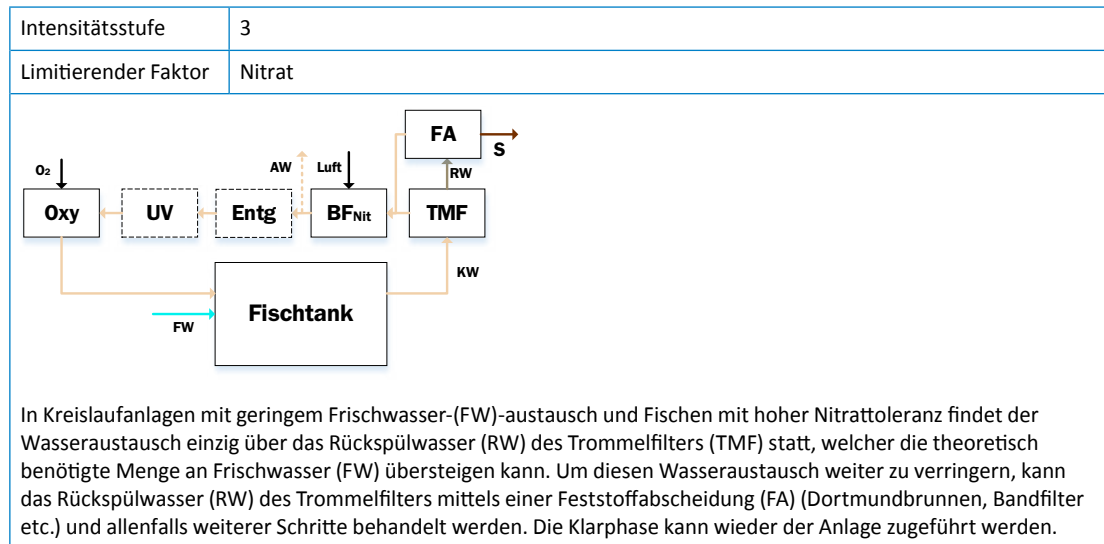
Kreislaufanlagen

Das wichtigste Erkennungsmerkmal einer Kreislaufanlage ist eine im Kreislauf integrierte biologische Reinigung (Biofilter), durch welche der limitierende Faktor Ammonium (Variante 2.1 und 2.2) beseitigt wird und der Wasserverbrauch pro kg Produktion drastisch gesenkt werden kann. Um ausreichend Durchfluss durch die Fischbecken zu ermöglichen, wird das Wasser nach der biologischen Behandlung mit Sauerstoff angereichert und den Fischbecken wieder zugeführt (rezirkuliert). Die nachfolgenden Anlagentypen zeigen einen Ausschnitt aus der Vielfalt von Anlagenkonfigurationen, welche für Kreislaufanlagen möglich sind. Die zunehmende Reduktion des Wasseraustauschs kann in Kreislaufanlagen auch zu einer Limitierung durch die Temperatur führen, da der Wärmeaustag der Anlagen nicht mehr gewährleistet ist. Die Position der Kreislaufpumpen kann je nach Bauweise an unterschiedlichen Orten im System sein, jedoch immer nach der Feststoffabscheidung und zusammen mit einem Pumpensumpf.

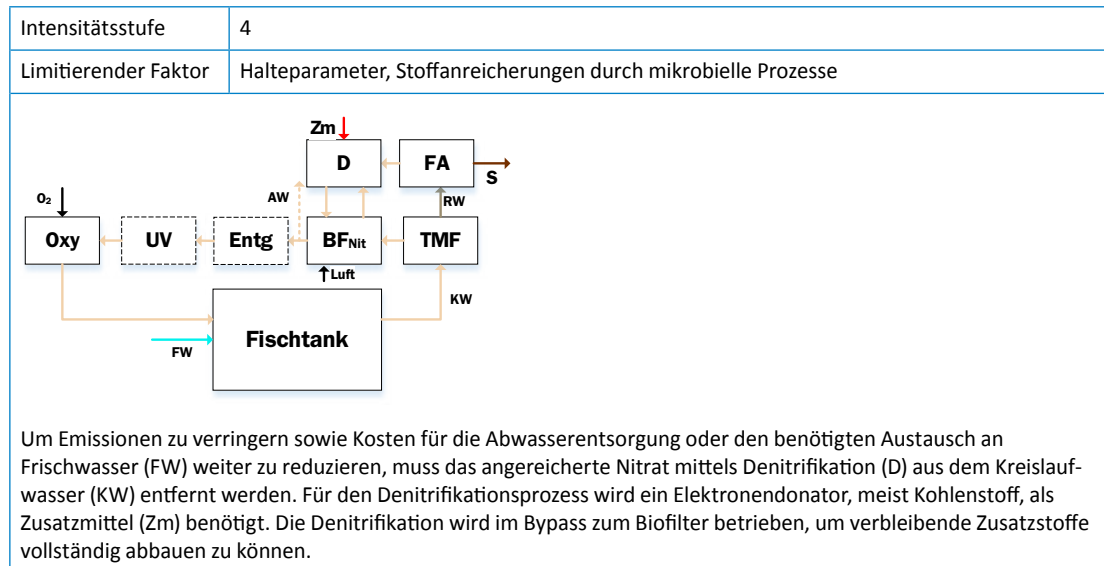
Variante 3.1: Kreislaufanlage mit Trommelfilter, Biofilter und Sauerstoffeintrag



Variante 3.2: Kreislaufanlage mit TMF, BF, UV, Sauerstoffversorgung und Schlammindickung



Variante 4 Kreislaufanlage mit TMF, BF, UV, Sauerstoffversorgung, Schlammindickung und Denitrifikation



4.1.3 Nachgeschaltete Massnahmen zur Emissionsreduktion

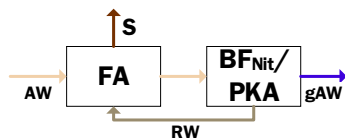
Für die Bewilligung und den Betrieb von Fischzuchtanlagen sind meist besondere Vorschriften bezüglich der Ablaufwasserqualität einzuhalten (siehe Leitfaden «Aquakulturanlagen, Teil 1»). Die Einhaltung der Qualität kann mittels der oben beschriebenen Reduktionsstrategien über das Futter und die Fütterung geschehen sowie durch die im Anschluss beschriebenen typischen emissionsreduzierenden Massnahmen im Ablaufwasser.

Variante 1: Reduktion von GUS im Ablaufwasser



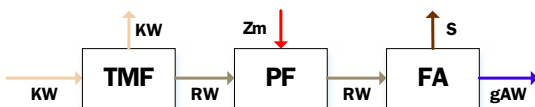
Um eine Reduktion der GUS-Emissionen zu erreichen, wird oftmals im Ablaufwasser (AW) oder Rückspülwasser (RW) der Fischzuchtanlage eine Feststoffabscheidung eingesetzt. Dabei kann das Rückspülwasser (RW) der ersten Feststoffabscheidung (FA₁) mittels einer zweiten Feststoffabscheidung (FA₂) weiter eingedickt werden, damit die Schlammentsorgungskosten reduziert werden können. Je nach Kontaktzeit des Schlammes und Wassers sind weitere Behandlungsschritte nötig.

Variante 2: Reduktion von BSB und Ammonium im Ablaufwasser



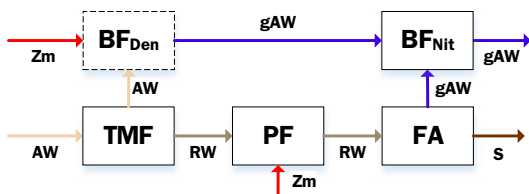
Stellen Ammonium (NH₄⁺) und DOC ein Belastungsproblem im Ablaufwasser (AW) dar, kann dieses mit einem nachgeschalteten Biofilter (BF) nach der Feststoffabscheidung (FA) behandelt werden. Rückspülbare Festbettfilter haben sich hier als zweckmässig erwiesen, da sie neben der biologischen Reinigung auch feinpartikuläre Feststoffe zurückhalten, und die Sauerstoffkonzentration im Ablaufwasser für die Mikroorganismen ausreichend hoch ist. Pflanzenkläranlagen sind eine Alternative, brauchen aber entsprechende Pflege und ausreichend Platz. Die Nährstoffassimilation durch die Pflanzen ist vernachlässigbar klein.

Variante 3.1: Reduktion der Phosphor- und GUS-Konzentration im Rückspülwasser



Um eine Reduktion der Phosphatmissionen zu erreichen kann das Rückspülwasser (RW) des Trommelfilters (TMF) mittels einer Flockung und Phosphatfällung (PF) behandelt werden. Dies verbessert die Feststoffabscheidung (FA). Gelegentlich wird auch Rückspülwasser zusammen mit Ablaufwasser so behandelt. Im Anschluss der Feststoffabscheidung kann aufgrund von Mineralisierung eine Biofiltration nötig sein (siehe Variante 3.2).

Variante 3.2: Reduktion der Phosphor-, GUS- und Nitratkonzentration im Ablaufwasser



Zusätzlich zur Variante 3.1 kann bei sehr grossen/intensiven Produktionsanlagen eine zusätzliche Reduktion der Stickstoffemissionen im Ablaufwasser (AW) durch eine dem Trommelfilter (TMF) nachgeschaltete Denitrifikationsstufe erreicht werden. Bei Einsatz einer Denitrifikation soll dieser ein belüfteter Biofilter zur Nitrifikation (BF_{Nit}) nachgeschaltet werden. Diesem Biofilter wird auch das gereinigte Abwasser aus der Phosphorfällung zugeleitet, dem in der Feststoffabtrennung (FA) zwar der gefällte Phosphor zusammen mit dem Schlamm entzogen wurde, das aber immer noch erhöhte Werte von Ammonium (NH₄⁺), Nitrit (NO₂⁻) und DOC aufweisen kann.

4.2 Mechanische Feststoffentfernung und Schlamm entwässerung

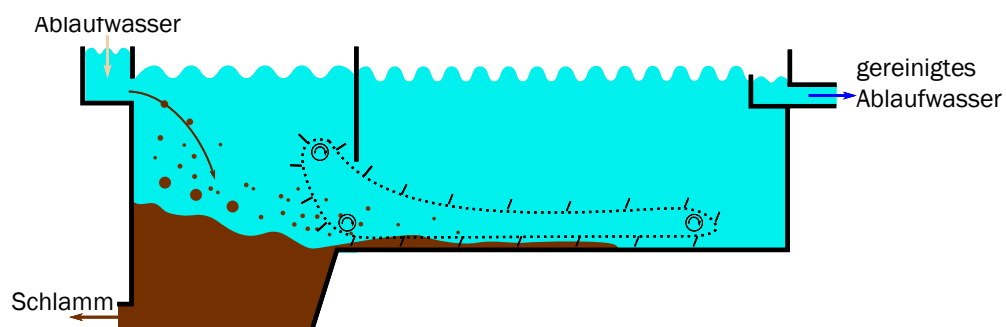
Die folgenden Technologien werden in Aquakulturanlagen zur mechanischen Feststoffentfernung und zur Schlamm entwässerung eingesetzt. Bei denjenigen Technologien, die Sedimentation als Trennprinzip nutzen (Sedimentationsbecken, Dortmundbrunnen, Lamellenklärer) stellt die Beschaffenheit des Kots eine wichtige Eigenschaft dar, die massgeblich durch die Formulierung des Futtermittels und einem schnellen und schonenden Transport der Feststoffe vom Fischbecken zur Feststoffentfernung beeinflusst wird.

4.2.1 Sedimentationsbecken

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Reinigung Kreislaufwasser	Lowtech-Kreislaufanlagen Lowtech-Aquaponikanlagen	Schlamm KLW SED KLW ohne sedimentierbare Stoffe
Reinigung Abwasser	Durchlaufanlagen	Schlamm AW SED AW ohne sedimentierbare Stoffe

Funktionsprinzip

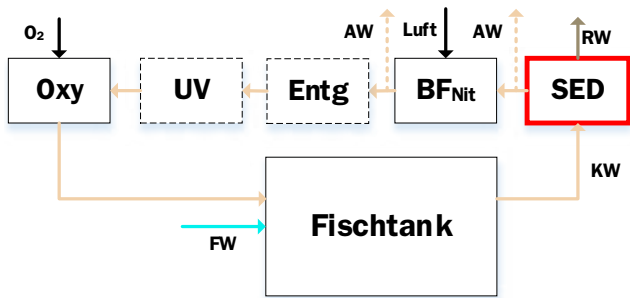
Feststoffe werden über Sedimentation abgeschieden. Sie setzen sich im Sedimentationsbecken ab und können manuell oder automatisch über einen Mechanismus vom Boden in die Absetzgrube geschoben und dort abgetrennt werden. Sedimentationsbecken (SED) können im Zulauf auch Fällmittel für Phosphor zugegeben werden, damit sich gefällter Phosphor zusammen mit dem Schlamm absetzt. Turbulenzen im Zulauf oder Kurzschlussströmungen verhindern ein gutes Absetzen. Deshalb wird das Wasser über Blenden strömungsberuhigt und der Überlauf des Sedimentationsbeckens wird über die ganze Breite des Beckens installiert.



© ZHAW

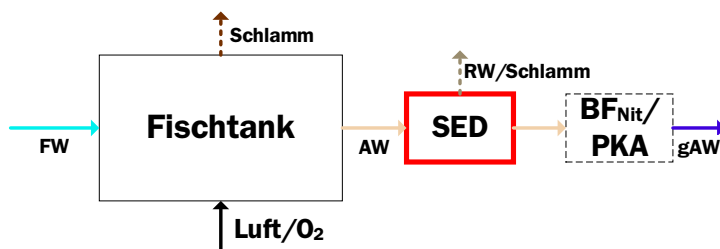
Einsatz in der Aquakultur

Innerhalb der Aquakulturanlagen kommen Sedimentationsbecken (SED) nur in Lowtech-Kreislaufanlagen zum Einsatz. In einfachen Aquaponikanlagen sind Sedimentationsbecken (SED) stark verbreitet, da die im Schlamm stattfindende Mineralisierung und Freisetzung von Nährstoffen in Aquaponikanlagen kein Nachteil darstellt. In Hightech-Kreislaufanlagen sind Sedimentationsbecken (SED) sehr selten, werden aber manchmal als Vorbehandlungsschritt vor einem Trommelfilter eingesetzt.



Einsatz in der Abwasserreinigung

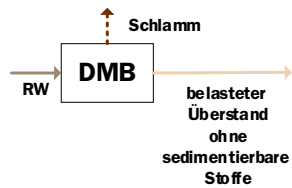
Durchlaufanlagen nutzen oft Sedimentationsbecken (SED) an Standorten, wo ausreichend Platz und wenig elektrische Energie verfügbar ist. An Standorten mit hohen Flächenkosten sind flächeneffizientere Technologien wie Trommelfilter stärker verbreitet.



- Flächenbelastung: $1.5 \text{ bis } 6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.
- Turbulenzen im Sedimentationsbecken verringern die Feststoffabscheidungseffizienz.
- Abgesetzter Schlamm ist kontinuierlich oder innert weniger Stunden zu entfernen, da ungewollte Denitrifikation zu Schwimmschlamm führen kann.
- In quer durchflossenen Sedimentationsbecken sind Tiefen $>2 \text{ m}$ zu vermeiden.

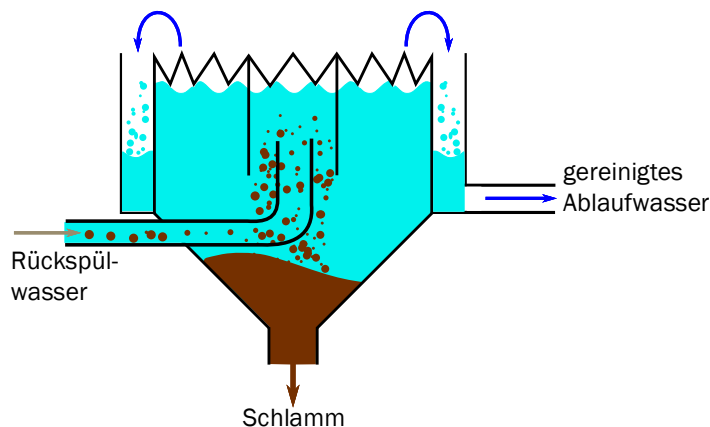
Gut zu wissen

4.2.2 Dortmundbrunnen

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Eindickung Rückspülwasser Trommelfilter	Durchlaufanlagen und Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

In einem Dortmundbrunnen (DMB) wird das zu reinigende Wasser (z. B. Trommelfilterrückspülwasser mit einer TS-Konzentration von ca. 0.1%) in den zentral angeordneten Zylinder geleitet und strömt in diesem möglichst turbulenzfrei nach unten. In der äusseren Kammer steigt das Wasser nach oben und wird knapp unterhalb der Wasseroberfläche abgezogen. Partikel die schneller sinken als das Wasser aufsteigt können im Absetzkonus sedimentieren. Der Konus sollte so steil wie möglich sein, um den Schlamm im unteren Bereich des Konus durch das Gewicht des darüber liegenden Schlammes zu entwässern. Eine regelmässige Entfernung¹¹ des Schlammes reduziert die Mineralisierung von organischem Material und die Bildung von Schwimmschlamm. Je nach Betriebsweise können damit TS-Konzentrationen von 1 bis 10% erreicht werden. In den meisten Fällen liegen die TS-Konzentrationen durch mangelhafte Schlammwindung bei 1 bis 3%. Bei gutem Betrieb können TS Konzentrationen von 10% und mehr erreicht werden.



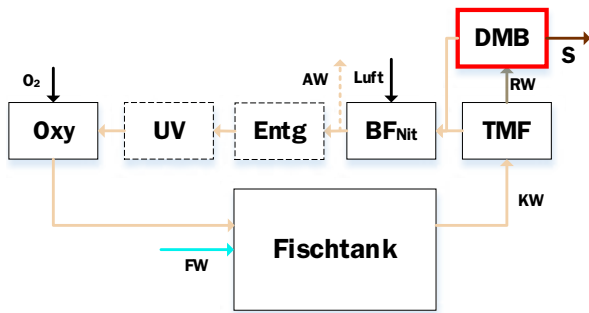
© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Der häufigste Einsatzbereich von Dortmundbrunnen (DMB) in Aquakulturanlagen ist zur Eindickung von Schlammwässern. Dies können Trommelfilterrückspülwasser, Schlammabzüge von Sedimentationsbecken oder Reinigungswässer von Beckenreinigungen sein.

Eine weitere Anwendung von Dortmundbrunnen (DMB) in etwas anderer Form ist die Funktion als Futterfallen, indem die grösseren Partikel vom Kreislaufwasser abgetrennt werden, bevor sie den Trommelfilter erreichen. Dadurch wird verhindert, dass grosse Partikel im Trommelfilter mechanisch verkleinert werden. Weiter dienen sie, transparent gebaut, zur Kontrolle von Futterresten bei Sinkfutter.

¹¹ mehrmals täglich oder kontinuierlich



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

- Oft werden Dortmundbrunnen in Aquakulturanlagen zur Eindickung von Schlamm eingesetzt. Hierbei kommt es bei längeren Standzeiten zu einer starken Mineralisierung von Nährstoffen. Deshalb dürfen Überstände nicht ungereinigt in ein Gewässer eingeleitet werden. Schlammablass sollte kontinuierlich oder mehrmals pro Tag erfolgen, je wärmer das Wasser, desto öfter.
- Turbulenzen im Sedimentationsbecken verringern die Feststoffabscheidungseffizienz.
- Schwimmschlamm täglich entfernen durch Oberflächenabzug oder komplette Entleerung.
- Schlamm Spiegel im Konus nutzen, um über das Eigengewicht des Schlamms den darunterliegenden zu entwässern. Standzeit trotzdem kurzhalten (wenige Stunden).
- Flächenbelastung: $0.9 \text{ bis } 3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, wobei generell Werte $< 1.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ für eine effektive Abscheidung zu empfehlen sind [33, 34].

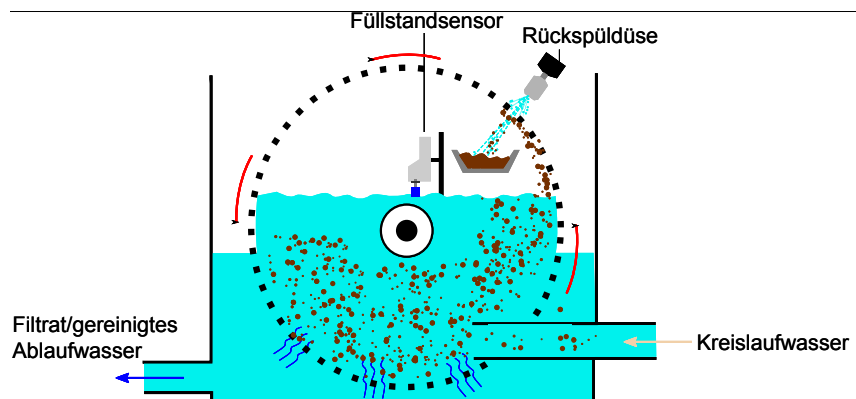
Gut zu wissen

4.2.3 Trommelfilter

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Mechanische Feststoffabscheidung	Teilkreislaufanlagen, Kreislaufanlagen	
Mechanische Feststoffabscheidung	Durchlaufanlagen	

Funktionsprinzip

Trommelfilter (TMF) bestehen aus einem zylinderförmigen geschlossenen Filtersieb, durch welches feststoffreiches Wasser geleitet wird. Die Feststoffe bleiben am Sieb hängen und werden periodisch mittels eines Rückspülvorganges vom Sieb entfernt. Durch die stetige Anreicherung der Feststoffe am Filtersieb entsteht ein Filterkuchen, welcher die Durchlässigkeit reduziert und den Gegendruck erhöht. Durch den gesteigerten Gegendruck erhöht sich das Wasserniveau im Filtersieb, bis ein Niveausensor aktiviert wird und der Rückspülvorgang initiiert wird. Beim Rückspülvorgang spritzen Wasserdüsen von aussen gegen das Sieb und der akkumulierte Filterkuchen löst sich, fällt in eine Auffangwanne und wird abgeleitet. Als Rückspülwasser wird typischerweise das vom Trommelfilter behandelte Wasser verwendet. Dadurch werden gelöste Nährstoffe wie Nitrat aus der Anlage entfernt. In Systemen, wo der Rückhalt von Salz oder Nährstoffen essenziell ist und die über eine Nitratentfernung verfügen (Denitrifikation/Aquaponik), kann die Rückspülung auch über Frischwasser erfolgen.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Der Trommelfilter wird in Aquakulturanlagen zur Entfernung von im Kreislaufwasser befindlicher partikulärer Substanz verwendet.

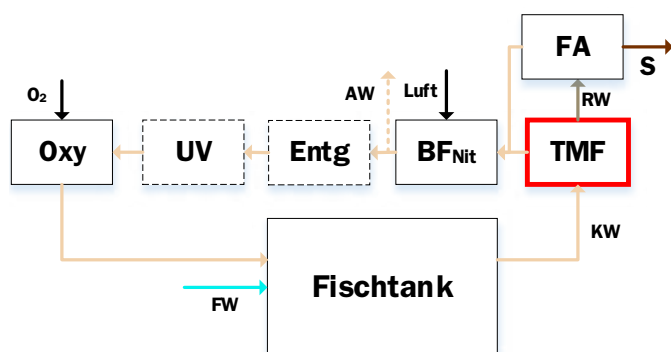
Die Durchflusskapazität des Trommelfilters wird von der Maschenweite des Filtersiebes, der Rückspülfrequenz, der TS-Konzentration, dem Druckunterschied, der Partikelgrößenverteilung der partikulären Stoffe im Wasser sowie der benetzten Filterfläche beeinflusst [35].

Die Partikelgrößen, welche vom Filtersieb entfernt werden, sind in erster Linie von der Maschenweite abhängig: kommerziell eingesetzte Maschenweiten liegen zwischen 10 und 200 µm. In Aquakulturanlagen werden jedoch typischerweise Maschenweiten zwischen 30 und 100 µm eingesetzt. Als Faustregel für eine korrekt dimensionierte Maschenweite kann angenommen werden, dass nicht öfter als alle zwei bis drei Minuten die verschmutzte Filterfläche rückgespült werden soll [6]. Der dadurch entstehende Volu-

menstrom an Rückspülwasser entspricht ungefähr 0.5 bis 2.0% des behandelten Volumens¹². Dadurch werden meist zwischen 200–400 l Rückspülwasser pro kg Fischfutter produziert.

Das Kreislaufwasser, welches vom Trommelfilter gereinigt wird, hat typischerweise eine TS-Konzentration von 2 bis 5 mg l⁻¹ (entspricht 0.002 bis 0.005 % TS-Gehalt). Das nach dem Rückspülen abfließende Rückspülwasser enthält eine TS-Konzentration von ungefähr 1000 mg l⁻¹ (entspricht 0.1 % TS-Gehalt), welcher dadurch immer noch einen hohen Wasseranteil enthält [36]. Bei Kreislaufanlagen mit geringem Wasseraustausch kann dadurch ein signifikanter Teil des Austauschwassers über den Trommelfilter verloren gehen. Zusätzlich können, bei einer direkten Einleitung in die Kläranlage, hohe Kosten für die Entsorgung entstehen. Daher kann es je nach Anwendungsfeld empfehlenswert sein, das Rückspülwasser mit einer zusätzlichen Schlammeindickungsstufe (z. B. Dortmundbrunnen oder Bandfilter) einzudicken.

Die Betriebskosten eines Trommelfilters sind grundsätzlich von der Rückspülfrequenz abhängig. Je weniger der Trommelfilter rückspülen muss, umso weniger Kosten fallen für Wartung, Strom und Abwasserentsorgung an.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Trommelfilter werden oft zur Reinigung des Abwassers von Durchlaufanlagen eingesetzt. Auch bei Kreislaufanlagen werden sie für die Endreinigung des aufbereiteten Abwassers eingesetzt.

Gut zu wissen

- Eine Maschenweite zwischen 30 und 100 µm ist sinnvoll für Aquakulturanlagen.
- Das Kreislaufwasser des Trommelfilters hat einen TS-Gehalt von 2 bis 5 mg l⁻¹ (entspricht 0.002 bis 0.005 % TS-Gehalt).
- Das Rückspülwasser (RW) des Trommelfilters enthält eine TS-Konzentration von ungefähr 1000 mg l⁻¹ (entspricht 0.1 % TS-Gehalt).
- Der Volumenstrom des Trommelfilterrückspülwassers entspricht ungefähr 0.5 bis 2.0% des behandelten Volumens.
- Bei einer korrekten Dimensionierung des Trommelfilters sollte dieser nicht öfter als alle zwei bis drei Minuten rückspülen.
- Verschmutzten Trommelsiebe durch Fett, Kalk oder Ausfällungen, müssen sie durch geeignete Mittel (Hochdruckreiniger, Basen, Säuren) regelmässig gereinigt werden, um einen übermässigen Spülwasseranfall zu vermeiden.

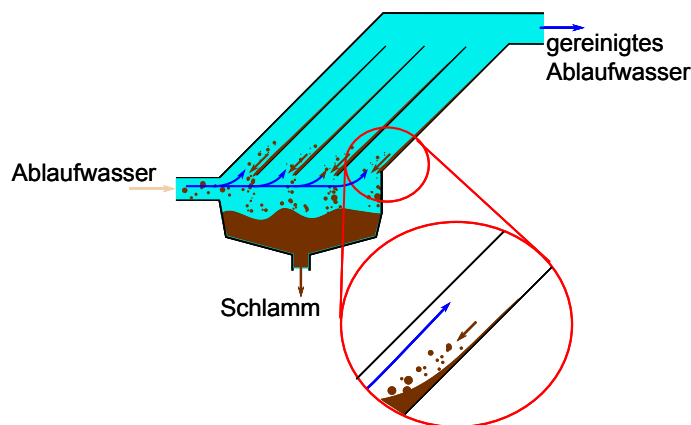
¹² Das Rückspülwasservolumen entspricht der Menge des behandelten Volumens, also des Durchflusses durch den Trommelfilter (wird oft mit Anlagenvolumen verwechselt).

4.2.4 Lamellenklärer

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Feststoffabscheidung	Lowtech-Kreislaufanlagen	
Feststoffabtrennung	Durchlaufanlagen	

Funktionsprinzip

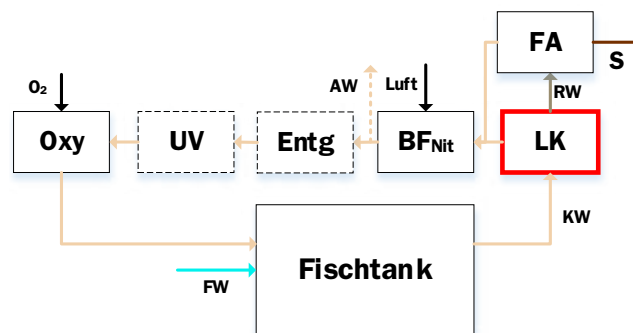
Lamellenklärer (LK) werden zur Feststoffabscheidung von grossen Volumenströmen mit geringem Feststoffgehalt eingesetzt. Das Wasser durchströmt von unten nach oben die Lamellen, wobei sich Partikel nach sehr kurzer Sedimentationsdistanz auf der Lamelle absetzen und dieser entlang nach unten rutschen. Der gereinigte Überstand wird auf der oberen Seite zum nächsten Reinigungsschritt abgeleitet. Der abgesetzte Schlamm muss regelmässig¹³ abgetrennt werden, um dessen Mineralisierung zu reduzieren.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Durch die limitierte Flächenbeschickung sind Lamellenklärer sehr platzintensiv und wurden in den letzten Jahren in Kreislaufanlagen oft durch Trommelfilter ersetzt. In Lowtech-Kreislaufanlagen und Aquaponikanlagen sind sie aber nach wie vor im Einsatz. Gerade bei Aquaponikanlagen zeigen sie gewisse Vorteile gegenüber Trommelfiltern: die durch die Schlammineralisierung frei werdenden Nährstoffe können von den Pflanzen gut verwertet werden und die zu behandelnde Schlammmenge fällt sehr gering aus.

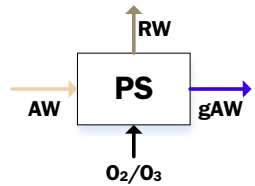


¹³ mehrmals am Tag

Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Für die Reinigung von Ablaufwasser von Durchlaufanlagen werden Lamellenklärer dort eingesetzt, wo viel Platz besteht und elektrisch betriebene Feststoffabscheidungen wie Trommelfilter nicht eingesetzt werden können. Weiter stellen sie oft eine sehr preiswerte und einfach zu betreibende Art der Feststoffabscheidung dar. Wie bei allen Arten der Sedimentation ist auch hier eine regelmässige Abtrennung des sedimentierten Schlammes wichtig für eine Reduktion der Wasserbelastung. Typische hydraulische Belastungen von Lamellenklächern in Aquakulturanlagen liegen zwischen 1.5 und $7.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ [37].

4.2.5 Proteinskimmer

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Entfernung partikulärer und gelöster organischer Stoffe (DOC)	Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

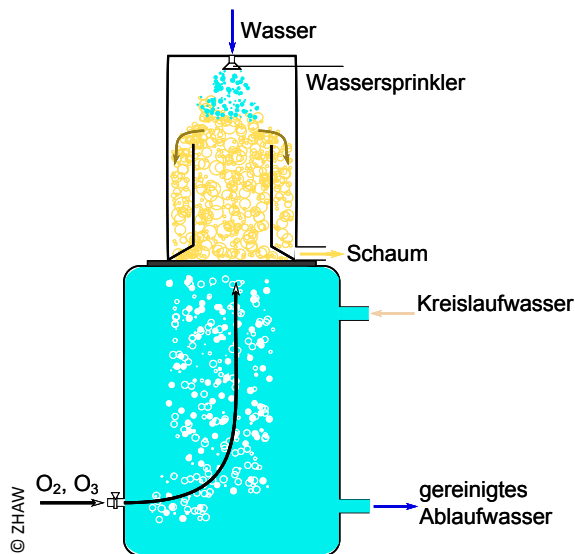
Das einfließende Kreislaufwasser wird mittels kleinster Luftblasen aufgeschäumt. Kleine partikuläre und gelöste organische Stoffe haften aufgrund ihrer Eigenschaften an den Luftblasen, bilden eine Schaumphase und können dadurch abgetrennt werden. Durch Skimming können gelöste und partikuläre Stoffe, d. h. Substanzen wie Proteine, RNA, DNA, partikuläre organische Substanzen und teilweise auch Mikroorganismen und Algen entfernt werden [38]. Zur Entfernung von einem Gramm Protein wird eine Blasenoberfläche von rund 400 m² benötigt. Deshalb sind Proteinskimmer mit kleiner Blasengröße und beim Betrieb mit Salzwasser (ermöglicht kleine Blasendurchmesser) deutlich effektiver als mit grossen Blasen.

Die Rate, mit der Proteine abgetrennt werden, ist proportional zur Menge der im Wasser enthaltenen Proteine [39]. Wenn Wasser eine hohe Konzentration an organischen Substanzen hat, werden diese schneller und einfacher abgetrennt, da sie in unmittelbarer Umgebung der Blase weniger Distanz zurücklegen müssen, um auf der Blasenoberfläche adsorbiert zu werden. Die Adsorption wird zusätzlich erhöht, wenn das Wasser gegen den Luftstrom fließt, da dann mehr organische Substanzen in kürzerer Zeit eine Blase treffen.

Das Proteinskimming kann verbessert werden, in dem der Weg, welche die Luftblasen zurücklegen und die Kontaktzeit maximiert werden. Ebenfalls werden durch eine sehr kleine Blasengröße die Aufstiegs- geschwindigkeit reduziert und die Grenzfläche vergrößert. Das Gasverweilvolumen, d. h. die Menge Gas, welche relativ zum Säulenvolumen vorhanden ist, soll 25 % nicht überschreiten, da ansonsten Schwall- strömung auftreten kann.

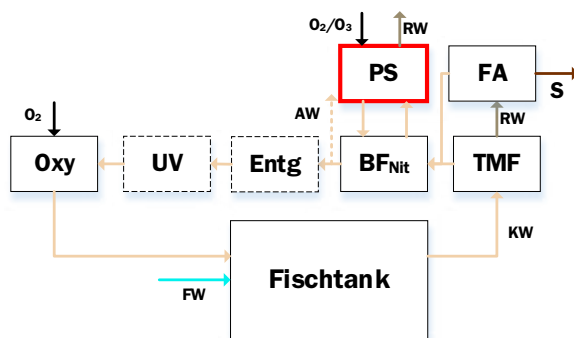
Öl und Fett im Anlagenwasser können die Leistungsfähigkeit des Proteinskimmers deutlich reduzieren. Dies liegt daran, dass sich das Öl ebenfalls an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser anreichert und dadurch die Ausrichtung der anliegenden Moleküle ändert: Fettliebende Seiten verbinden sich mit dem Öl, die Blasen werden instabil und platzen.

Oft werden Proteinskimmer zusammen mit Ozon eingesetzt [40]. Es wird jedoch vermutet, dass dadurch die Gesamtmenge an abtrennbaren organischen Substanzen abnimmt. Dies kommt daher, dass Ozon komplexe organische Substanzen in polare und besser wasserlösliche Substanzen oxidiert, welche sich dann schlechter an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft anreichern und schlechter entfernbar sind.



Einsatz in der Aquakultur

Proteinskimmer werden in Anlagen mit geringem Frischwasseraustausch eingesetzt, um die Wasserqualität im Kreislaufwasser konstant zu halten. Durch den Einsatz eines Proteinskimmers kann die Wasserqualität signifikant verbessert werden. In Durchlaufanlagen gibt es keine Einsatzbereiche für Proteinskimmer, da die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe zu tief sind.



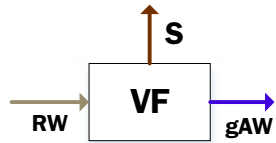
Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Proteinskimmer finden keine Anwendung in der Abwasseraufbereitung.

Gut zu wissen

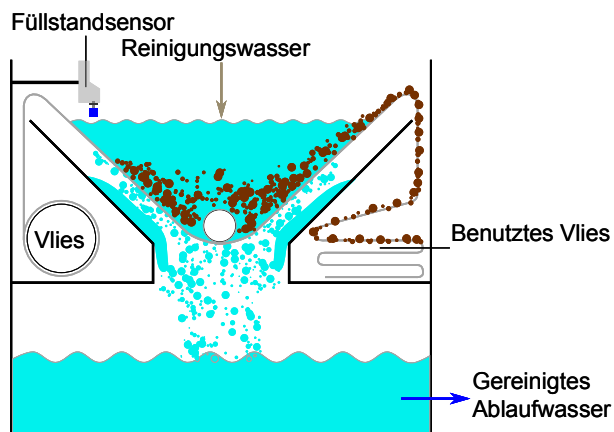
- Öl im Wasser reduziert die Effektivität des Skimmers stark.
- Das Gasverweilvolumen in der Säule sollte höchstens 25 % betragen.
- Proteinskimming wird bei höherem pH-Wert verbessert.
- Proteinskimming ist effektiv bei kleinen Blasendurchmessern und in Salzwasser.
- Pro kg Futter und Tag sind ein Luftfluss von 20 l min^{-1} und eine Querschnittsfläche von 90 cm^2 nötig [6].

4.2.6 Vliesfilter

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Feststoffabscheidung	Durchlaufanlagen (end-of-pipe), Teilkreislaufanlagen, Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

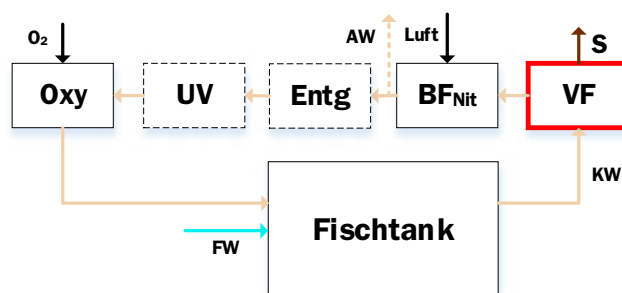
Rückspülwasser (RW) von vorherigen Schlammeindickungsstufen (meist Trommelfilter), werden auf das Vlies des Filters geführt. Das Wasser kann das Vlies passieren, während die Feststoffe im Vlies hängen bleiben. Mit fortschreitender Nutzung wird das Vlies schlechter durchlässig für das Rückspülwasser (RW) und staut sich im Filter ein. Im Filterbecken ist ein Niveausensor angebracht, welcher bei einer definierten Wasserhöhe das Vlies nachzieht, damit wieder mehr Wasser das Vlies passieren kann. In kleinen Systemen kann ein Vliesfilter (VF) auch direkt ohne Trommelfilter (TMF) zur Reinigung vom Anlagenwasser genutzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Durchlässigkeit des Vlieses bei geringer Verschmutzung schnell abnimmt. Bei zu hoher hydraulischer Belastung des Filters entsteht ein sehr hoher Vliesverbrauch.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Vliesfilter (VF) werden manchmal in kleineren Kreislaufanlagen zur Feststoffabscheidung eingesetzt. Verbreitet ist dies in der Koihaltung, wo das Teichwasser über einen Reinigungskreislauf aufbereitet wird. Durch die einmalige Nutzung des Vlies entstehen erhöhte Betriebskosten für den Vliesverbrauch, wodurch Vliesfilter in kommerziellen Anlagen kaum zu finden sind.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Vliesfilter sind in der kommerziellen Aquakultur in der Ablaufwasserreinigung kaum anzutreffen.

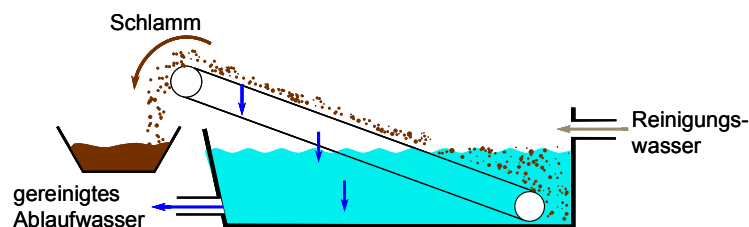
- Der Vliesverbrauch pro kg Futter ist stark davon abhängig, wie hoch die hydraulische Belastung des Filters ist.
- Die Kosten für den Vliesverbrauch können diejenigen für das Futter schnell übersteigen.

4.2.7 Bandfilter

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Schlamm eindickung, selten Feststoffabscheidung	Durchlaufanlagen (end-of-pipe), Teilkreislaufanlagen, Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

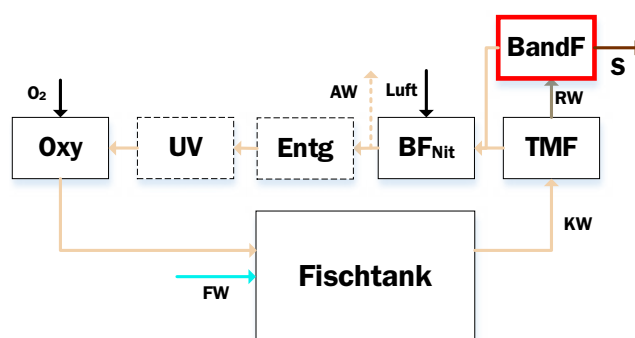
Rückspülwasser (RW) von vorherigen Schlamm eindickungsstufen (meist Trommelfilter), werden auf das Filterband geführt. Das Wasser kann das Band passieren, während die Feststoffe zurückgehalten werden. Mit einem Aufbau der Feststoffschicht wird das Band schlechter durchlässig für das Rückspülwasser (RW) und staut sich im Filter ein. Im Filterbecken ist ein Niveausensor angebracht, welcher bei einer definierten Wasserhöhe das Band dreht, um unverschmutztes Band nachzufördern. Dadurch wird die Durchlässigkeit des Filters gewährleistet. Das Filterband tropft oberhalb der Wasseroberfläche ab, und verwirft den Schlamm, indem dieser über eine weiche Plastikkante abgekratzt wird. Das Filterband wird meist über einen zusätzlichen Spülmechanismus von Feststoffen befreit und steht für die weitere Nutzung wieder zur Verfügung.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Bandfilter werden sehr vereinzelt innerhalb von Aquakulturen an Stelle eines Trommelfilters oder in der Reinigung des Frischwassers (Blätter etc.) in Durchlaufanlagen verwendet. Verbreiteter ist jedoch die Anwendung in der Ablaufwasserreinigung.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Bandfilter werden in Aquakulturanlagen zur Schlamm entwässerung genutzt. Meist werden sie zusammen mit einer vorgeschalteten Koagulation/Flokkulation eingesetzt, da dadurch die abgetrennte Menge an partikulären Stoffen signifikant verbessert werden kann. Durch die Zugabe eines Phosphor-fällenden Koagulationsmittels kann auch Phosphor in diesem Wasser gefällt, und mit dem Schlamm entnommen werden.

Abhängig von der Rückspülmenge entsteht ein Schlamm mit einem TS-Gehalt zwischen 5 und 12 % [25, 41, 42]. Wird der Bandfilter zu stark hydraulisch belastet, führt dies zu einer verringerten Abtropfzeit für den Schlamm, wodurch dieser sehr dünnflüssig wird. Die Entsorgungskosten können dadurch massiv steigen.

- TS-Gehalt mit vorhergehender Koagulation/Flokkulation bis zu 12 %.
- TS-Gehalt ohne vorhergehende Koagulation/Flokkulation bis zu 7 %.
- Hydraulische Beschickungsrate limitiert auf ungefähr 80 l min^{-1} pro Meter Bandbreite [42].

Gut zu wissen

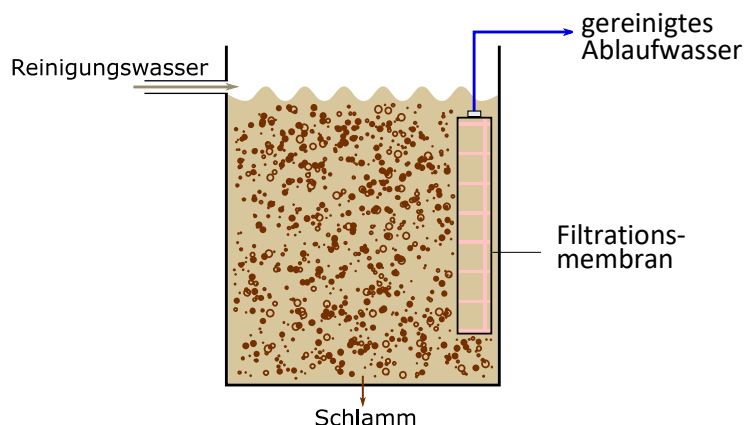
4.2.8 Membraneindickung (Membranfiltration)

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Wasseraufbereitung Feststoffabscheidung	Kreislaufanlage	
Abwasseraufbereitung Feststoffabscheidung	Durchlaufanlage	

Funktionsprinzip

Membranfiltration wird zur Trennung von feststoffhaltigen Wasserströmen verwendet (Membraneindickung [ME]). Hierbei wird je nach Funktionsweise über einen Überdruck oder einen Unterdruck das Filtrat durch die Öffnungen in der Membran transportiert und die Stoffe, welche grösser sind als die Porengrösse der Membran, verbleiben im Retentat. Filtermembranen existieren in unterschiedlichen Porengrössen und trennen so unterschiedliche Stoffe ab. Durch eine Anströmung rechtwinklig zur Filtermembran wird versucht, die Ausbildung eines Filterkuchens zu vermeiden. Man unterscheidet innerhalb der Membranfiltration zwischen Mikro-, Ultra- und Nanofiltration. Mikrofiltration scheidet Partikel $>0.1\ \mu\text{m}$ ab, wodurch im Filtrat noch gelöste Salze, gelöstes organisches Material, Viren und kleine kolloidale Partikel vorhanden sind. Bakterien, Algen und Protozoen können abgeschieden werden. Ultrafiltration filtriert im Bereich von $0.01\ \mu\text{m}$, womit zusätzlich auch Viren und kleine kolloide Partikel abgeschieden werden können. Das Filtrat der Ultrafiltration ist keimfrei, gelöste Stoffe sind nach wie vor vorhanden. Nanofiltration schlussendlich kann auch gelöstes organisches Material und divalente Kationen entfernen. Monovalente Ionen wie Na^+ und Cl^- verbleiben im Wasser.

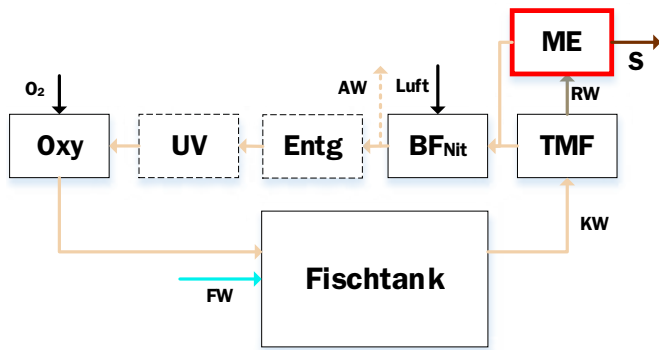
Der Energieverbrauch pro m^3 gefiltertem Wasser steigt mit sinkender Porengrösse und steigender Stoffkonzentration im Retentat. Ein Einsatz von Membranfiltrationsanlagen findet dann Anwendung, falls die Erhöhung der Retentatkonzentration (z. B. Schlamm) wirtschaftliche Vorteile bringt oder die Filtratqualität wichtig ist. Meistens steht die Konzentrierung des Retentats im Vordergrund. Deshalb wird aufgrund der geringeren Ansprüche an das Filtrat und des hohen Energieverbrauchs vorwiegend Mikrofiltration in Aquakulturanlagen eingesetzt.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Membranfiltration (meist als Mikrofiltration) wird in der Rückhaltung von Belebtschlamm in der Denitrifikation und zur Konzentrierung von Rückspülwasser und Schlamm eingesetzt. Die Einsatzorte kennzeichnen sich durch eher geringe Volumenströme (Seitenkreisläufe). Im Hauptkreislauf von Kreislaufanlagen sowie im Hauptstrom von Durchlaufanlagen finden Membranfiltrationen keine Anwendung, da die Energiekosten zur Filtration zu hoch sind.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Müssen tiefe Abwasserrichtwerte erreicht werden, können Filtermembranen zur Abwassereinigung eingesetzt werden. Diese beschränkt sich oft auf Hightech-Kreislaufanlagen mit entsprechender Grösse. Der Betrieb von Membranfiltrationsanlagen erfordert einen Unterhalt durch ausgebildetes Personal, um langfristig eine hohe Effizienz zu gewährleisten. Im Vergleich zu anderen Feststoffabscheidungen ist der Betrieb technisch meist etwas anspruchsvoller, erreicht aber eine komplette Feststoffabtrennung.

Gut zu wissen

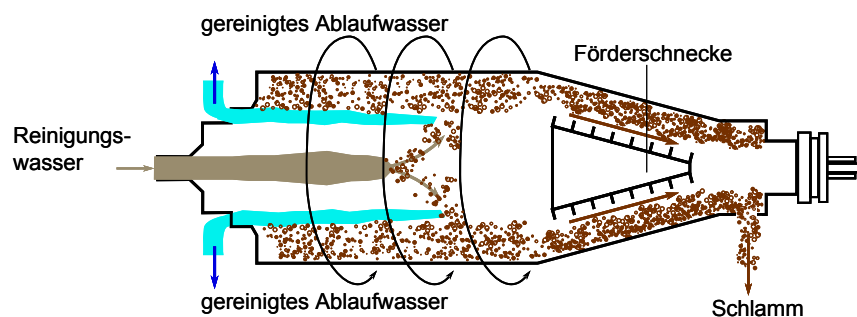
- Der Energiebedarf kann je nach Filtrationsart und Medium sehr stark schwanken.
- Mit Ultrafiltration ist eine vollständige Entfernung von Viren und Bakterien möglich.
- Mit Mikro- und Ultrafiltration können keine gelösten organischen Stoffe abgetrennt werden. Wird solches Wasser in der Anlage zirkuliert, reichern sich gelöste Stoffe (Geschmacksstoffe, Farbstoffe etc.) an, und müssen über andere Verfahren (z. B. Ozonierung) entfernt werden.
- Salze verbleiben im Filtrat. Dies kann bei Salzwasseranlagen für die Reduktion des Salzbedarfs genutzt werden.

4.2.9 Zentrifugeneindickung

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Schlammeeindickung	Durchlaufanlagen und Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

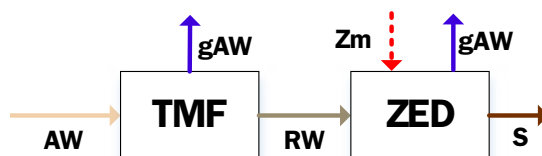
Die Eindickung von Schlammwässern mit geringem GUS-Gehalt kann bei grossen Anlagen über Zentrifugen (ZED) erreicht werden. Diese werden meistens in einem Bypass an einen Schlammtank angeschlossen und in Intervallen betrieben. Der Schlammstrom gelangt in die rotierende Zentrifuge. Partikel mit höherer Dichte als Wasser (alle absetzbaren Partikel) werden durch die Rotation der Zentrifuge nach aussen gedrückt und ein eingedickter Schlamm entsteht. Das Wasser wird im Innern der Zentrifuge abgeleitet. Im Zulauf der Zentrifuge kann zur Verbesserung der Abtrennung auch ein Flockungsmittel zugeführt werden.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur und der Ablaufwasserreinigung

Zentrifugen (ZED) eignen sich zur Eindickung von Trommelfilterrückspülwasser und Schlammströmen (S). Durch die hohen Investitionskosten stellen sie nur für grosse Anlagen eine Option dar. Die Anschaffung rechtfertigt sich oft durch die geringeren Entsorgungskosten für den resultierenden Schlamm.



Gut zu wissen

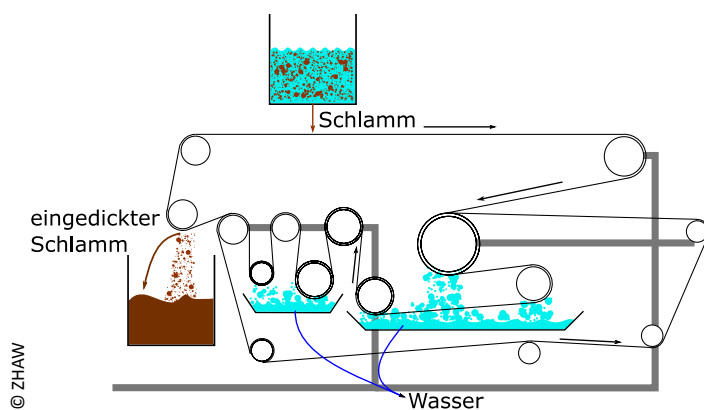
- Es können Schlammkonzentrationen von über 20% GUS erreicht werden. Ab diesem Feststoffgehalt kann der Schlamm oft nicht mehr gepumpt werden.
- Lohnt sich nur, wenn Schlamm mit hohem GUS auch entsorgt werden kann. Hofdünger-Biogasanlagen sind oft auf Flüssigzufuhr von Schlamm ausgelegt.

4.2.10 Filterpresse

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Schlammmentwässerung	Durchlaufanlagen, Kreislaufanlagen	

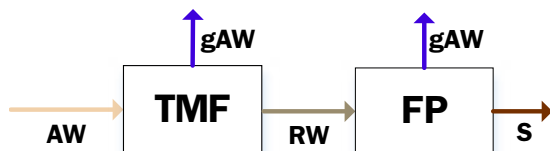
Funktionsprinzip

In Filterpressen wird Schlamm zwischen zwei Filterbändern eingeklemmt und über mehrere Rollbänder geleitet. Dadurch wird der Schlamm ausgepresst. Das Presswasser wird gesammelt und muss weiter aufbereitet oder kann, bei geringen Volumenströmen, der kommunalen Abwasserreinigungsanlage zugeführt werden. Dieses Presswasser enthält oft gelöstes organisches Material, Ammonium und Phosphor, ist jedoch weitgehend feststofffrei. Der eingedickte Schlamm kann GUS-Konzentrationen von bis zu 40 % erreichen [43]. Bei der Planung der Entsorgung ist zu beachten, dass viele Hofdünger-Biogasanlagen auf flüssiges Substrat eingerichtet sind.



Einsatz in der Aquakultur und der Ablaufwasserreinigung

Für die Eindickung von Trommelfiltrerrückspülwasser oder Schlamm aus der Sedimentation.



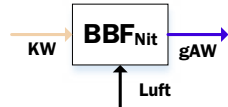
- Die TS-Konzentration von eingedicktem Schlamm (S) kann 40% und mehr betragen.

Gut zu wissen

4.3 Biologische und chemische Reinigungsschritte

Die folgenden Technologien werden in Aquakulturanlagen zur biologischen und chemischen Wasseraufbereitung eingesetzt.

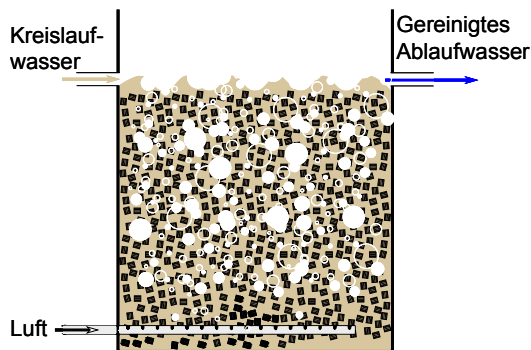
4.3.1 Bewegtbettfilter zur Nitrifikation

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Biologische Nitrifikation	Halbkreislauf, Kreislaufanlagen, Ablaufwasserreinigung	

Funktionsprinzip

Der Bewegtbettfilter (BBF) ist ein mit Füllkörpern¹⁴ gefüllter biologischer Filter. Die Füllkörper dienen als Wachstumsoberfläche für Bakterien. In Bewegtbettfiltern zur Nitrifikation werden die Füllkörper mittels Luftzufuhr konstant in Bewegung gehalten. Die Dicke des Bakterienfilms auf den Füllkörpern (und damit das Schlammalter) wird durch kontinuierlichen Abrieb konstant gehalten. Ein Rückhaltesieb verhindert den Austrag von Füllkörpern aus dem Reaktor.

Die Reinigungsleistung, ausgedrückt als die Menge abgebauten Stoffe pro Volumen Reaktor und Zeiteinheit, ist stark davon abhängig, dass die beteiligten Mikroorganismen konstante und ideale Bedingungen haben. Für die Nitrifikation sind dies eine geringe Belastung mit organischem Material, ein pH zwischen 6.8 und 7.5, eine ausreichende Ammoniumkonzentration und eine Nitratstickstoffkonzentration unter 80 mg l^{-1} . Entspricht beispielsweise die Ammoniumkonzentration im Auslauf des Biofilters nur 10% der Zulaufkonzentration, so weist dies auf eine zu lange hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktor hin (siehe Kapitel Nitrifikation).



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Der Bewegtbettfilter (BBF) wird in Aquakulturanlagen zur Nitrifikation verwendet. Die Vorteile sind ein geringer Druckverlust, eine tiefe Anfälligkeit für Verstopfung und kein erforderliches Rückspülen. Im Gegensatz zu Belebtschlammreaktoren wird keine zusätzliche Schlammrückführung benötigt, dadurch integriert sich der Prozess platzsparend in eine Anlage. Auf dem Markt sind verschiedenste Füllkörper (verschiedene Grössen, Formen etc.) erhältlich: Grundsätzlich gilt, dass kleinere Füllkörper mehr Oberfläche bieten, jedoch mehr Energie für die Umwälzung benötigt wird [44], da zwischen den Füllkörpern mehr Reibung entsteht. Weitere Strategien zur energieeffizienten Durchmischung von Bewegtbettfiltern ist der Einsatz von Lufthebern, Rührwerken oder der Zuflussströmung.

¹⁴ English: «Biocarrier», oder umgangssprachlich «Biochips».

4.3.2 Bewegtbettfilter zur Denitrifikation

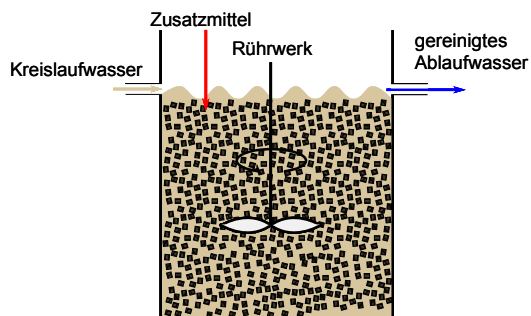
Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Denitrifikation	Kreislaufanlagen, Ablaufwasserreinigung	

Funktionsprinzip

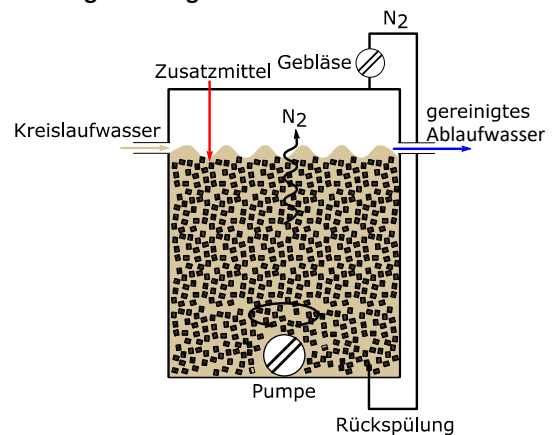
In Bewegtbettfiltern zur Denitrifikation bieten Füllkörper eine Aufwuchsfläche für Bakterien. Die Durchmischung erfolgt mit einem Rührwerk, Inertgas (N_2) oder durch Bewegung des Wassers mit einer Pumpe.

Für die Denitrifikation ist es wichtig, dass die Restkonzentration von Nitrat im Auslauf tief und die Dosierung von Kohlenstoff so hoch ist, dass Kohlenstoff im Reaktor messbar ist. So wird sichergestellt, dass die Mikroorganismen den Denitrifikationsschritt vollständig durchführen und keine alternativen Reaktionen wie beispielsweise die Bildung von Schwefelwasserstoff stattfinden.

Bewegtbettfilter zur Denitrifikation



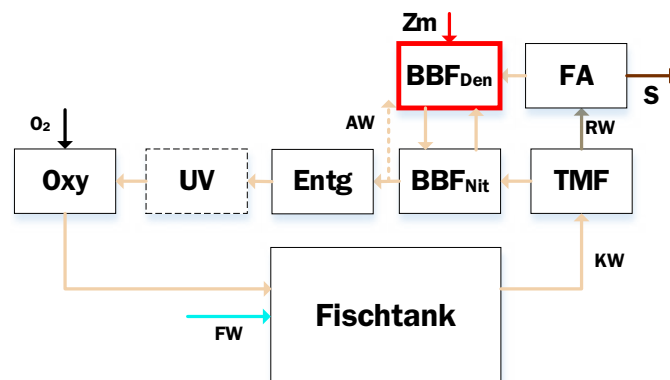
Inertgas Bewegtbettfilter zur Denitrifikation



© ZHAW

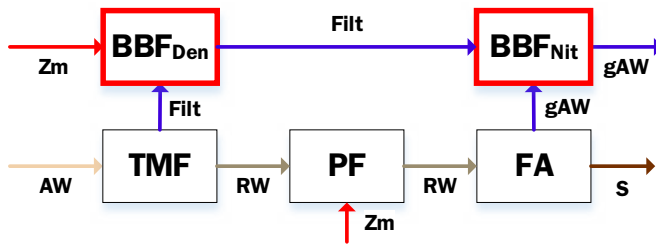
Einsatz in der Aquakultur

Der Bewegtbettfilter (BBF) zur Denitrifikation wird in Aquakulturanlagen zum Nitratabbau und damit zur Reduktion der Wasseraustauschmenge pro kg Fischfutter verwendet. Im Gegensatz zu Belebtschlammreaktoren wird keine zusätzliche Schlammrückführung benötigt, wodurch sich der Prozess platzsparend in eine Anlage integriert. Jedoch ist eine separate Kohlenstoffquelle nötig (vergl. Kapitel Denitrifikation). Bei der Denitrifikation von Kreislaufwasser ist zu beachten, dass dieses zurück in den Nitrifikationsfilter (d.h. eine belüftete Stufe) geführt wird, da bei unvollständiger Denitrifikation fischtoxisches Nitrit und Reste aus der Denitrifikationsstufe in die Anlage gelangen können.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Der Bewegtbettfilter (BBF) kann zur Denitrifikation des Ablaufwassers (AW) oder des Filtrates der Schlammendeckung verwendet werden. Auch hier ist wie beim Einsatz innerhalb der Aquakulturanlage ein belüfteter Biofilter der Denitrifikationsstufe nachzuschalten.



- Der Betrieb von Denitrifikationsreaktoren bedarf einem genauen Monitoring der Nitrat- und Kohlenstoffwerte, um einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten.
- Die hydraulische Aufenthaltszeit in Denitrifikationsreaktoren beträgt oft weniger als 2 h.
- Der Abbau von Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) in Bewegtbettfiltern zur Denitrifikation liegt zwischen 250 und $1250 \text{ g m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, was einer Futtermenge von 6 bis 30 kg entspricht.

Gut zu wissen

4.3.3 Belebtschlammfilter zur Denitrifikation

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Denitrifikation	Halbkreislauf-, Kreislaufanlagen	

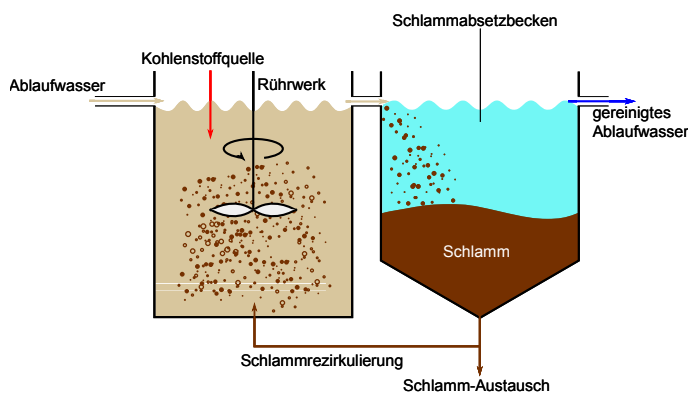
Funktionsprinzip

Der Belebtschlammfilter (BSF) ist ein biologischer Filter (BF), in welchem die Mikroorganismen in Bioflocken frei in Suspension gehalten werden. Der Belebtschlamm bezeichnet einen Schlamm, der reich an Mikroorganismen (Denitrifizierer) ist und für die Reinigung des Abwassers zuständig ist. Ein Belebtschlammfilter besteht aus drei Komponenten:

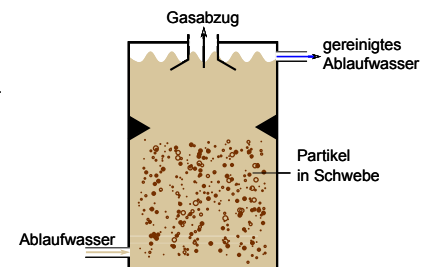
- einem Reaktorbecken in welchem die Mikroorganismen in Suspension gehalten werden (Rührwerk),
- einer anschliessenden Vorrichtung (meist ein Sedimentationsbecken) für die Feststoffabscheidung, also dem Belebtschlamm, und
- einem System zur Rückführung des Belebtschlammes ins Reaktorbecken.

Im Belebtschlammfilter werden einflussendes Kreislaufwasser (KW), Rückspülwasser (RW) oder Ablaufwasser (AW) und eine Kohlenstoffquelle als Zusatzmittel (Zm) durch den suspendierten Belebtschlamm behandelt. Die beiden Massenströme fliessen gemischt in einen Absetzkonus, wo der Belebtschlamm abgesetzt wird und das von Nitrat gereinigte Kreislaufwasser (KW) als gereinigtes Abwasser (gAW) den Reaktor verlässt. Der Belebtschlamm wird kontinuierlich in das Reaktorbecken rückgeführt. Ein Teil des Belebtschlammes wird zur Kontrolle des Schlammalters aus dem Reaktor entfernt und entsorgt.

Belebtschlammfilter



Upflow Anaerobic Sludge Blanket



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Belebtschlammfilter werden im Bypass von Nitrifikationsreaktoren zur Denitrifikation verwendet. Für die Denitrifikation sind hohe Aufenthaltszeiten im Reaktor nötig und aufgrund der hohen Nitratkonzentrationen auch möglich, wodurch die Grösse des Sedimentationsbeckens geringgehalten wird. Alternativ zu Reaktoren mit Belebtschlammfilter und Sedimentationsbecken sind auch sogenannte «upflow blanket»-Reaktoren üblich, die aus einem einzelnen Reaktor bestehen, der von unten nach oben durchströmt wird.

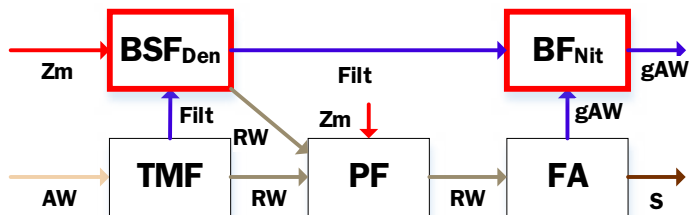
Durch die hohe hydraulische Umwälzung würde die Schlammabsetzung für die Nitrifikation im Kreislaufsystem ein sehr grosses Sedimentationsbecken benötigen, weshalb das Belebtschlammverfahren nur für anoxische und anaerobe Reaktoren eingesetzt wird.

Bei fehlerhaftem Betrieb kann in diesen Reaktoren der Nitratgehalt so stark sinken, dass andere anaerobe Prozesse beginnen. Wegen der Gefahr zur Bildung von Schwefelwasserstoff werden Belebtschlammreaktoren seltener eingesetzt als Bewegtbettfilter.

Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

In Aquakulturanlagen wird der Belebtschlammfilter als Denitrifikationsreaktor zur Reduktion der Nitratfracht im Ablaufwasser (AW) von Kreislaufanlagen eingesetzt, also in der nachgeschalteten Ablaufwasserreinigung. Aufgrund des hohen betrieblichen Fachwissens kommt dies nur bei sehr grossen Systemen in Frage. Wird das Trommelfiltrerrückspülwasser weiter eingedickt, entsteht ein kohlenstoffreiches Filtrat, das sich gut mit einer Denitrifikation behandeln lässt. Für Durchlaufanlagen ist die Behandlung des Ablaufwassers wegen der hohen Volumenströme und meist tiefen Nitratkonzentration nicht sinnvoll.

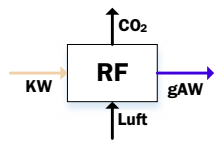
Ein sequenzieller Batchreaktor stellt eine weitere Möglichkeit dar, um Belebtschlammverfahren einzusetzen. Dabei werden zeitversetzt unterschiedliche Prozesse durchgeführt (Befüllung, Denitrifikation, Nitrifikation, Absetzung). Diese Form von Reaktor eignet sich sehr gut für stark belastete Abwässer, die nicht kontinuierlich anfallen und/oder über einige Stunden zwischengelagert werden können. Ansonsten werden zwei Reaktoren im Parallelbetrieb benötigt.



- Um eine optimale Flockenbildung zu gewährleisten ist ein pH zwischen 6.5 und 8.5 (idealerweise >7) nötig [45].
- Die hydraulische Aufenthaltszeit in Denitrifikationsreaktoren beträgt oft weniger als 2 h.

Gut zu wissen

4.3.4 Rieselfilter

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Nitrifikation, BSB-Elimination und Entgasung	Kreislaufanlagen	
Nitrifikation und BSB-Elimination im Abwasser	Durchlaufanlagen	

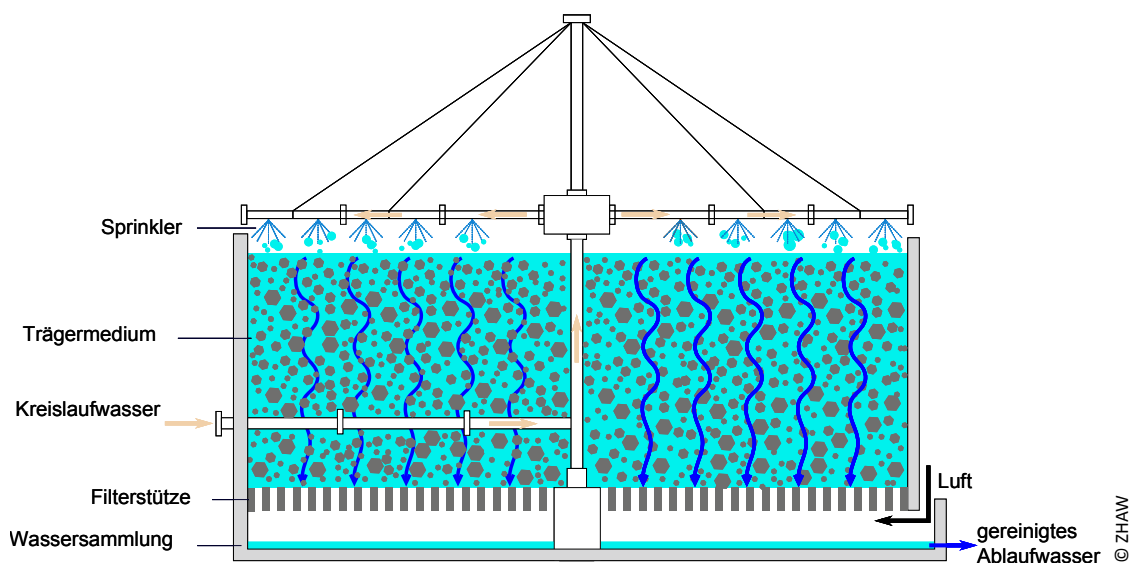
Funktionsprinzip

Die auch als Tropfkörper bekannten Rieselfilter (RF) bestehen aus einem mit Substrat befüllten Volumen. Über dieser Substratpackung wird das zu reinigende Wasser verrieselt und fließt durch das Substrat nach unten. Das Substrat wird über eine perforierte Bodenplatte (Filterstütze) zurückgehalten, während das gereinigte Wasser ablaufen kann. Durch den freien Abfluss des Wassers sind die Zwischenräume des Filters stets gut durchlüftet.

Auf der Substratoberfläche entwickelt sich ein Biofilm, welcher Nitrifikation und BSB-Elimination unterstützt. Denitrifikation ist mit Rieselfiltern aufgrund der guten Durchlüftung nicht möglich. Durch die hohe Kontaktfläche zwischen dem auf dem Substrat befindlichen Wasserfilm und der Luft findet ein guter Gasaustausch statt, wodurch sich diese Filter auch zur Entgasung des Kreislaufwassers eignen.

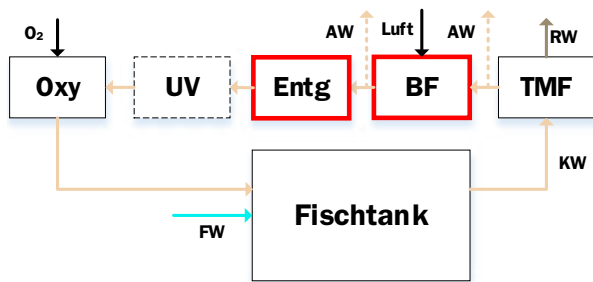
Durch den vertikalen Wasserfluss resultieren die Rieselfilter in einem bedeutenden Höhenunterschied des gereinigten Wassers, welcher ca. dem der Filterhöhe entspricht. Dafür ist keine Druckluft zur Belüftung nötig. Teilweise werden die Rieselfilter für eine noch effizientere Entgasung mit Ventilatoren zwangsdurchlüftet.

Der Nachteil vieler Rieselfilter ist die fehlende Selbstreinigung. Feststoffe und Biofilm können den Filter über längere Zeit verstopfen. Dadurch wird die Bildung von Kanälen gefördert (Kurzschlussströmungen), welche das Wasser zu schnell durch den Filter leiten. Deshalb müssen viele Rieselfilter in regelmässigen Abständen gereinigt werden.



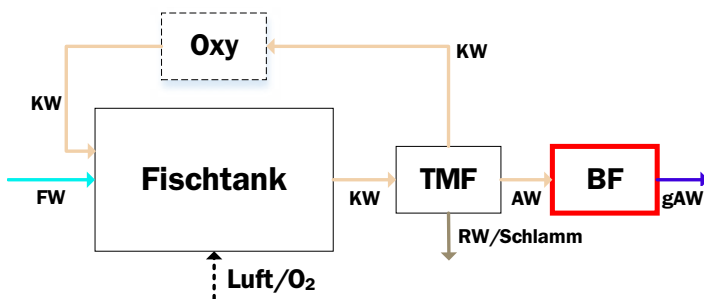
Einsatz in der Aquakultur

In erster Linie dienen Rieselfilter der Nitrifikation und BSB-Elimination. Weiter ermöglichen sie in Kreislaufanlagen die Entgasung des Kreislaufwassers.



Einsatz in der Abwasserreinigung

Wenn ein Niveauunterschied vorhanden ist oder das Abwasser gepumpt werden muss, eignen sich Rieselfilter gut zur Abwasserreinigung bei erhöhten Ammonium- und Nitritwerten von Durchlaufanlagen.



Gut zu wissen

- Die Flächenbelastung beträgt 50 bis 800 m³ m⁻² d⁻¹ [14, 46]
- Rieselfilter eignen sich, um bei knapper Fläche mit hohen Filtern Platz zu sparen.
- Die Höhe liegt oft zwischen 0.6 und 4.5 m [14, 47]. In Kreislaufanlagen meist > 2 m.
- Rieselfilter haben eine gute Entgasungsleistungen bei einem Luftstrom, der den Wasserfluss übersteigt (Luftstrom 1- bis 20-mal höher als Wasserstrom).
- Um eine Anreicherung von CO₂ und eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zu verhindern, muss die Luft immer aus dem Gebäude abgeleitet werden.
- Damit der Rieselfilter nicht verstopft ist eine tiefe Feststoffkonzentration nötig.

4.3.5 Festbettfilter zur Nitrifikation oder Denitrifikation

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Mechanische Feststoffabscheidung im Kreislauf	Kreislaufanlage mit Anspruch an hohe Wasserqualität	
Abwasseraufbereitung	Durchlaufanlagen, Kreislaufanlage	

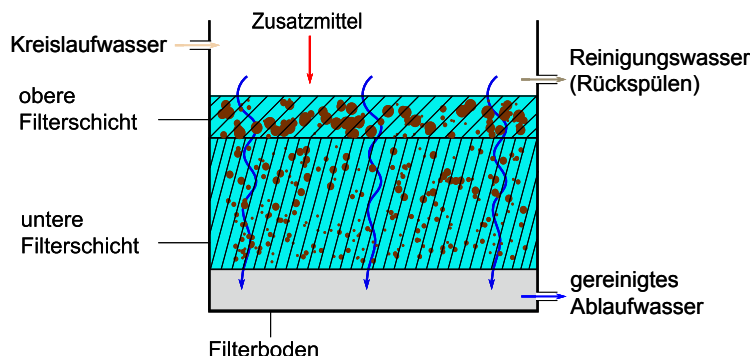
Funktionsprinzip

Festbettfilter (FBF) verbinden die Funktion von Feststoffabscheidung und biologischen Reinigungsschritten. Die Filter können sowohl oxisch zur Nitrifikation oder anoxisch zur Denitrifikation betrieben werden. Hierbei sind sie auf die richtigen Zuflusskonzentrationen und hydraulischen Aufenthaltszeiten angewiesen.

Die Filter sind so aufgebaut, dass über einem durchlässigen Filterboden eine Substratschicht mit grösserer Dichte aufliegt. Darüber liegt eine feinere Substratschicht mit meist geringerer Dichte. Das zu reinigende Wasser durchströmt meist von oben nach unten den Filter, wobei partikuläre Stoffe auf der oberen Filterschicht (oft Sand) zurückgehalten werden. Dadurch verringert sich die Durchlässigkeit der Filterschicht und der Filter muss durch einen Rückspülvorgang regelmässig von dieser Schmutzschicht gereinigt werden. Hierfür wird dieser vom Zufluss abgekoppelt und das Filtermedium mit Wasser und meist auch Luft rückgespült. Das Rückspülwasser muss abgeleitet und separat behandelt werden. Eine Rückspülung erfordert meist mehrere Minuten Wasserdurchfluss. Ein Filter mit einer hydraulischen Kapazität von $100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ benötigt für eine Rückspülung ca. 10 m^3 Wasser. Die Häufigkeit der Rückspülungen hängt von der Belastung ab (meist täglich bis wöchentlich). Die Leistung wird meist über den Druckunterschied, den Wasserdurchfluss, Stoffgradienten oder Feststoffmessungen überwacht.

Die Filter können sowohl offen (Gravitation) oder geschlossen (unter Druck) gebaut werden. Das Zulaufwasser sollte bereits eine Feststoffabscheidung durchlaufen haben, ansonsten sind unnötig viele Rückspülungen nötig.

Entscheidend für die biologische Reinigung (Nitrifikation oder Denitrifikation) ist eine gleichmässige Durchströmung und eine auf den Betrieb abgestimmte Durchflussrate. Bei zu hohen hydraulischen Aufenthaltszeiten kann beispielsweise aller Sauerstoff aufgebraucht werden, wodurch unkontrolliert anoxische oder bei Fehlen von Nitrat sogar anaerobe Prozesse einsetzen können.



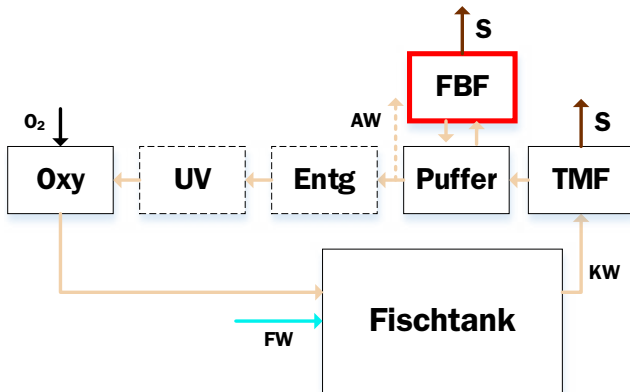
© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Festbettfilter werden vorwiegend in der Larven- und Satzfishaufzucht als Reinigungsschritte eingesetzt. Gründe für den Einsatz von Festbettfiltern sind geringe Futtermitteleinsätze und hohe Ansprüche an die

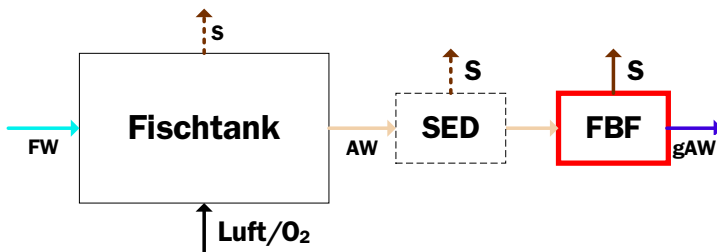
Wasserqualität. In der Mast von Fischen werden sie manchmal in Kombination mit Bewegtbettfiltern eingesetzt, wenn eine besonders hohe Wasserqualität angestrebt wird.

Festbettfilter müssen immer mit einem Bypass oder in mehrfacher Ausführung parallel eingebaut werden, um eine Rückspülung der Filter im laufenden Betrieb zu ermöglichen.



Einsatz in der Abwasserreinigung

Zur Abwasserreinigung werden unterschiedliche Arten von Festbettfiltern (FBF) eingesetzt. Entweder grobkörnig (Kies, Glas oder Kunststoffsubstrat) mit hoher hydraulischer Kapazität zur Nitrifikation des Wassers in Durchlaufanlagen oder feinkörnig (Sand) zur Abscheidung von gefällttem Phosphor und feinkörnigem Material. Dem Festbettfilter ist meist eine Feststoffabscheidung (z. B. SED) vorgelagert, um eine zu schnelle Verstopfung zu vermeiden.



Gut zu wissen

- Geschlossene Druckfilter werden mit einer Belastung von ca. $25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ betrieben.
- Offene Filter über Gravitation werden mit einer Belastung von ca. $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ betrieben.
- Die Nitrifikationsrate pro Volumen ist ca. halb so hoch wie in Bewegtbettfiltern.
- Feststoffe von $>20 \mu\text{m}$ sind abscheidbar. Je nach Substrat auch kleinere.
- Eine Rückspülung erfordert ca. 0.1 bis 0.2 des stündlichen Durchflussvolumens.

4.3.6 Pflanzenkläranlagen

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Nitrifikation (verstärkt in vertikalen PKA und Klärteichen) Denitrifikation (verstärkt in horizontalen PKA) BSB-Elimination	Durchlaufanlagen (end-of-pipe), Kreislaufanlagen (end-of-pipe)	

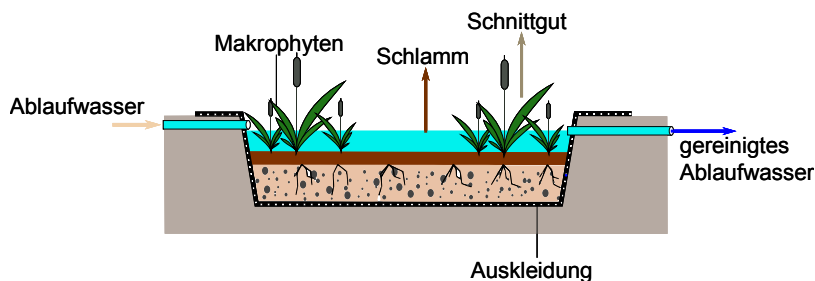
Funktionsprinzip

Pflanzenkläranlagen (PKA) bieten im durchflossenen Untergrund und Wurzelraum eine Bewuchsoberfläche für Mikroorganismen. Dadurch können je nach Bedingungen alle wichtigen Prozesse der biologischen Filtration (BSB-Elimination, Nitrifikation, Denitrifikation) ablaufen. Die Wasserreinigung findet hauptsächlich über mikrobielle Prozesse statt, während die Aufnahme von Nährstoffen über die Pflanzenwurzeln nur einen geringen Anteil ausmacht. Die Pflanzen helfen mit ihren Wurzeln, den Filter offen zu halten und versorgen den Untergrund mit Sauerstoff, sodass sich kleinräumig hohe Sauerstoffgradienten ausbilden können, die Nitrifikation und Denitrifikation auf engstem Raum ermöglichen.

Ein weiterer Effekt ist die Adsorption von Phosphationen an Bodenpartikel (durch eisenhaltige Sande), was in den ersten Betriebsjahren von Pflanzenkläranlagen meist zu einer Reduktion der Phosphorwerte im Abwasser führt. Pflanzenkläranlagen können die GUS reduzieren, es wird jedoch eine vorgeschaltete Feststoffabscheidung (meist Sedimentation) empfohlen.

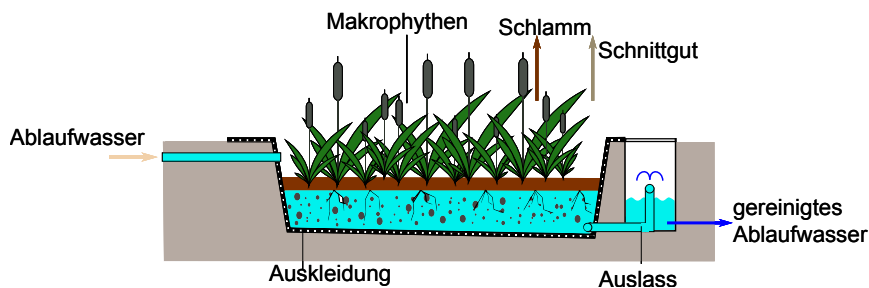
Bei Pflanzenkläranlagen können drei Grundprinzipien unterschieden werden:

1. **Klärteiche**, in denen das Wasser horizontal durch den Teich fließt und eine stehende Wassersäule besteht. Diese Systeme verfügen pro Fläche über die geringste Filterwirkung.



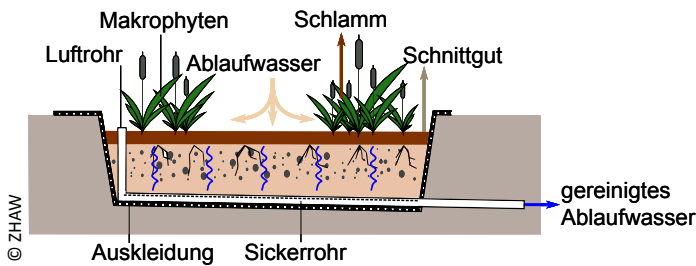
© ZHAW

2. **Horizontal durchflossene Pflanzenkläranlagen**, in denen das Wasser in einem Einspeisebereich horizontal einleitet und am Ende der PKA wieder gefasst wird. Abhängig von der Einstautiefe werden anoxische Prozesse (Denitrifikation) gefördert. Diese Form der PKA wird in Aquakulturanlagen oft eingesetzt, wenn im Winter die Gefahr des Zufrierens von offenen Wasserflächen oder Leitungen besteht. Durch eine Deckschicht von Holzschnitteln können diese Anlagen Preiswert isoliert werden.



© ZHAW

3. Vertikal durchflossene Pflanzenkläranlagen, in denen das Wasser oberirdisch verteilt wird, wie bei einem Rieselfilter vertikal nach unten fließt und dort in einem Sickerrohr gesammelt wird. In vertikal durchflossenen Pflanzenkläranlagen werden oxische Prozesse wie die Nitrifikation gefördert.

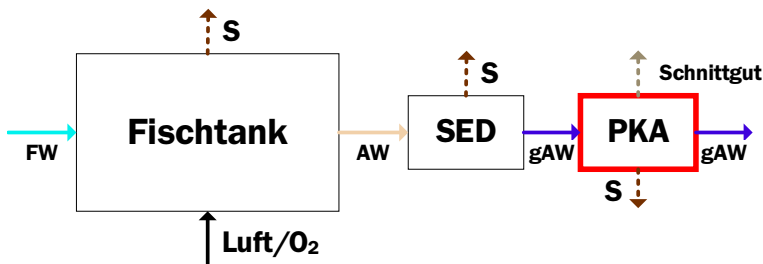


Einsatz in der Aquakultur

Pflanzenkläranlagen (PKA) werden nur in einer abgewandelten Form in Lowtech-Aquaponik innerhalb von Aquakulturanlagen eingesetzt. Dort erfüllen die Bewuchsflächen die Rolle der Biofiltration, teilweise Feststoffabscheidung und die Pflanzen reduzieren die Nitratgehalte durch Assimilation. Die Wahl der richtigen Pflanzen ist wichtig für eine gute Funktion.

Einsatz in der Abflaufwasserreinigung

Am häufigsten werden Pflanzenkläranlagen (PKA) in der Abflaufwasserreinigung von Durchlaufanlagen eingesetzt, um die Ammonium- und Nitritfrachten zu reduzieren oder um Feststoffe aus dem Wasser abzuscheiden. Der hohe Flächenbedarf beschränkt aber deren Einsetzbarkeit. Zur Denitrifikation oder Phosphorelimination werden sie selten eingesetzt.



Gut zu wissen

- Die hydraulische Belastung von PKA für Wasser aus Aquakulturen liegt zwischen 1 und $6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, da die Konzentrationen meist deutlich tiefer liegen als bei kommunalem Abwasser.
- Bei Ammoniumbelastungen von bis zu $5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ und guter vorgängiger Feststoffabscheidung sind keine Leistungsgrenzen feststellbar. [48]
- In Durchflussanlagen Stufe 2 werden Pflanzenkläranlagen mit einem Flächenbedarf von $5\text{--}20 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ Futter dimensioniert.
- Die Erstellungskosten für eine PKA in der Schweiz liegt ohne Landkosten bei ca. CHF 100 bis 200 pro m^2 .
- Aufgrund des Flächenbedarfs sind PKA oft nur für kleine Anlagen mit entsprechenden Landreserven möglich.

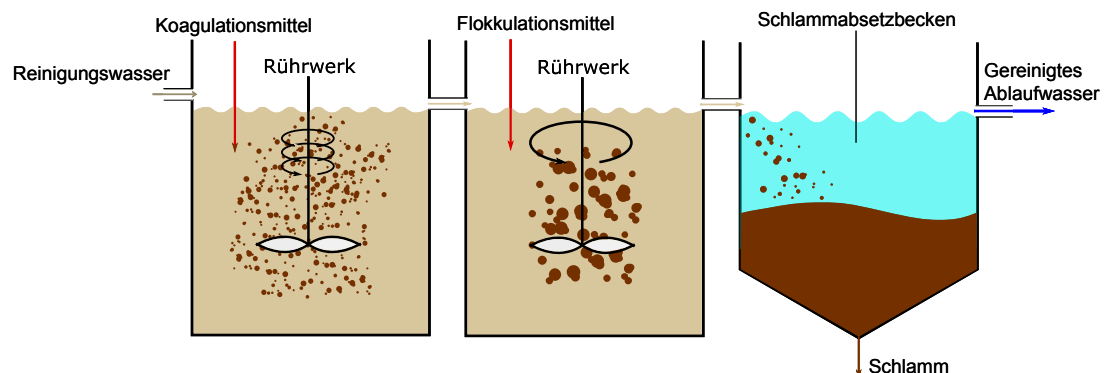
4.3.7 Phosphatfällung (nachgeschaltet)

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Schlammbehandlung	Kreislaufanlagen Durchlaufanlagen mit Trommel- filter	
Ablaufwasserbehandlung	Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

Die Phosphatfällung wird meist mit der Schlammeindickung kombiniert. Die eigentliche Zumischung des Fällmittels (Koagulationsmittel, Flockungsmittel) findet in einem ersten mechanisch gemischten Reaktor statt. Durch die Zugabe eines Metallsalzes fallen Phosphatsalze aus und die Oberflächenladung von partikulärem Material wird neutralisiert. Dadurch verklumpen diese Partikel und bilden in einem weiteren Reaktor durch Zugabe von Polymeren grössere Flocken. Das Gemisch aus Phosphatsalzen und organischen Schlammflocken wird über eine Feststoffabscheidung entfernt. Dies sind meist Sedimentationsbecken oder Bandfilter, deren Dimensionierung die Abtrennung des gefällten Phosphors ermöglichen muss. Zur Entfernung verbleibender Fällungsprodukte wird gelegentlich auch ein Sandfilter nachgeschaltet.

Eine ideale Auswahl und Dosierung der Fällmittel sollte in Zusammenarbeit mit den Vertriebsfirmen dieser Mittel vor Ort mit einem Versuch ermittelt werden. Weiter ist bei der Wahl der Flockungsmittel auf die weitere Schlammbehandlung zu achten. Das Mittel sollte beispielsweise für Biogasanlagen verträglich und zugelassen sein.

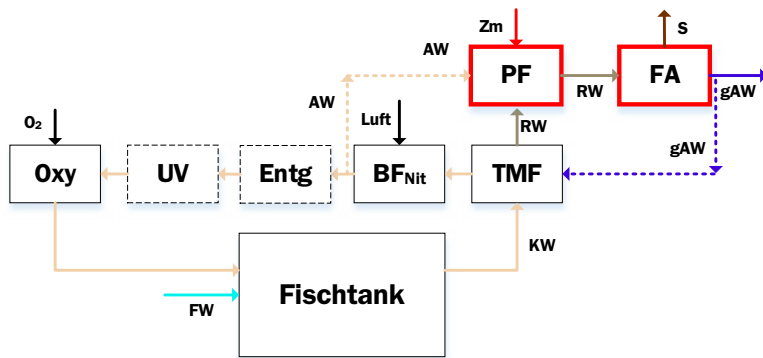


© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Die Phosphatfällung findet anlagenintern selten Anwendung. In vereinzelt Fällen, wo Rückspülwasser eingedickt und das Filtrat in der Anlage wiederverwendet wird, kann diese Lösung zum Einsatz kommen. Aufgrund der Toxizität der Fällmittel ist allerdings grosse Vorsicht walten zu lassen. Die LC50-Werte¹⁵ eines gängigen Fällmittels liegen bei ungefähr 20 mg l⁻¹. Es kann vorkommen, dass solche Konzentrationen im Reaktionsbecken erreicht werden können (abhängig von der Fällmitteldosierung). Zudem ist es nicht auszuschliessen, dass bereits bei tieferen Fällmittelkonzentrationen chronische Schäden bei den Fischen entstehen.

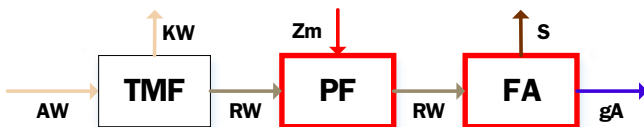
¹⁵ Konzentration, bei denen die Hälfte der Fische im Wasser sterben würde.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Der häufigste Anwendungsbereich der Phosphatfällung ist die Zugabe von Fällmitteln zum Rückspülwasser. Dies kann bei Durchlaufanlagen und Kreislaufanlagen der Fall sein.

Für die Reinigung des Ablaufwassers (AW) ist die Phosphatfällung (PF) nur in Kreislaufanlagen einsetzbar. In Durchlaufanlagen ist die Phosphatkonzentration zu tief. Je kleiner der Wasseraustausch pro kg Fischfutter, desto höher ist die erwartete Phosphatkonzentration und desto effizienter die Fällung.



Gut zu wissen

- Anwendungsbeispiel bei einem Wasserverbrauch von $1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ Fischfutter: Werden pro kg Futter 5 g P ausgeschieden und mit Aluminiumsulfat davon 4.2 g P gefällt bei einer P-Einleitkonzentration (= Restkonzentration) von 0.8 mg l^{-1} , führt dies zu einem Verbrauch von ca. 20–50 g Aluminiumsulfat pro kg Fischfutter.
- Phosphat immer dort fällen, wo dessen Konzentration am höchsten ist. Im Rückspülwasser ist die Konzentration wesentlich höher als im Ablaufwasser.
- Bei einer Phosphorkonzentration $< 0.8 \text{ mg l}^{-1}$ steigt das benötigte Verhältnis von Fällmittel-Metallion zu Phosphor stark an. Tests vor Ort zur exakten Dosierung der Fällmittel lohnen sich, um Kosten aufgrund einer Überdosierung zu vermeiden.
- Die korrekte Abtrennung der gefällten Phosphorsalze ist ebenso wichtig wie die Fällung selbst. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Fällung den Gesamtphosphor und den gelösten Phosphor messen.

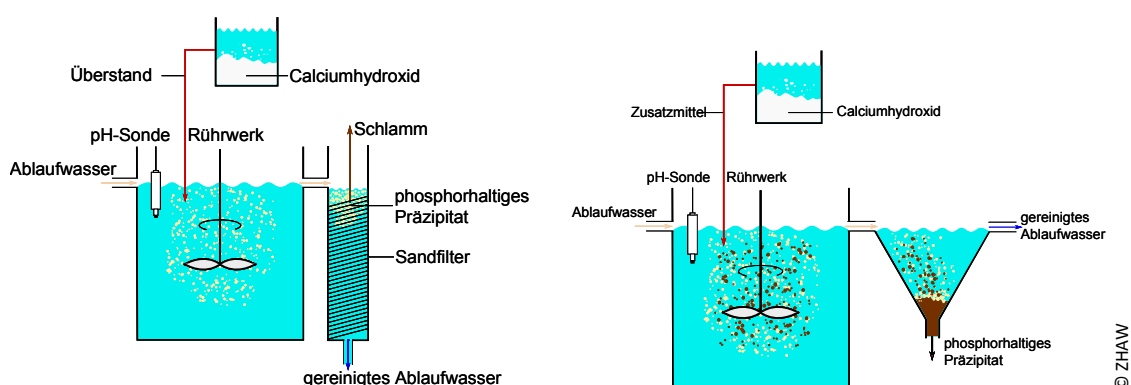
4.3.8 Phosphatfällung durch die Einstellung des pH

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Rückspülwasserbehandlung und pH-Stabilisierung	Kreislaufanlage	
Kreislaufwasser und pH-Stabilisierung	Kreislaufanlage	

Funktionsprinzip

Der sich noch in Entwicklung¹⁶ befindende Prozess verbindet die in Kreislaufanlagen notwendige pH-Korrektur durch Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mit der Phosphatabtrennung und Schlammstabilisierung. Dadurch kann innerhalb der Anlage ohne zusätzliche Chemikalien eine Phosphorkonzentration von ungefähr 1.4 mg/l erreicht werden. Dieser Prozess kann in zwei Varianten eingesetzt werden:

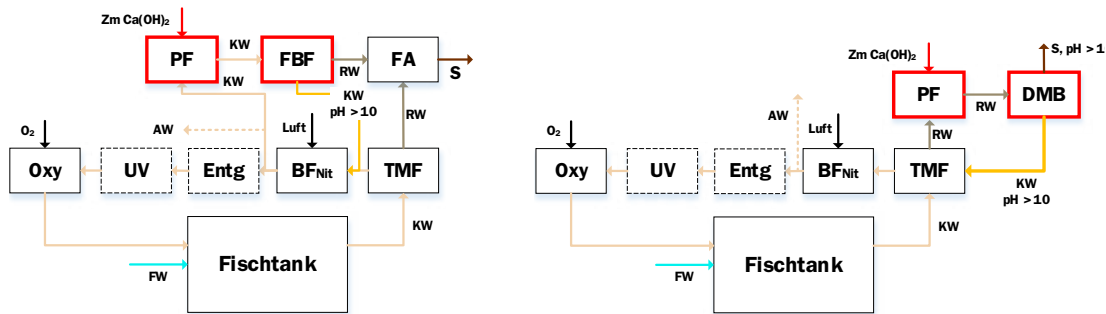
1. Ein Bypass des Kreislaufwassers wird in einen Rührreaktor geleitet, in welchem der pH mittels Calciumhydroxid auf 10.5 angehoben wird. Calciumphosphatverbindungen fallen aus und werden über einen nachgeschalteten Sandfilter abgetrennt. Das Spülwasser des Filters wird der Schlammverdickung zugeleitet. Das Filtrat mit $\text{pH} > 10$ wird dem Nitrifikations-Biofilter zugeleitet, womit der pH der Anlage angehoben wird. Die Durchflussmenge dieses Seitenstroms kann bedarfsgerecht für die pH-Korrektur gesteuert werden.
2. Der pH des Trommelfilterrückspülwassers wird in einem Rührreaktor durch Zugabe von Calciumhydroxidlösung auf 10.5 angehoben. Dadurch fallen Calciumphosphatverbindungen aus und können zusammen mit dem Schlamm eingedickt und abgetrennt werden. Durch den hohen pH-Wert wird der Schlamm zusätzlich stabilisiert, was abhängig von der geplanten späteren Entsorgung wieder korrigiert werden muss. Der Überstand der Schlammabtrennung mit $\text{pH} > 10$ wird in die Anlage zurückgeleitet zur Korrektur des pH. Eine Überdosierung wird über die pH-Überwachung im System verhindert.



¹⁶ Entwicklung an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Diese Technologie kann, wie im Abschnitt Funktionsprinzip dargestellt, in der internen Wasseraufbereitung von Kreislaufanlagen eingesetzt werden. Durch die hohen pH-Werte des behandelten Wassers ist kein Einsatz in der Ablaufwasserreinigung möglich.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Nicht möglich. Durch den internen Einsatz verringert sich jedoch die Phosphatfracht in Ablaufwasser. Je geringer der Wasseraustausch der Anlagen ist, desto effizienter kann Phosphat damit entfernt werden.

- Verbrauch: 80 g Calciumhydroxid pro kg Fischfutter.
- Calciumhydroxid-Dosierung: ca. 80 g m⁻³ Dosierung um einen pH von 10.5 zu erreichen [49].
- Die Phosphatkonzentration kann um 80 bis 90% reduziert werden.

Gut zu wissen

4.4 Sauerstoffeintrag, Gasaustrag und Keimzahlreduktion

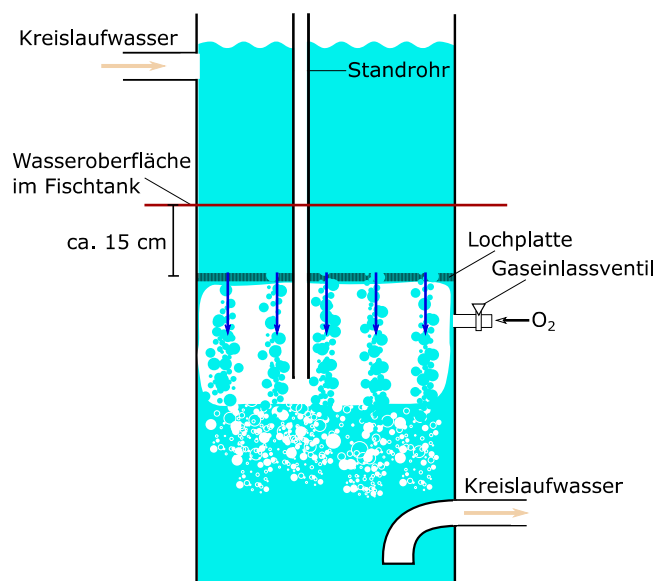
Im Folgenden werden Technologien beschrieben, welche zum Eintrag von Sauerstoff, dem Austrag von Gasen (z. B. CO₂) oder der Keimzahlreduktion dienen.

4.4.1 Low-Head-Oxygenator

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Anreicherung von Zulaufwasser mit Sauerstoff	Durchlaufanlage	
Anreicherung von Kreislaufwasser mit Sauerstoff	Kreislaufanlage	
Ozoneintrag im Seitenkreislauf	Kreislaufanlage	

Funktionsprinzip

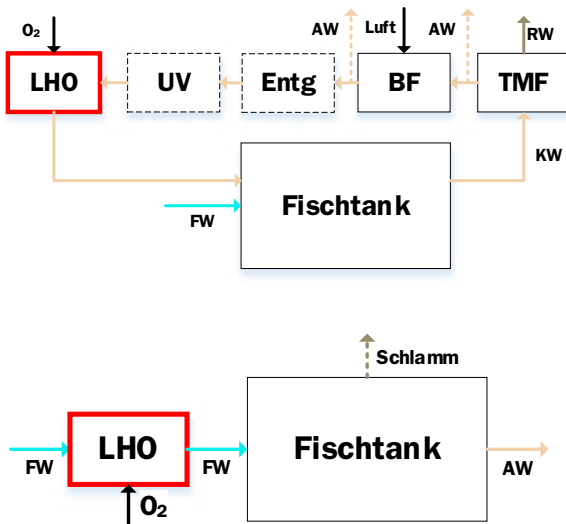
Ein Low-Head-Oxygenator (LHO) ist ein System zum Eintrag von Sauerstoff, welches mit einer geringen Druckerhöhung (low head) arbeitet. Das zufließende Wasser wird im oberen Teil des Reaktors über einer Lochplatte gestaut. Die Öffnungen in der Lochplatte werden partiell mit Stopfen geschlossen, bis ein Überdruck von ca. 80 cm entsteht, um das Wasser durch die Platte zu drücken. Folglich füllt sich der Low-Head-Oxygenator bis zu dieser Höhe. Unterhalb der Lochplatte wird Reinsauerstoff eingetragen, wodurch sich ein Sauerstoffkissen bildet, welches vom durchströmenden Wasser durchmischt wird. In der Mischkammer unter der Platte ergibt sich durch die entstehende Turbulenz eine grosse Kontaktfläche zwischen Wasser und Sauerstoff, was die Sauerstoffanreicherung begünstigt. Dadurch sind Sauerstoffsättigungen von über 200% erreichbar. Über ein Standrohr ist es möglich, die Höhe des Sauerstoffkissens und dadurch die Einmischung des Sauerstoffs zu beeinflussen: wird das Gaskissen zu hoch, entweicht das Gas aus dem Standrohr.



Einsatz in der Aquakultur

Der häufigste Einsatzbereich liegt im effizienten Eintrag von Sauerstoff. Mit typischen Sauerstoffsättigungen von 150 bis 200% kann der Low-Head-Oxygenator (LHO) direkt in das Kreislaufwasser integriert werden. Durch den geringen Druckverlust eignet er sich besonders für eine energieeffiziente Sauerstoffanreicherung. Low-Head-Oxygenator werden sowohl im Gesamtkreislauf wie auch vor einzelnen Becken eingesetzt. Letzteres erlaubt eine bedarfsgerechte Dosierung von Sauerstoff für die jeweiligen Becken.

Low-Head-Oxygenator sind auch in Durchlaufanlagen einsetzbar. In der Intensivierung von Anlagen können sie bei natürlichen Gefällen zwischengeschaltet, oder mit einer Pumpe gespeist werden.



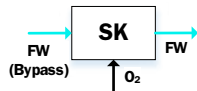
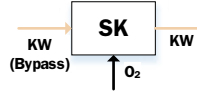
Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

In der Ablaufwasserreinigung gibt es keine Anwendung für den Low-Head-Oxygenator (LHO).

Gut zu wissen

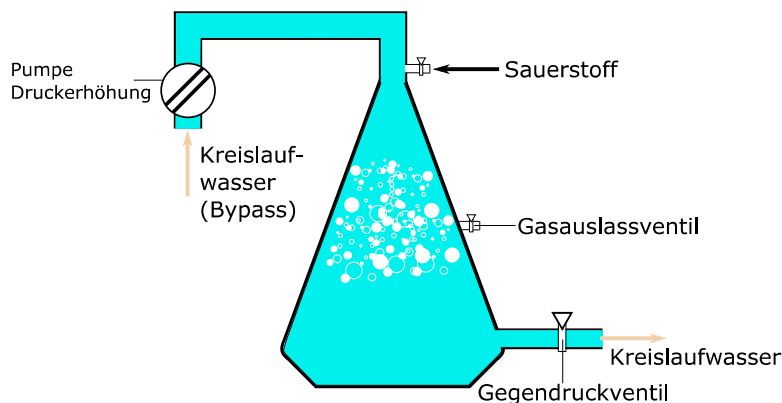
- Ein Low-Head-Oxygenator führt zu einem Druckverlust von 80 cm Wassersäule.
- Notüberlauf zurück in den Pumpensumpf einplanen.
- Bei der Verwendung von Sauerstoff ab einem Sauerstoffkonzentrator eine automatische Gasentlüftung implementieren.
- Low-Head-Oxygenatoren werden gelegentlich auch zum Eintrag von Ozon in tiefen Konzentrationen verwendet. In diesem Fall muss zwischen dem Ozoneintrag und dem Fischbecken eine Ozonelimination (z. B. UV oder Entgasung) eingebaut sein. Ebenso ist die Gasentlüftung über eine Ozonvernichtung zu führen.

4.4.2 Sauerstoffkonus (engl. Cone)

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Sauerstoffanreicherung im Bypass im Frischwasser (FW)	Kreislaufanlagen, Durchlaufanlagen	
Sauerstoffanreicherung im Bypass im Kreislaufwasser (KW)	Kreislaufanlagen, Durchlaufanlagen	

Funktionsprinzip

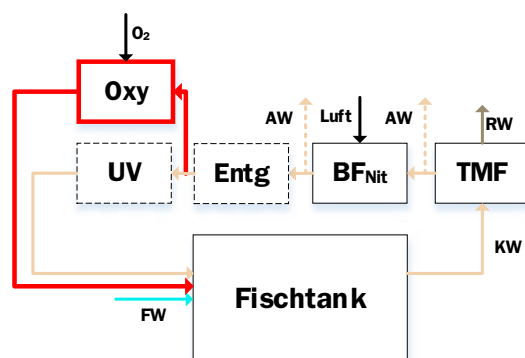
Ein Sauerstoffkonus (SK) wird von oben nach unten mit Wasser durchströmt. Dadurch verringert sich mit abnehmender Höhe im Konus die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Eingetragener Reinsauerstoff steigt als Blasen im Konus auf, bis die Steiggeschwindigkeit der Sauerstoffblasen der Wasserströmung entspricht. Die Sauerstoffblasen werden dadurch bis zur vollständigen Lösung in Schwebelage gehalten. Um die Sauerstoffsättigung weiter zu erhöhen, wird im Innern des Konus der Druck durch partielles Schliessen eines Ventiles am Auslass auf 1.5 bis zu 3 bar erhöht. Dadurch können am Auslass des Sauerstoffkonus Sauerstoffkonzentrationen von 30 bis 90 mg l⁻¹ erreicht werden [6]. Die Sauerstoffabsorptionseffizienz im Sauerstoffkonus beträgt annähernd 100%. Ein Teil der Betreiber nutzen die Sauerstoffkonusse auch ohne Gegendruck, erreichen dabei aber deutlich tiefere Sauerstoffsättigungen.

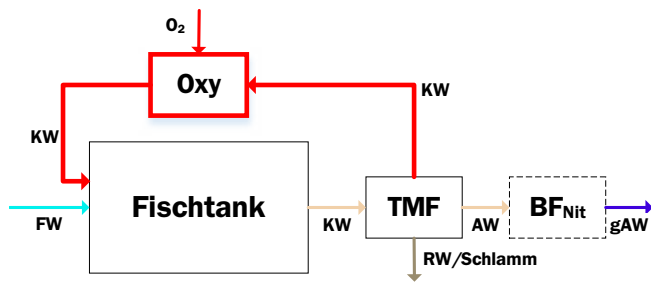


© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Die hohe erreichbare Sauerstoffsättigung erfordert eine starke Druckerhöhung durch eine separate Pumpe, weswegen der Sauerstoffkonus einen hohen Energieverbrauch hat. Aus diesem Grund wird meist nur ein Teil des Kreislaufwassers durch den Sauerstoffkonus geleitet. Dadurch entsteht eine zweite Zuleitung zu jedem Becken. Selten werden Sauerstoffkonusse auch im Vollkreislauf eingesetzt (wie ein Low-Head-Oxygenator), dann aber ohne Gegendruck.





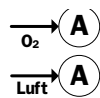
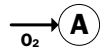
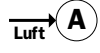
Einsatz in der Abwasserreinigung

Gelegentlich werden Sauerstoffkonusse (SK) zur Anreicherung von Ozon in der Abwasserbehandlung von Aquakulturanlagen eingesetzt. Um eine Beschädigung durch Ozon zu vermeiden, müssen die Konus im Innern mit einer ozonbeständigen Beschichtung (PVC) ausgekleidet werden. Zur reinen Sauerstoffanreicherung werden Sauerstoffkonusse in der Abwasserreinigung nicht eingesetzt.

- Es ist eine Sauerstoffanreicherung auf 30 bis 90 mg l⁻¹ (ca. 300 bis 900%) möglich (bei starker Erhöhung des Drucks im Sauerstoffkonus).
- Der elektrische Energiebedarf der Pumpe des Sauerstoffkonus wird fast vollständig zu Wärme umgewandelt.
- Nur mit Reinsauerstoff betreiben. Bei Eintragung von Luft oder Luft-Sauerstoff-Gemischen besteht die Gefahr einer Gasübersättigung mit Stickstoffgas oder anderen Fremdgasen.
- Sauerstoffkonus regelmässig entlüften, da sich Stickstoffgas aus dem Wasser in der Gasphase sammeln kann.

Gut zu wissen

4.4.3 Luft- und Sauerstoffausströmer

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Sauerstoffeintrag oder Lufteintrag in Fischbecken	Lowtech-Aquakulturanlagen oder Satzfishaufzucht	
Notsauerstoffausströmer in Fischbecken	Kreislaufanlagen	
Entgasung	Kreislaufanlagen, Satzfishzuchten	

Funktionsprinzip

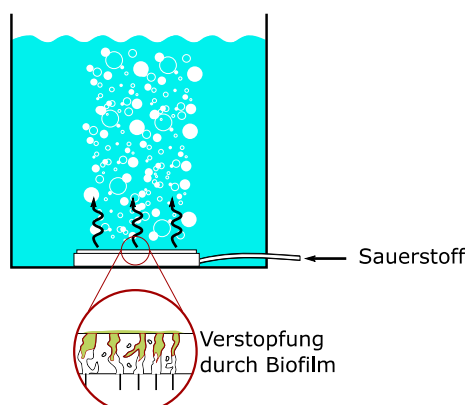
Sauerstoff- und Luftausströmer (A) verfügen über feinporige Öffnungen, durch welche unter Druck ein Gas eingetragen wird. Je kleiner die Porengrösse ist und je tiefer die Ausströmer unter Wasser sind, desto höher ist der nötige Gasdruck. Je höher der Salzgehalt und je kleiner die Porengrösse, desto kleiner werden die Blasen. Je geringer der Gasfluss und die Turbulenzen der aufsteigenden Gasblasen sind, desto besser bleiben die Blasen separiert und verbinden sich nicht zu grösseren Blasen. Kleine Blasen steigen langsamer auf, haben eine höhere Oberfläche pro Volumen und führen deshalb zu einem besseren Gasaustausch als grosse Blasen. Dies gilt sowohl für den Gaseintrag ins Wasser (Sauerstoff) wie auch für die CO₂-Entgasung (CO₂ vom Wasser in die Gasblase). Der Austrag von CO₂ ist limitiert durch die gute Löslichkeit von CO₂ im Wasser: Bereits nach kurzer Kontaktzeit stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Gasblase und Wasser ein, wodurch nicht mehr CO₂ in die Gasblase eintritt. Deshalb werden Luftausströmer für die Entgasung sehr flach betrieben (25 bis 100 cm unter der Wasseroberfläche). Das dafür verwendete Gebläse darf keine CO₂-reiche Luft ansaugen.

Für den Reinsauerstoffeintrag wird eine möglichst hohe Eintragseffizienz angestrebt, um die Sauerstoffkosten tief zu halten. Deshalb werden für Sauerstoff kleine Blasendurchmesser angestrebt. Auch bei der Sauerstoffbegasung findet eine gewisse CO₂-Entgasung statt. Diese wird verstärkt, wenn es im Wasser zu einer O₂-Übersättigung kommt.

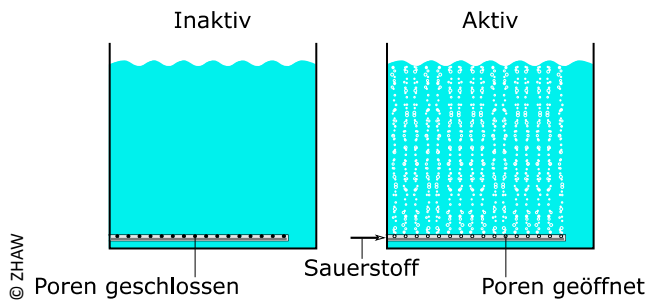
Luftausströmer arbeiten mit weniger Druck und höheren Blasendurchmessern. Neben dem Eintrag von Sauerstoff in das Wasser findet auch ein erhöhter Austrag von CO₂ vom Wasser in die Gasblase statt.

Bei den Materialien unterscheidet man zwischen Keramikausströmern und perforierten Kunststoffschläuchen. Keramikausströmer verfügen über sehr feine Poren, die mit der Zeit durch Biofilmwachstum verstopfen und regelmässig chemisch gereinigt werden müssen. Perforierte Kunststoffschläuche eignen sich hingegen als Notsauerstoffausströmer. Diese ziehen sich bei Nichtgebrauch zusammen, wodurch die Poren geschlossen bleiben. Bei Sauerstoffzugabe erhöht sich der Druck im Schlauchinnern und die Poren öffnen sich.

Keramikausströmer



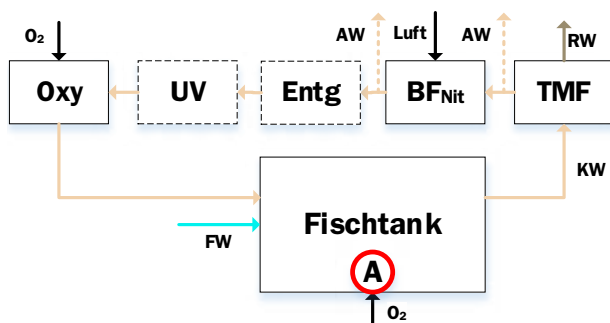
Notsauerstoffausströmer



Einsatz in der Aquakultur

Keramikausströmer für Reinsauerstoff finden sich in tiefen Behältern im Zufluss von Durchlaufanlagen, um die Sauerstoffmenge im Zulaufwasser zu erhöhen. Weiter werden sie innerhalb von Fischbecken von Durchfluss- und Kreislaufanlagen für permanenten Sauerstoffeintrag eingesetzt. Der Einsatz innerhalb der Fischbecken führt jedoch zu Turbulenzen und reduziert die Absetzung von Feststoffen. Wegen der zusätzlich schwächeren Sauerstoffeintragseffizienz sind vorgelagerte Sauerstoffeintragsgeräte wie Low-Head-Oxygenator und Sauerstoffkonus zu empfehlen.

Luftausströmer (grobblasig) werden in Low-Tech-Anlagen zum Sauerstoffeintrag direkt im Fischbecken eingesetzt. Weiter finden sich auch Anwendungen für die Entgasung und Belüftung von Bewegtbettfiltern, wobei hier vorwiegend gelochte Rohre zum Lufteintrag genutzt werden.



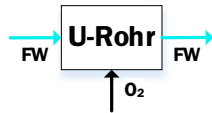
Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Bewegtbettfilter und Belebtschlammfilter werden mit Luftausströmern belüftet, welche deutlich grössere Blasen bilden und dadurch mehr mechanische Mischenergie in die Systeme eintragen.

- Der Eintrag von 1 m³ Luft in 1 m Wassertiefe benötigt aufgrund der Wasserverdrängung ca. dieselbe Energie, wie 1 m³ Wasser auf 1 m Höhe zu pumpen.
- Um 1 kg Sauerstoff als Druckluft über Luftausströmer einzutragen, werden bei 90 % Sauerstoffsättigung und 20 °C je nach Blasengrösse ca. 2 bis 10 kWh elektrische Energie für die Druckluft-erzeugung benötigt.
- Durch die geringe Eintragseffizienz von Ausströmern sollten diese nur für punktuellen Eintrag zum Decken von Bedarfsspitzen, in Notfallsituationen (Stromausfall etc.) oder für spezielle betriebliche Arbeiten (Abfischen, Transport etc.) eingesetzt werden.

Gut zu wissen

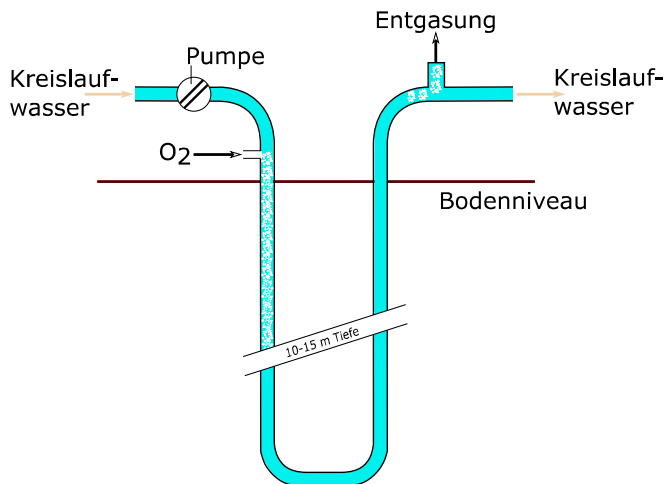
4.4.4 U-Rohr

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Reinsauerstoffanreicherung vor dem Beckenzufluss	Durchlaufanlage oder Kreislaufanlage	

Funktionsprinzip

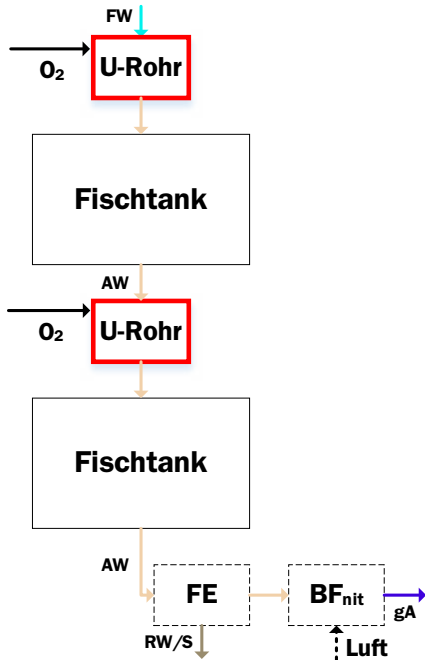
U-Rohr (U-tube) sind Rohre, welche 10 bis 15 m tief in den Boden verlegt werden. Die Rohre werden nebeneinander oder ineinander verlegt. Sauerstoff wird im Zufluss zugefügt und das Wasser wird über Schwerkraft oder über eine Pumpe durch das Rohr geleitet. Bei 15 m Wassersäule herrschen am untersten Punkt des Rohres 1.5 bar Überdruck. Dadurch kann sich Sauerstoff besser lösen und mit sehr geringem Energieaufwand effizient eingetragen werden. Überschüssiges Gas verlässt die Leitung über eine Entlüftung und kann erneut eingetragen werden. Das mit Sauerstoff angereicherte Wasser wird den Becken zugeleitet. Mit U-Rohren können Sauerstoffübersättigungen von 300% und mehr erreicht werden.

Der Einbau von U-Rohren erfordert sehr tiefe Bohrungen, was abhängig vom geologischen Untergrund die Kosten stark erhöhen kann.



Einsatz in der Aquakultur

Diese Form der Sauerstoffanreicherung kann in Durchlaufanlagen und Kreislaufanlagen vor dem Beckenzulauf eingesetzt werden. Hierfür wird meist der volle Volumenstrom durchgeleitet. Wenn ein leichtes Gefälle besteht, können U-Rohre ohne Pumpe betrieben werden. Damit eignen sie sich sehr gut zur Sauerstoffanreicherung von feststoffbelastetem Wasser, wo die Feststoffe nicht durch Pumpen zerkleinert werden sollen. Dies ist beispielsweise in der Kaskadennutzung in Durchlaufanlagen der Fall. Damit bleiben die partikulären Stoffe besser abtrennbar und vereinfachen die Ablaufwasserreinigung.



Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Für die Ablaufwasserreinigung gibt es keine Anwendung von U-Rohren.

- Die Fließgeschwindigkeit im U-Rohr beträgt 2 bis 3 m s⁻¹.
- Der Gaseintrag soll kleiner als ein Viertel des Wasserflusses sein, sonst besteht die Gefahr eines Strömungsabrisses.
- Nur Reinsauerstoff verwenden. Bei der Verwendung von Luft oder mit Sauerstoff angereicherte Luft besteht die Gefahr einer Übersättigung mit Stickstoffgas.

Gut zu wissen

4.4.5 Teichbelüftungssysteme (Schaufelrad)

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Luftsauerstoffanreicherung	Teichanlagen	

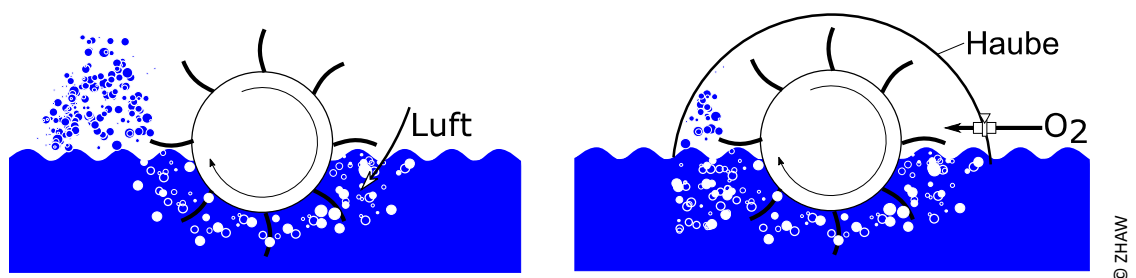
Funktionsprinzip

Schaufelradbelüfter (SR) sind mit Strom oder Kraftstoff angetriebene Systeme zur Belüftung von Wasserkörpern über die Wasseroberfläche. Durch die axiale Drehung der Schaufelräder wird einerseits Luft in das Wasser gestossen und andererseits Wasser in die Luft geschleudert. Beide Vorgänge erhöhen die Kontaktfläche zwischen Luft und Wasser stark und verbessern die Lösung von Sauerstoff im Wasser. Schaufelräder gehören zu den effizientesten Eintragssystemen für atmosphärischen Sauerstoff die für Teichanlagen geeignet sind. Beim Betrieb eines Schaufelradbelüfters ist darauf zu achten, dass die Schaufelräder nicht zu tief im Wasser liegen, da zwar mehr Sauerstoff eingetragen werden kann, aber die Effizienz stark abnimmt (es wird mehr Energie für die gleiche Menge Sauerstoff benötigt) [50, 51]. Der effizienteste Eintrag wird bei einer Eintauchtiefe von 9 bis 11 cm erreicht. In Datenblättern wird oft die «Standard Aeration Efficiency» angegeben, d. h. die Leistung an der Achse des Schaufelrades (im Bereich von 1.1 bis 3.0 kg kWh⁻¹). Diese Werte gelten jedoch bei einer Sauerstoffsättigung von 0 mg/l. In der Aquakultur werden jedoch Konzentrationen nahe 100% angestrebt, in welchen die Sauerstoffübertragung bei der Verwendung von Luft viel tiefer ist. Bei z. B. 80% Sauerstoffsättigung ist die Eintragungseffizienz ca. 5-mal tiefer als bei 0% Sättigung. In grösseren Teichanlagen ist die Positionierung von Schaufelradbelüftern wichtig, damit alle im Teich befindlichen Fische Zugang zu sauerstoffreichem Wasser erhalten.

Soll mit dem Schaufelrad Reinsauerstoff eingetragen werden, kann ein Schaufelrad mit Haube genutzt werden, unter der durch Zugabe von Reinsauerstoff eine Sauerstoffatmosphäre gebildet wird.

Einsatz in der Aquakultur

Schaufelradbelüfter werden in Teichaquakulturanlagen mit tiefer Besatzdichte eingesetzt, um zwischenzeitliche Sauerstoffminima, besonders nach der Fischfütterung, einzugrenzen oder die Produktion generell zu erhöhen.



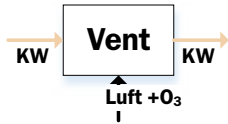
Einsatz in der Abwasserreinigung

Keine direkte Anwendung.

Gut zu wissen

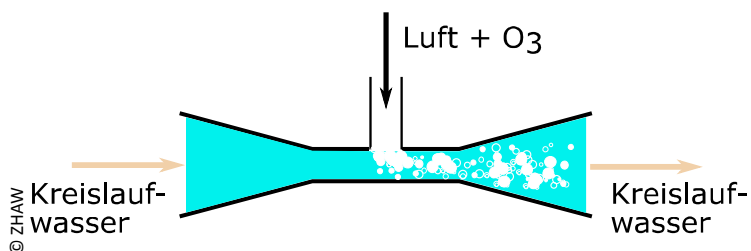
- Wird das Wasser bei 80% Sauerstoffsättigung belüftet, werden pro kWh elektrischer Energie ca. 0.5 kg Sauerstoff eingetragen. Je wärmer das Wasser ist, desto weniger.
- Die Eintauchtiefe der Schaufeln sollte zwischen 9 und 11 cm liegen.

4.4.6 Venturi

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Ozoneintrag in Ozonreaktoren	Kreislaufanlagen	

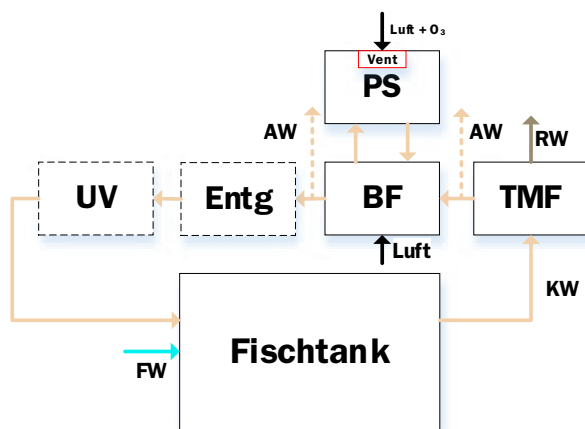
Funktionsprinzip

Das Venturi besteht aus zwei konischen Rohrstücken, welche an der engsten Stelle miteinander verbunden sind. An dieser Verbindung befindet sich ein Anschlussstutzen für den Gaseintrag. Bei Durchströmung mit Wasser entsteht am Punkt mit dem geringsten Rohrquerschnitt ein Unterdruck, wodurch am Anschlussstutzen Gas oder Flüssigkeit angesaugt werden kann. Zugeführte Luft, Sauerstoff oder Ozon vermischen sich feinblasig im Wasserstrom und können dadurch eingetragen werden.



Einsatz in der Aquakultur

Für den Eintrag von Ozon sind Venturi sehr beliebt, da durch den Eintrag über Unterdruck kein Kontakt zwischen Ozon und mechanischen Verschleissteilen (Pumpen etc.) entsteht. Dasselbe gilt auch für die Einmischung von Chemikalien (z. B. Desinfektionsmittel) ins Anlagenwasser. Da sie einen sehr hohen Druck für den Betrieb benötigen, finden sie nur Einsatz in Sekundärkreisläufen und werden selten für den Eintrag von Sauerstoff direkt ins Fischbecken benutzt.



Gut zu wissen

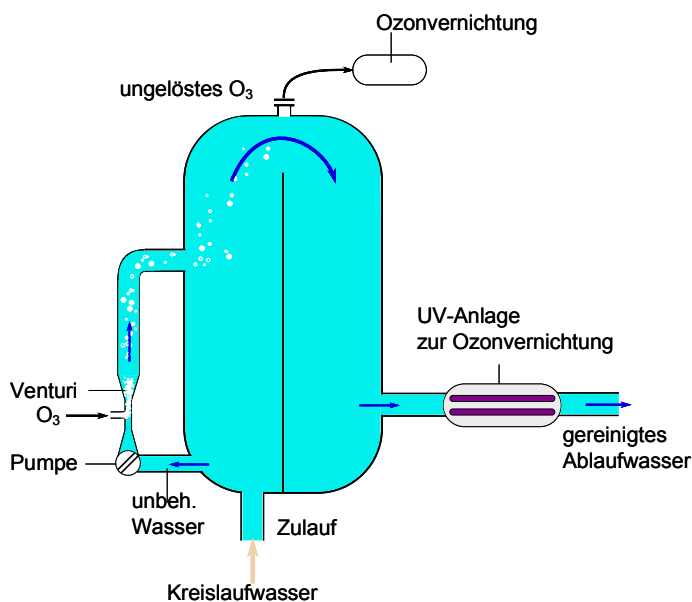
- Beim Ansaugen von Gasen können bis zu 100 % des Wasserdurchflusses als Gasvolumen eingetragen werden.
- Beim Ansaugen von Flüssigkeiten können 10 % des Wasserdurchflusses als Flüssigkeit eingetragen werden.
- 15 m³ Lufteintrag über ein Venturi benötigen ca. 1 kWh elektrische Energie.

4.4.7 Ozonierung

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Desinfektion des Zulaufwassers	Kreislaufanlagen, Satzfishzuchten	
Reduktion der organischen Belastung	Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

Ozon muss wegen seiner geringen Stabilität am Ort des Einsatzes erzeugt werden. Hierfür werden oft Corona-Generatoren mit Sauerstoff eingesetzt. Alternativ kann Ozon mittels UV-C-Strahlung (185 nm) und Luft oder Sauerstoff produziert werden. Das produzierte Ozon wird in ozonbeständigen Leitungen der Einmischstation zugeführt. Zur Einmischung sind alle gängigen Technologien zum Eintrag von Reinsauerstoff möglich (Venturi, Konus, LHO etc.). Für einen wirksamen Einsatz des Ozons muss in einem Reaktionsgefäß eine konstante Ozonkonzentration erreicht werden. Diese liegt meist im Bereich von 0.1 bis 2 mg l⁻¹, wobei Kontaktzeiten von 1 bis 30 min angestrebt werden [52]. Dosierung und hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktionsgefäß sind von der benötigten Dosis, dem angestrebten Ziel und der Wasserqualität abhängig. Trotz der guten Löslichkeit von Ozon enthält das Restgas der Einleitung noch Ozon und muss zur Sicherheit der Mitarbeitenden durch eine Ozonvernichtung geleitet werden. Das Restozon im Wasser muss ebenfalls über eine Restozonvernichtung geleitet werden. Hierfür kann das Wasser durch eine UV-Anlage, Aktivkohle, und/oder einen Biofilter mit hoher organischer Belastung geleitet werden.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

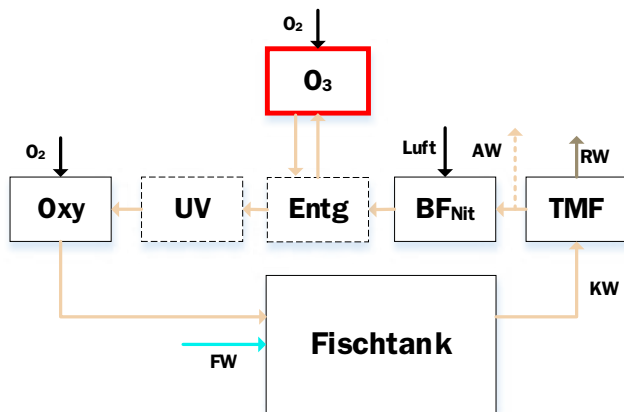
Ozon kann für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden. Zur Behandlung von Frischwasser kann Ozon zur Desinfektion verwendet werden. Meist ist dies bei Satzfishzuchten und Kreislaufanlagen der Fall. Zur Verbesserung der Wasserqualität in Kreislaufanlagen kann Ozon die Flockulation von kleinen Partikeln unterstützen, wodurch diese besser über die Feststoffabscheidung entfernt werden können. Dieser Effekt wird beim Eintrag von Ozon in Proteinskimmern eingesetzt, die im Bypass zum Hauptvolumenstrom betrieben werden. Weiter kann Ozon mikrobiell nicht abbaubare organische Stoffe so weit oxidieren, dass diese Stoffe im Biofilter mikrobiell abgebaut werden können. Dadurch reduziert sich die Färbung des Wassers, die UV-Transmission steigt und UV-Systeme werden leistungsfähiger. Ein weiterer Effekt der Ozonierung ist, dass olfaktorisch wahrnehmbare Stoffe wie Geosmin eliminiert und so Off-Flavour (mod-

riger Fehlgeschmack) in den Fischen verringert wird. Neben organischen Stoffen oxidiert Ozon auch Nitrit zu Nitrat, und unterstützt somit in Kreislaufanlagen die mikrobielle Biofiltration. Beim Ausschalten von Ozonanlagen kann es dadurch zu einem Anstieg von Nitrit kommen.

Ozon kann bei unsachgemäßer Anwendung für Mensch und Tier **sehr gefährlich sein!**



- Ozon kann unter anderem vom Reaktor zu den Tieren gelangen, wenn:
 - die Barriere (UV, granulierte Aktivkohle, Entgasung etc.) nicht richtig funktioniert;
 - Ozon wegen fehlerhafter Mess-/Regeltechnik überdosiert wird;
 - länger nach der Fütterung keine Reaktionspartner mehr für Ozon bestehen (d. h. wenn das Wasser zu klar ist).
- Sowohl bei der Produktion (Ozongenerator) wie auch aus dem angereicherten Wasser kann Ozon in die Raumluft entweichen und bei Einatmung schwere Gesundheitsschäden verursachen. Diese Bereiche sind mittels Ozonsensoren (Raumluft) entsprechend zu alarmieren. Des Weiteren müssen diese Räume gut gelüftet sein und das Restozon muss über Restozonvernichter (Mangandioxid oder Aktivkohle) zerstört werden.



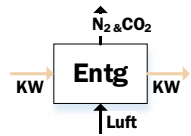
Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Je geringer der Wasseraustausch einer Kreislaufanlage, desto mehr reichern sich mikrobiell nicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen im Abwasser an. Die dadurch erhöhten DOC-Werte können oft nur durch Ozonierung und erneute mikrobielle Filtration aus dem Wasser entfernt werden.

- Ein kg Ozon benötigt zur Herstellung mittels einem Corona-Generator ca. 10 kg trockenen Reinsauerstoff und 10 kWh elektrische Energie.
- In Kreislaufanlagen werden zur Verbesserung der Wasserqualität 2 bis 20 g Ozon pro kg Futter eingesetzt.

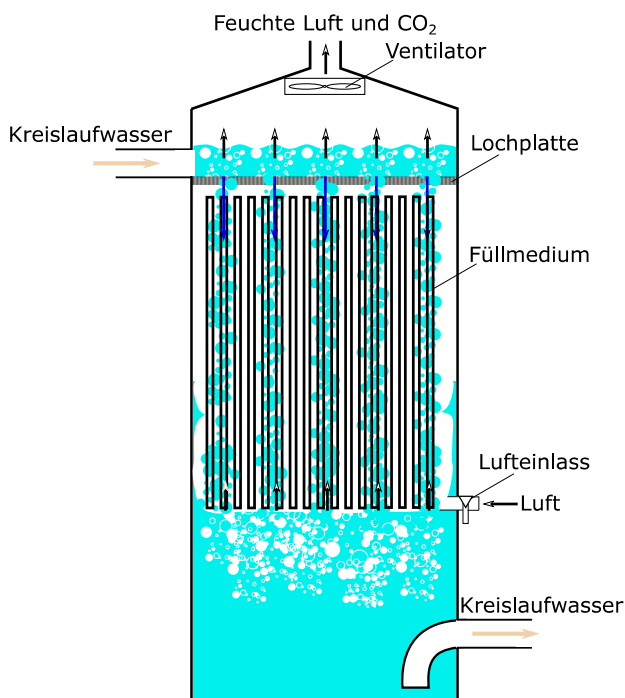
Gut zu wissen

4.4.8 Entgasung

Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Fremdgasentfernung (CO ₂ , N ₂)	Kreislaufanlagen	

Funktionsprinzip

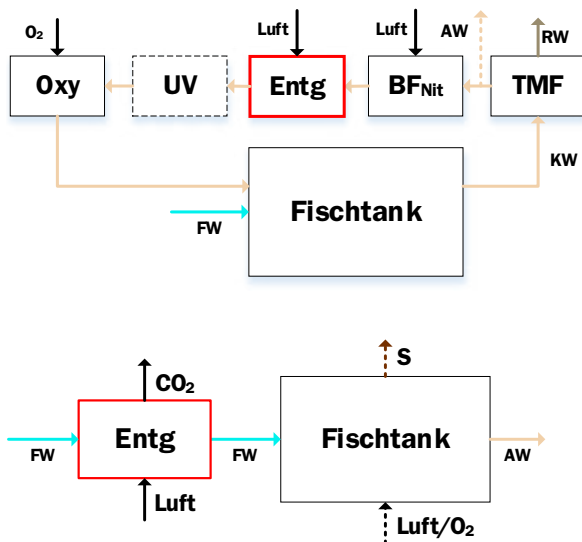
Die Entgasung funktioniert ähnlich wie der Sauerstoffeintrag, nur in die andere Richtung: Die Kontaktfläche zwischen Gas und Wasser wird so weit vergrössert, dass innerhalb kurzer Zeit viel Gas aus dem Wasser austreten kann. Im Vergleich zum Gaseintrag muss aber der Volumenunterschied zwischen Gas und dem Wasser deutlich grösser sein (500 bis 1000%). Die atmosphärische CO₂-Konzentration ist tief und die durchströmende Luft daher schnell gesättigt. In den meisten Technologien wird das CO₂-haltige Wasser in einen Behälter mit mehreren aufeinanderfolgenden perforierten Platten oder einer Art Füllkörper geführt, worin sich die benötigte Oberfläche zwischen Gas- und Wasserphase entwickeln kann. Luft wird aktiv in den Behälter gepumpt und fliesst entgegengesetzt zur Flussrichtung des Wassers; dadurch wird ein konstanter Konzentrationsgradient von CO₂ zwischen Wasser und Luft erreicht, der die CO₂-Ausgasung begünstigt. Bei hohen Feststoff- und DOC-Konzentrationen im Kreislaufwasser sollte eine Entgasung ohne Füllkörper verwendet werden, weil die Füllkörper als ideale Wachstumsfläche für Mikroorganismen dienen (Fouling), was zu Verstopfungen führen kann.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Eine eigens dafür vorgesehene Entgasung wird vermehrt in intensiven Systemen benötigt (>60 kg m⁻³ Besatzdichte), in denen die Entgasungswirkung von Belüftungssystemen und Biofiltern (z. B. Rieselfilter oder Bewegtbettfilter) nicht mehr genügt, um das im Wasser enthaltene CO₂ zu entfernen. Das Entwicklungsstadium der Tiere kann einen grossen Einfluss auf die CO₂-Empfindlichkeit haben. Zusätzlich kann eine Entgasung auch nötig sein, wenn das verwendete Frischwasser grosse Mengen CO₂ enthält.



Neben der Extraktion von CO_2 dient die Entgasung auch zur Kontrolle der Stickstoffübersättigung. Diese kann ihren Ursprung im Eintrag von Luft oder Luft-Sauerstoff-Gemischen unter hohem Druck haben. Mögliche Quellen sind Leckagen oder Lufteintritte vor Pumpen, was innerhalb der Pumpe, der Leitung oder einem Konus zur Anreicherung mit Stickstoffgas führt. Weiter kann der Eintrag von Luft in Bewegtbettfiltern zu Stickstoffübersättigung führen, wenn der Eintrag zu tief erfolgt. Lufteintrag bei mehr als 200 mbar Gegendruck sollte vermieden werden.

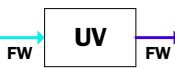
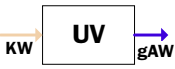
Einsatz in der Ablaufwasserreinigung

Mögliche Vorteile zu einer Reduktion der Wasserbelastung ergeben sich durch eine höhere Fresslust und somit geringere Futterverluste bzw. bessere Futterverwertung.

- Entgaser sind auf eine Packungshöhe von 1 bis 1.5 m limitiert, da der Prozess bei grösseren Höhen ineffizient wird.
- Die hydraulische Belastungsrate liegt zwischen 0.61 bis $2.51 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ [6].
- Das Verhältnis von einströmendem Gas zu Wasser sollte zwischen 5:1 und 10:1 liegen.
- Abluft der Entgasungstechnologien unbedingt ausserhalb von Gebäuden entlüften, weil ansonsten ein gefährlicher Anstieg von CO_2 der Innenluft entstehen kann.

Gut zu wissen

4.4.9 UV-Bestrahlung

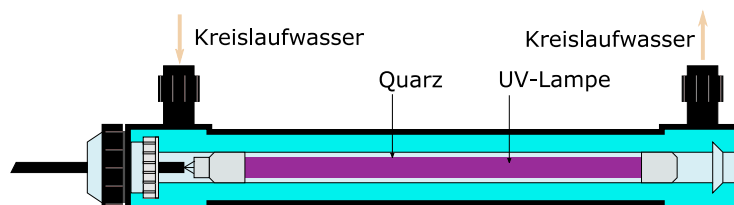
Einsatzbereich	Anlagentypen	Massenflüsse
Frischwasserdesinfektion	Satzfischzuchten, Kreislaufanlagen	
Keimreduktion	Kreislaufanlage	

Funktionsprinzip

UV-C-Strahlung wird entweder von Nieder- oder Mitteldruck-Quecksilberdampflampen erzeugt, welche durch ein Quarzhüllrohr vom Wasser getrennt sind. Die Lampe hat einen maximalen Wirkungsgrad bei einer definierten Temperatur, welche vom Betrieb der Lampe, der Umhüllung sowie der Wassertemperatur abhängt. Ausserhalb dieses Optimalbereichs verliert die Lampe schnell an Wirkung.

Die UV-Strahlung passiert das Quarzglas und soll im Wasser die DNA von pathogenen Organismen schädigen. Je nach Organismus sind unterschiedlich hohe Dosen nötig. Zwischen Lichtquelle und Zielort passiert die Strahlung das Wasservolumen. In diesem wird die Strahlung von organischen Verbindungen (gelöst und partikulär) absorbiert. Je mehr solcher Verbindungen im Wasser vorhanden sind, desto mehr Strahlung geht verloren. Die UV-Absorption dieser gelösten Stoffe wird über den Spektralabsorptionskoeffizienten (SAK) in gefiltertem Wasser oder den spektralen Schwächungskoeffizienten (SSK) in ungefiltertem Wasser bei jeweils 254 nm beschrieben und kann mit vielen Photometern gemessen werden. Der SAK bzw. SSK des zu behandelnden Wassers ist neben der benötigten Dosis der Zielorganismen die wichtigste Grundlage zur Auslegung von UV-Anlagen.

Zur Maximierung der Wirksamkeit werden UV-Anlagen nach mechanischen Filtrationsstufen eingesetzt. Je nach Betriebsform können die UV-Anlagen als geschlossene Systeme unter Druck oder als Kanalsysteme unter Gravitation betrieben werden.



© ZHAW

Einsatz in der Aquakultur

Die Behandlung kann unterschiedlichen Zwecken dienen. Bei der Behandlung des Zulaufwassers soll dieses desinfiziert werden, d. h. zu 100% keimfrei sein, damit keine Keime in die Anlage eingetragen werden. Durch die geringe organische Belastung sind hohe UV-Dosen möglich. Die Behandlung erfolgt meist in geschlossenen Reaktoren, wo interne Blenden eine Mischung und die Behandlung des gesamten Wasserkörpers garantieren.

Wird Wasser in Kreislaufanlagen aufbereitet, reichern sich viele organische Stoffe an, welche den SAK erhöhen und die UV-Transmission verringern. Deshalb wird im Kreislauf nur eine Keimreduktion angestrebt. Um den Keimdruck tief zu halten, müssen die Zielorganismen schneller abgetötet werden als sie sich wieder vermehren können. Die UV-Anlagen werden entweder in einem Bypass oder im Vollkreislauf eingebaut. Es ist wichtig, dass die sich aus Transmission und hydraulischer Aufenthaltszeit ergebende UV-Dosis genügend hoch ist, um die erforderliche Keimreduktion zu erreichen. Ist die Dosis zu tief (zu hoher Durchfluss, zu tiefe Transmission), kann es zu einer selektiven Keimreduktion kommen, wodurch sich die mikrobielle Gemeinschaft verändern kann.

5 OPTIMIERUNGSHILFEN

Eine Reduktion von Emissionen aus Aquakulturanlagen kann unterschiedliche Beweggründe haben. Es können Einleitwerte überschritten sein (**Behördensicht**), der Betrieb möchte mehr produzieren bei gleichen Emissionsmengen (**Betreibersicht**), oder die systeminternen Wasserparameter sollen für eine effizientere Produktion verbessert werden (**Planersicht**).

Oft stellt ein spezifischer Wasserparameter ein grösseres Problem dar, während andere eine geringere Rolle spielen. Getroffene Massnahmen sollten deshalb zielgerichtet und kosteneffizient diesen Parameter verbessern. Die nachfolgenden Optimierungshilfen sollen dabei helfen, durch betriebliche und technische Massnahmen für diesen Parameter wirtschaftliche Lösungen zu finden. Hierbei leiten sie den Nutzer durch einen Entscheidungsbaum, um Ursachen und Lösungen zur Reduktion des betreffenden Wasserparameters zu finden. Die hier aufgeführten Optimierungshilfen sind nicht als abschliessende oder zwingend anzuwendende Vorgehensweise zu verstehen, sondern sind ein grundsätzliches Hilfsmittel zur Emissionsreduktion und Anlagenoptimierung.

Bei den Entscheidungsbäumen wird beim Kasten mit der Nummer 1 gestartet und fortlaufend die beschriebenen Schritte durchgeführt, bis eine Massnahme den gewünschten Effekt aufzeigt (z. B. Feststoffe zu hoch → Trommelfiltersieb verstopft → Trommelfilter gereinigt → Feststoffkonzentration sinkt). Sofern eine Massnahme noch nicht den gewünschten Effekt zeigt, kann der Entscheidungsbaum erneut angewendet werden, bis eine Massnahme zum gewünschten Effekt führt. Ist eine Massnahme erfolgreich, kann der Entscheidungsbaum an dieser Stelle abgebrochen werden. Es wurde aus Darstellungsgründen bewusst auf einen separaten Pfeil zu einem Kasten «Problem gelöst» verzichtet.

Eine Reduktion der Futtermenge sollte immer das letzte Mittel sein, da dies die wirtschaftliche Grundlage des Betriebes betrifft. Nur wenn keine anderen Massnahmen erfolgreich waren, ist die Reduktion der Fütterung und/oder des Besatzes zu erwägen. Deshalb findet sich diese Massnahme immer am Schluss jeder Optimierungshilfe.

5.1 Phosphor (Phosphat)

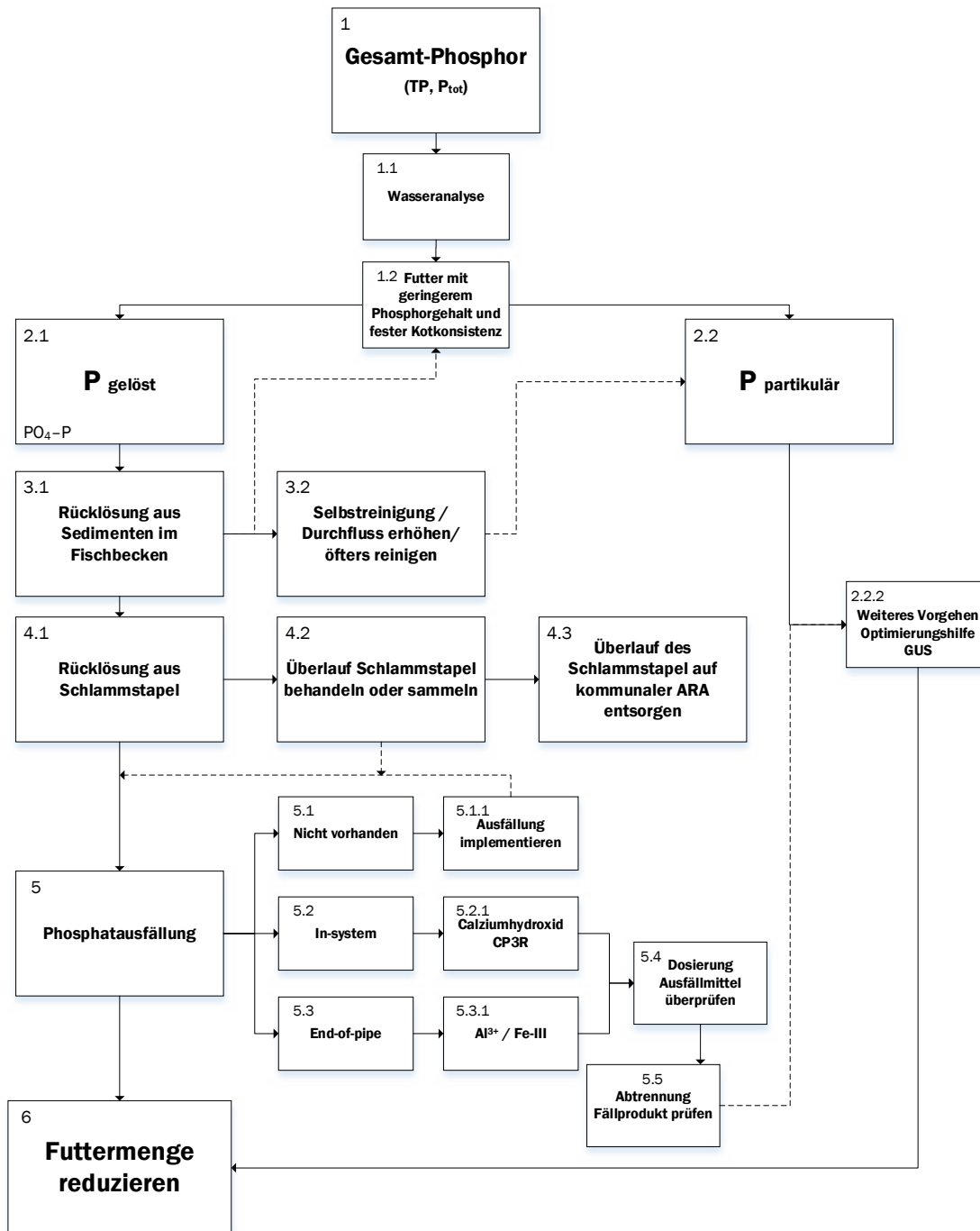
Phosphor ist einer der häufigsten Parameter, der Massnahmen zur Behandlung des einzuleitenden Wassers aus Fischzuchten erfordert. Bei einer Überschreitung des Gesamtphosphors (**TP, P_{tot}** ^{→1}) zeigt eine genauere **Wasseranalyse**^{→1.1} die Anteile von gelöstem (**$P_{\text{gelöst}}$** ^{→2.1}) und partikulärem Phosphor (**$P_{\text{partikulär}}$** ^{→2.2}). Die Wahl eines **Futtermittels mit geringerem Phosphorgehalt**^{→1.2} bei gleichen Wachstumsleistungen wäre eine effiziente Methode zur Reduktion der Belastungsquelle, jedoch ist dies oft für die spezifische Fischart nicht in geeigneter Qualität verfügbar. Falls ein Wechsel des Futtermittels keine Verbesserungsmöglichkeit darstellt (siehe Kapitel Futtermittel), sind andere Massnahmen nötig. Bei hohen Werten von partikulärem Phosphor soll das weitere Vorgehen gemäss der Optimierungshilfe für GUS erfolgen (**weiteres Vorgehen Optimierungshilfe GUS**^{→2.2.2}).

Finden sich erhöhte Werte von gelöstem Phosphor (**$P_{\text{gelöst}}$** ^{→2.1}) im Wasser, so ist zu prüfen, ob eine **Rücklösung aus Sedimenten im Fischbecken**^{→3.1} vorliegt, und ob durch eine **Erhöhung der Selbstreinigung**^{→3.2} ein höherer Anteil an Phosphor partikulär bleibt und mechanisch dem Wasser entnommen werden kann. Finden sich keine Verbesserungen innerhalb der Fischbecken oder durch den Einsatz eines Futtermittels mit besseren Koteigenschaften (z. B. mit Kotbinder) (siehe ^{→1.2} und ^{→3.1}), so kann überprüft werden, ob eine **Rücklösung aus dem Schlammstapel**^{→4.1} eine Ursache ist. In diesem Fall soll der Überlauf aus dem Schlammstapel behandelt oder **gesammelt**^{→4.2} werden, oder dieser **in einer kommunalen ARA entsorgt**^{→4.3} werden.

Eine chemische Phosphatfällung ist nur bei Kreislaufanlagen mit geringem Wasseraustausch sinnvoll einsetzbar. Bei Durchlaufanlagen sind die Phosphatkonzentrationen zu gering. Bei Kreislaufanlagen sollte auch die Grösse der Anlage in die Entscheidung miteinbezogen werden, um eine verhältnismässige Lösung zu finden. **Besteht keine Fällung**^{→5.1}, kann der Einbau einer chemischen Phosphorfällung geprüft werden.

Abbildung 4

Entscheidungsbaum zur Reduktion der Konzentration von partikulärem und gelöstem Phosphor im Abwasser von Aquakulturanlagen.



Hierbei sind **in den Betrieb integrierte Lösungen** $\rightarrow$ 5.2 mit **Calciumhydroxid** $\rightarrow$ 5.2.1 und **End-of-pipe-Lösungen** $\rightarrow$ 5.3 mit **Aluminium oder Eisensalzen** $\rightarrow$ 5.3.1 möglich. Sind solche Systeme bereits in Betrieb und die Phosphorwerte trotzdem hoch, so sind sowohl die **Dosierungen der Fällmittel** $\rightarrow$ 5.4 wie auch die korrekte nachträgliche **Abtrennung der Fällprodukte** $\rightarrow$ 5.5 zu prüfen. Gerade letzteres kann übersehen werden, wenn in der betrieblichen Selbstkontrolle nur Phosphat und nicht der Gesamtphosphor im Abwasser gemessen wird, weil gefällter Phosphor auch in feinpartikulärer Form noch im Abwasser vorliegen kann.

Eine **Reduktion der Futtermenge** $\rightarrow$ 6 ist zu vermeiden, indem die vorangehenden Massnahmen umgesetzt werden.

5.2 Stickstoff

Stickstoff N_{tot} ^{→1} (gesamter Stickstoff) kann im Abwasser in verschiedenen Formen vorkommen, welche sich in die zwei Hauptgruppen $N_{\text{gelöst}}$ ^{→2.1} (gelöster Stickstoff) und $N_{\text{partikulär}}$ ^{→2.2} aufteilen lassen. Als erste Massnahme sollte immer überprüft werden, ob durch ein **optimiertes Futter**^{→1.1} eine Verbesserung der Futterverwertung möglich ist (vergl. Kapitel 4.2 «Vermeidung von Emissionen»).

Ein Grossteil der Stickstoffemissionen aus gefressenem Futter erfolgt zwar in gelöster Form, Sedimente aus Kot und Futterresten können jedoch, wenn sie mineralisieren, eine Quelle von zusätzlichem gelöstem Stickstoff darstellen. Aus diesem Grund ist ein wichtiger erster Schritt die Überprüfung, ob innerhalb der Anlage eine **Mineralisierung von Kot oder Futterresten**^{→2.1.1} stattfindet. Die **Erhöhung der Selbstreinigung**^{→2.1.1} hilft, die Mineralisierung zu reduzieren.

Gelöster Stickstoff liegt in drei Stoffformen vor: **Ammonium**^{→3.1} (NH_4^+), **Nitrit**^{→3.2} (NO_2^-) und **Nitrat**^{→3.3} (NO_3^-). Wenn der problematische Stoff im Abwasser unbekannt ist (?^{→3.4}), dann empfiehlt sich, eine Abwasseranalyse durchzuführen, da ansonsten keine spezifischen Massnahmen zur Problemlösung durchgeführt werden können. Wenn **Ammonium**^{→3.1} oder **Nitrit**^{→3.2} die problematischen Stoffe im Abwasser sind, kann die Ursache dafür durch die Optimierung oder den Neubau einer **Nitrifikation**^{→4} behoben werden. Dies sollte weitere Massnahmen überflüssig machen (**Futtermenge reduzieren**^{→6}).

Eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit der **Nitrifikation**^{→4} kann eine Vielzahl von Ursachen haben, welche nicht abschliessend in diesem Leitfaden aufgelistet werden können. Die folgenden Punkte sind eine Auswahl der häufigsten Ursachen: **Durchfluss zu gering**^{→4.1}: Oft liegt der Grund für die zu hohe Ammoniumkonzentration im Fischbereich in der Durchflussmenge durch den Biofilter und nicht in dessen theoretischer Leistungsfähigkeit an sich. Dies zeigt sich, wenn der Biofilter eine hohe Zuflusskonzentration hat, die Abflusskonzentration von Ammonium aber sehr tief ($<0.1 \text{ mg l}^{-1}$) ist. Als Massnahme kann durch eine Erhöhung der Umwälzrate die Aufenthaltszeit des Wassers im Reaktor reduziert werden (**Aufenthaltszeit reduzieren**^{→4.1.1}). Dadurch wird auch die Menge an Ammonium, welche durch den Reaktor passiert erhöht. **Durchmischung zu gering**^{→4.2}: Der vorhandene Sauerstoff und das Ammonium oder Nitrit stehen für die Nitrifizierer in Teilen des Biofilters nicht zur Verfügung, was zu geringer Nitrifikationsleistung führt. Die Durchmischung von Bewegtbettfiltern kann erhöht werden, indem die volumetrische Menge an Druckluft, welche in den Biofilter eingetragen wird, erhöht wird oder die Luft grobblasiger eingetragen wird. Gegebenenfalls kann über einen Luftheber die Durchmischung weiter verbessert werden (**Durchmischung erhöhen**^{→4.2.1}). Eine Abweichung vom pH-Optimum (**pH nicht im Optimum**^{→4.3}) führt im stark basischen pH-Bereich dazu, dass die Nitrifizierer (wie auch die Fische) toxischem Ammoniak ausgesetzt sind. Im tiefen pH-Bereichen (<7) verschlechtert sich die Ammoniumoxidation zu Nitrit generell, da H^+ als Produkt dieser Reaktion die Reaktionsrate reduziert. Als Massnahme kann bei Kreislaufanlagen das Anlagenwasser zur Steigerung der Alkalinität chemisch gepuffert werden. Generell soll die Alkalinität des Anlagenwassers $100 \text{ mg l}^{-1} \text{ CaCO}_3 \text{ eq}$ ¹⁷ nicht unterschreiten. Wenn die Konzentration von leicht abbaubarem organischem Material zu hoch ist (**C_{BSB_5} im Einlauf zu hoch**^{→4.4}), kann dies zu einem überproportionalen Wachstum von heterotrophen Bakterien¹⁸ im Biofilter und somit zu einer Verdrängung der Nitrifizierer führen. Als Massnahme muss die Einlaufkonzentration an leicht abbaubarer organischer Substanz verringert werden (siehe Optimierungshilfe Kohlenstoff und GUS).

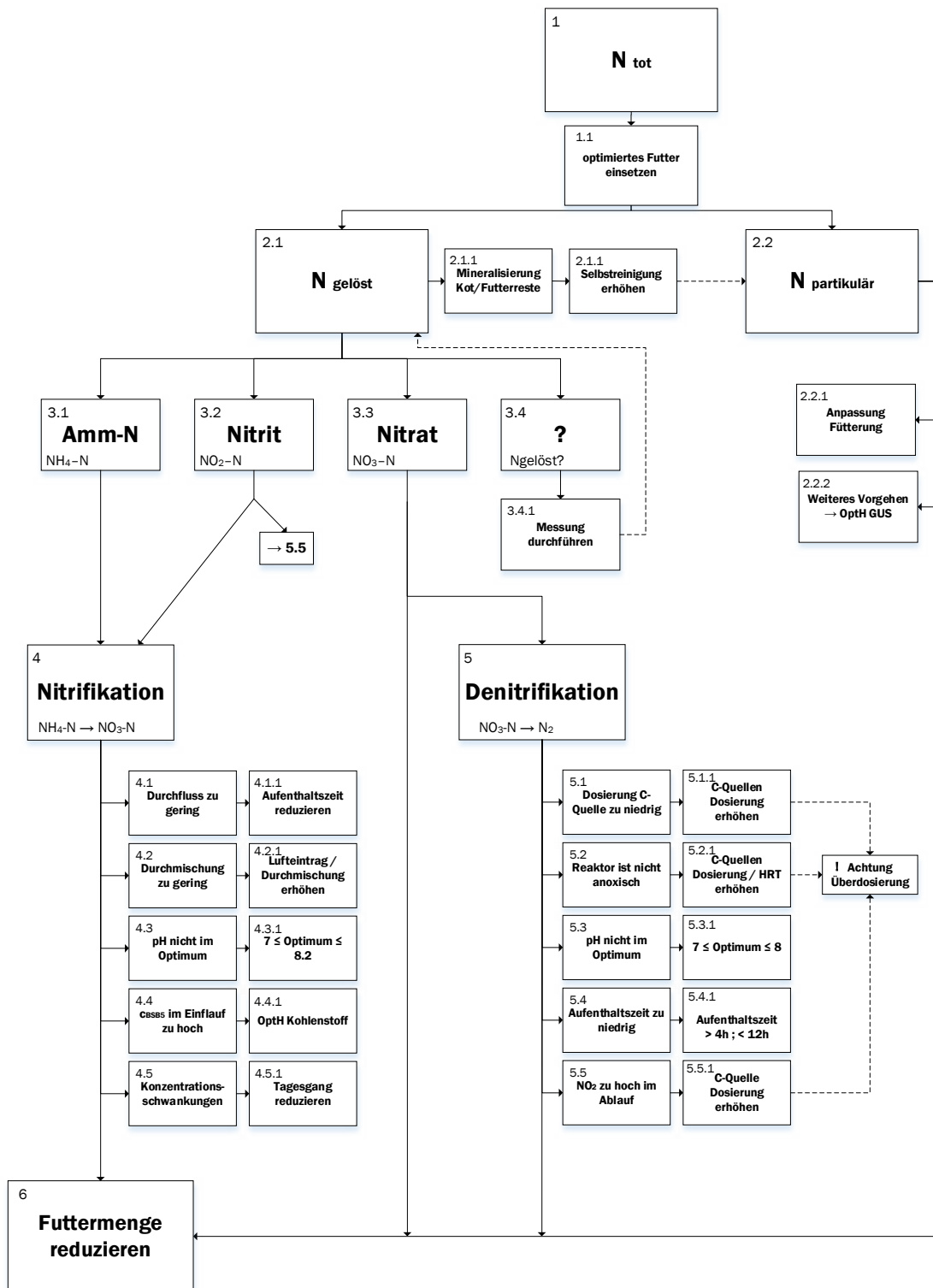
Die Leistungsfähigkeit des Biofilters ist abhängig von der Anzahl und der Aktivität der Nitrifizierer. Die Aktivität reduziert sich, wenn die Verfügbarkeiten von Sauerstoff, Ammonium und Nitrit abnehmen, die Temperatur sinkt oder sich Produkte der Nitrifikationsreaktionen anreichern (tiefer pH, hohe Nitratwerte). Für eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit sollen deshalb die Wasserparameter so konstant wie möglich gehalten werden. Dies gilt auch für den Tagesverlauf. Nach einer längeren Fütterungspause sinkt die Ammoniumkonzentration im Anlagenwasser und der Biofilter reduziert seine Leistung. Bei einer punktuellen Fütterung steigt die Ammoniumausscheidung der Fische stark an und der Biofilter bzw. die Bakterien benötigen Zeit, bis ihre Aktivität wieder steigt. Dies führt zu kurzzeitigen hohen **Konzentrationschwankungen**^{→4.5} innerhalb der Anlage (Fischwohl beachten) wie auch zu erhöhten Werten im

¹⁷ Die Alkalinität wird als Äquivalent der Menge Kalk (CaCO_3) im Wasser ausgedrückt. Die verwendeten Puffersubstanzen können in deren spezifisch notwendige Menge Kalk-Äquivalent umgerechnet werden (z. B. 37 mg/l Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3 , Backpulver) entsprechen einem Milliäquivalent (meq) Alkalinität pro Liter Wasser (Timmons und Ebeling, 2010, S.57).

¹⁸ Heterotrophe Bakterien bauen organische Substanz ab.

Abbildung 5

Entscheidungsbaum zur Reduktion von partikulärem und gelöstem Stickstoff innerhalb und im Ablaufwasser von Aquakulturanlagen.



Abwasser. Eine gleichmässige Fütterung über den Tagesverlauf und eine Vermeidung der Fütterung aller Becken zur selben Zeit (**Tagesgang reduzieren** → 4.5.1) verringert in Kreislaufanlagen und Durchlaufanlagen das Risiko von Konzentrationsspitzen im Ablaufwasser. Muss das Futter über längere Zeit ausgesetzt werden (z. B. wegen einer Sortierung) kann es sich lohnen, den Biofilter weiter mit Ammoniumdünger zu versorgen (30–50 g $\text{NH}_4\text{-N}$ pro kg Futter). Dieser soll gleichmässig über den Tagesverlauf zugegeben werden, um die Leistungsfähigkeit der Nitrifizierer zu erhalten.

Eine zu hohe Nitratkonzentration (**Nitrat** → 3.3) im Abwasser von Fischzuchten ohne Denitrifikation oder ohne zusätzlichen Wasseraustausch kann generell nur mit einer Optimierung der Fütterung reduziert werden (**Futtermenge reduzieren** → 6), falls keine Denitrifikation installiert wird. Nitratkonzentrationen sind aber bei Fischzuchten meistens kein limitierender Faktor im Gewässerschutz.

In Anlagen mit integrierter Denitrifikationsstufe (**Denitrifikation** ^{→5}) kann eine Reduktion der Leistungsfähigkeit des Reaktors wiederum eine Vielzahl möglicher Ursachen haben. Die folgenden Punkte sind eine Auswahl der häufigsten Ursachen: Eine Unterdosierung der verwendeten Kohlenstoffquelle (z. B. Methanol, Ethanol oder Glycerin) (**Dosierung C-Quelle zu niedrig** ^{→5.1}) führt dazu, dass nicht genügend Elektronen zur Reduktion des Nitrats vorhanden sind und somit auch eine hohe Nitratkonzentration im Ablauf vorhanden ist. Eine Unterdosierung kann sich auch durch oxische Bedingungen im Auslauf des Denitrifikationsreaktors (**Reaktor ist nicht anoxisch** ^{→5.2}) bemerkbar machen¹⁹. In beiden Fällen (^{→5.1}, ^{→5.2}) kann die Dosierung der Kohlenstoffquelle erhöht werden (**C-Quellen-Dosierung erhöhen** ^{→5.1.1}). Ein weiterer Grund, dass im Reaktor trotz ausreichender Dosierung der Kohlenstoffquelle keine anoxischen Bedingungen erreicht werden können, liegt an einer zu tiefen Aufenthaltszeit im Reaktor (**Aufenthaltszeit erhöhen** ^{→5.2.1}). Bei einer Anpassung der Dosierung der Kohlenstoffquelle ist es wichtig, dass die DOC- oder BSB₅-Konzentrationen fortlaufend überprüft wird, da eine Ausschwemmung der Kohlenstoffquellen aus dem Denitrifikationsreaktor, besonders bei fischtoxischen Kohlenstoffquellen wie z. B. Methanol, zu schwerwiegenden Auswirkungen auf den Fischbestand (z. B. Appetitlosigkeit und bei extremer Überdosierung Tod) sowie zu einer starken Abwasserbelastung führen können. Bei hohen Nitratkonzentration im Ablauf des Denitrifikationsreaktors trotz korrekter Kohlenstoffquellendosierung kann als Ursache eine zu geringe hydraulische Aufenthaltszeit vorliegen (**Aufenthaltszeit zu niedrig** ^{→5.4}), in diesem Fall kann die hydraulische Aufenthaltszeit erhöht werden (**Aufenthaltszeit erhöhen** ^{→5.4.1}). Als Faustregel kann eine hydraulische Aufenthaltszeit zwischen 4 und 12 h angewendet werden, jedoch ist dies stark vom gewünschten Nitrat-Konzentrationsgradienten zwischen Einlauf und Ablauf, dem Reaktorvolumen und dem Reaktortyp abhängig und muss daher von Fall zu Fall einzeln überprüft werden. Eine Abweichung vom pH-Optimum (**pH nicht im Optimum** ^{→5.3}) führt im basischen pH Bereich (>8) dazu, dass sich die Denitrifikationsleistung generell verschlechtert. Als Massnahme kann der pH gepuffert werden. Eine reduzierte Nitratkonzentration bei einer gleichzeitigen hohen Nitritkonzentration im Auslauf des Denitrifikationsreaktors (**NO₂ zu hoch im Ablauf** ^{→5.5}) deutet auf eine zu geringe Dosierung der Kohlenstoffquelle hin (**C-Quellen Dosierung erhöhen** ^{→5.5.1}). Eine Reduktion der Futtermenge sollte durch die vorangehenden Massnahmen verhindert werden können (**Reduktion Futtermenge** ^{→6}).

Emissionen von partikulärem Stickstoff (**N_{partikulär}** ^{→2.2}) können mit einer Reduktion des Proteingehalts im Futter, einer Reduktion der Futterverluste und einem besser verdaulichen Futter reduziert werden (**Anpassung der Fütterung** ^{→2.2.1}). Das weitere Vorgehen bei hohen partikulären Emissionen ist in der Optimierungshilfe GUS beschrieben (**Weiteres Vorgehen** ^{→2.2.2}).

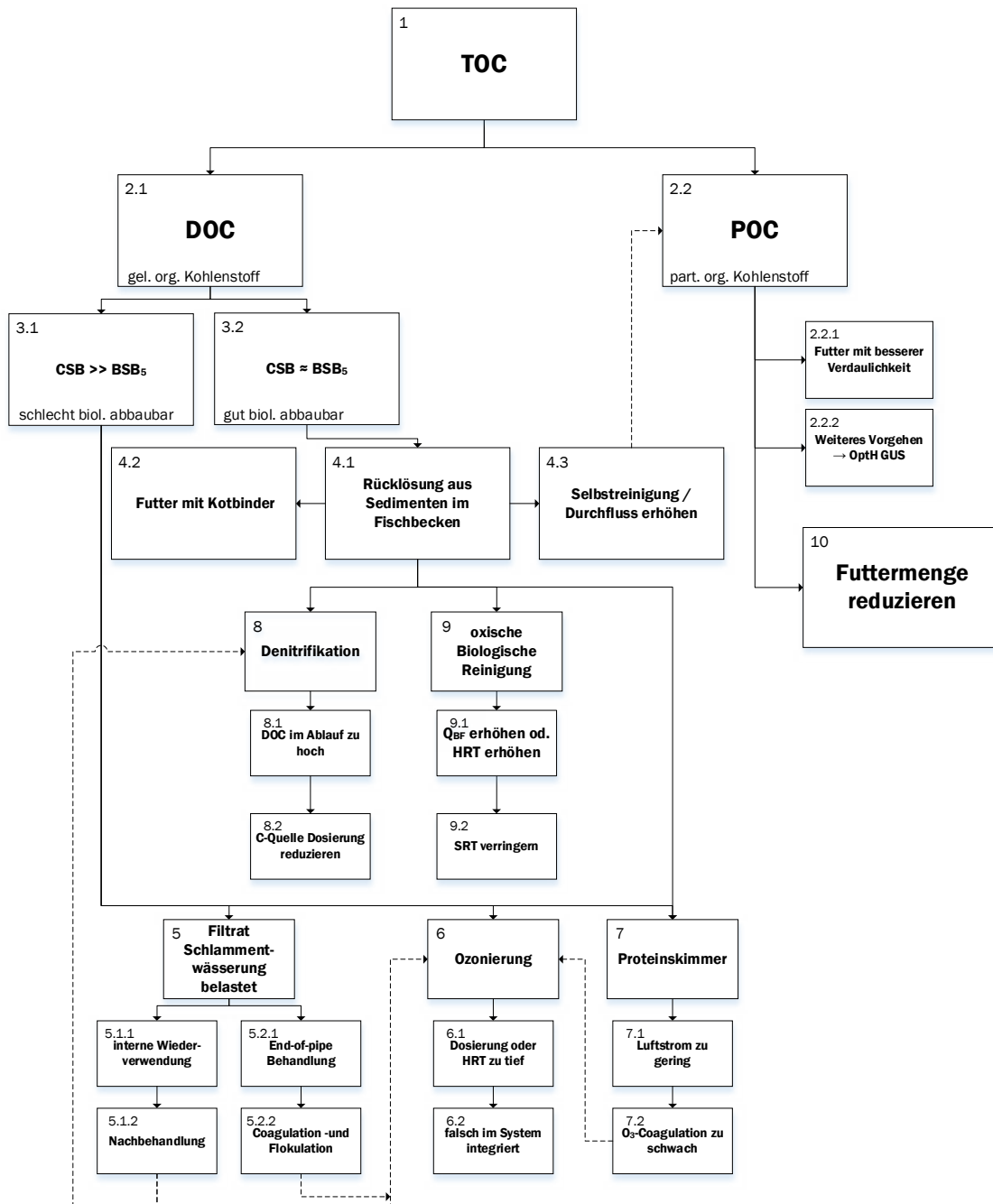
5.3 Kohlenstoff

Eine erhöhte Belastung mit organischem Kohlenstoff (gesamter organischer Kohlenstoff, **TOC** ^{→1}) kann entweder auf gelösten organischen Kohlenstoff, inklusive kolloidaler Partikel <0.45 µm, (**DOC** ^{→2.1}) oder auf partikulären organischen Kohlenstoff >0.45 µm (**POC** ^{→2.2}) zurückgeführt werden. Eine Wasseranalyse von DOC und TOC kann aufzeigen, ob DOC oder POC (POC = TOC – DOC) das Hauptproblem sind. Liegt eine erhöhte Belastung durch DOC vor, lohnt sich eine zusätzliche Analyse von BSB₅ und CSB. Ist der CSB deutlich höher als der BSB₅, so handelt es sich beim gemessenen DOC um schwer bis nicht abbaubare Substanzen (**CSB >> BSB₅** ^{→3.1}). Entspricht der CSB ca. dem BSB₅ (**CSB ≈ BSB₅** ^{→3.2}), dann ist die organische Substanz gut abbaubar. Je nach Ergebnis dieser Analyse sind unterschiedliche Massnahmen möglich. **CSB >> BSB₅** findet man vorwiegend in Kreislaufsystemen mit einem hohen Rezirkulationsgrad. Die biologischen Reinigungsschritte haben den leicht abbaubaren Kohlenstoff bereits abgebaut, und es reichern sich nicht abbaubare Stoffe an. Durch reine biologische Reinigungsverfahren können diese nicht weiter entfernt werden. Eine Handlungsmöglichkeit ist, das Filtrat der Schlammmentwässerung (**Filtrat Schlammmentwässerung belastet** ^{→2.2}) weiter zu behandeln. Hierfür besteht die Möglichkeit einer **internen Wiederverwendung** ^{→2.2}, z. B. als substratreiches Zulaufwasser der **Denitrifikation** ^{→8}. Nur ein Teil dieses DOC ist abbaubar. Ein Teil verbleibt als nicht abbaubarer DOC im System und kann über eine **Ozonierung** ^{→6} weiter aufbereitet werden. Bei einer **End-of-pipe-Behandlung** ^{→5.2.1} des Filtrats kann durch Zugabe von **Koagulations- und Flockungsmitteln** ^{→5.2.2} die Abscheidung von kolloidalen Partikeln verbessert werden.

¹⁹ Faustregel: Denitrifikation findet statt ab <0.3 mg O₂/l

Abbildung 6

Entscheidungsbaum zur Reduktion von partikulärem und gelöstem Kohlenstoff innerhalb und im Ablaufwasser von Aquakulturanlagen.



Eine **Ozonierung** →⁶ macht dann Sinn, wenn ein nahezu feststofffreies Wasser zur Verfügung steht. Der DOC wird durch die Ozonierung nicht komplett oxidiert, aber die Abbaubarkeit wird so weit erhöht, dass ein weiterer Abbau im Biofilter möglich ist. Gängige Probleme sind eine zu tiefe Dosierung von Ozon, oft verbunden mit einer zu tiefen hydraulischen Aufenthaltszeit (**Dosierung oder Aufenthaltszeit [HRT] zu tief** →^{6.1}). Dadurch stellt sich im Reaktor keine ausreichend hohe Ozonkonzentration ein, wodurch die gewünschte Oxidationswirkung nicht eintritt. Weiter kann die Ozonierung **falsch im System integriert** →^{6.2} sein. Wenn das Zulaufwasser leicht abbaubare organische Substanz enthält, bleibt zu wenig Ozon für die Zielstoffe übrig. Die Ozonierung sollte stets mit dem Wasser mit dem tiefsten BSB₅ beschickt werden.

Proteinskimmer →⁷ sind für die Entfernung von leicht und schwer abbaubaren Stoffen geeignet. Ein typisches Problem ist, dass der **Luftstrom zu gering** →^{7.1} und die abgeschiedene Schaummeng e zu gering gehalten wird. Die Zugabe von **Ozon hilft, die Koagulation zu verstärken** →^{7.2}.

Bei gut abbaubarem DOC (**CSB ≈ BSB₅** →^{3.2}) muss in Durchfluss- und Kreislaufanlagen zuerst die Quelle dieser Stoffe gefunden werden. Typische Quellen sind **Rücklösungen aus Sedimenten im Fischbecken** →^{4.1} und die Mineralisierung von Fäkalien, welche durch eine zu hohe hydraulische Aufenthaltszeit im Fisch-

becken bleiben. **Futter mit Kotbinder** ^{→4.2} erhöht die Stabilität des Futters und reduziert die Rücklösung aus Kot und Futterresten. Eine Erhöhung des Durchflusses und der Strömung durch das Becken fördert die **Selbstreinigung** ^{→4.3} und dadurch ebenfalls die Rücklösung.

Sind die Quellen nicht weiter zu beseitigen, so kann gut abbaubarer DOC durch biologische Reinigungsschritte reduziert werden. In der **Denitrifikation** ^{→8} kann der DOC einen Teil des benötigten, externen Kohlenstoffes ersetzen. Dieser kann bei falscher Dosierung ebenfalls einen erhöhten DOC in der Anlage verursachen ^{→8.1} und muss entsprechend reduziert werden (**Dosierung der C-Quelle reduzieren** ^{→8.2}).

Der schnellste Abbau erfolgt in **oxischen biologischen Reinigungsschritten** ^{→9}. Dies kann sowohl in der Aquakulturanlage wie auch nachgeschaltet erfolgen. Dazu zählen Belebtschlammfilter, Bewegtbettfilter, Festbettfilter, Rieselfilter, Membranfilter, Klärteiche, Pflanzenkläranlagen usw. Bei interner Reinigung in Kreislaufanlagen erreicht man oft eine Verbesserung der Abbauleistung durch eine Erhöhung der Umwälzung (**Q_{BF} erhöhen** ^{→9.1}) und bei nachgeschalteten Systemen durch eine Erhöhung der hydraulischen Aufenthaltszeit (**Aufenthaltszeit [HRT] erhöhen** ^{→9.1}), was einer Reduktion der Zuflussmenge oder einer Vergrößerung der Filterkapazität entspricht. Sammelt sich im System viel Schlamm an (Belebtschlamm, Biofilm), so kann durch eine Reduktion des Schlammalters (**SRT verringern** ^{→9.2}) die Abbaueffizienz ebenfalls verbessert werden, da dadurch jüngere und aktivere Mikroorganismen im Schlamm vorhanden sind. Wird das Schlammalter zu stark verringert, können allerdings Nitrifizierer aus dem System entfernt werden, da diese langsam wachsen.

Ist das Abwassers vorwiegend durch partikulären organischen Kohlenstoff belastet (**POC** ^{→2.2}), so kann dieser ohne technische Änderungen mit **einem Futtermittel mit besserer Verdaulichkeit** ^{→2.2.1} reduziert werden, falls dieses verfügbar ist (was aber oft nicht der Fall ist). Führt dies nicht zu einer Verbesserung, werden Massnahmen zur **Verbesserung der Feststoffabscheidung** ^{→2.2.2} empfohlen. Die **Reduktion der Futtermenge** ^{→10} wird erst als letzte Massnahme empfohlen und ist nach Möglichkeit zu vermeiden, insbesondere wenn die DOC-Belastung von inertem DOC stammt, das im Gewässer keine Sauerstoffzehrung verursacht.

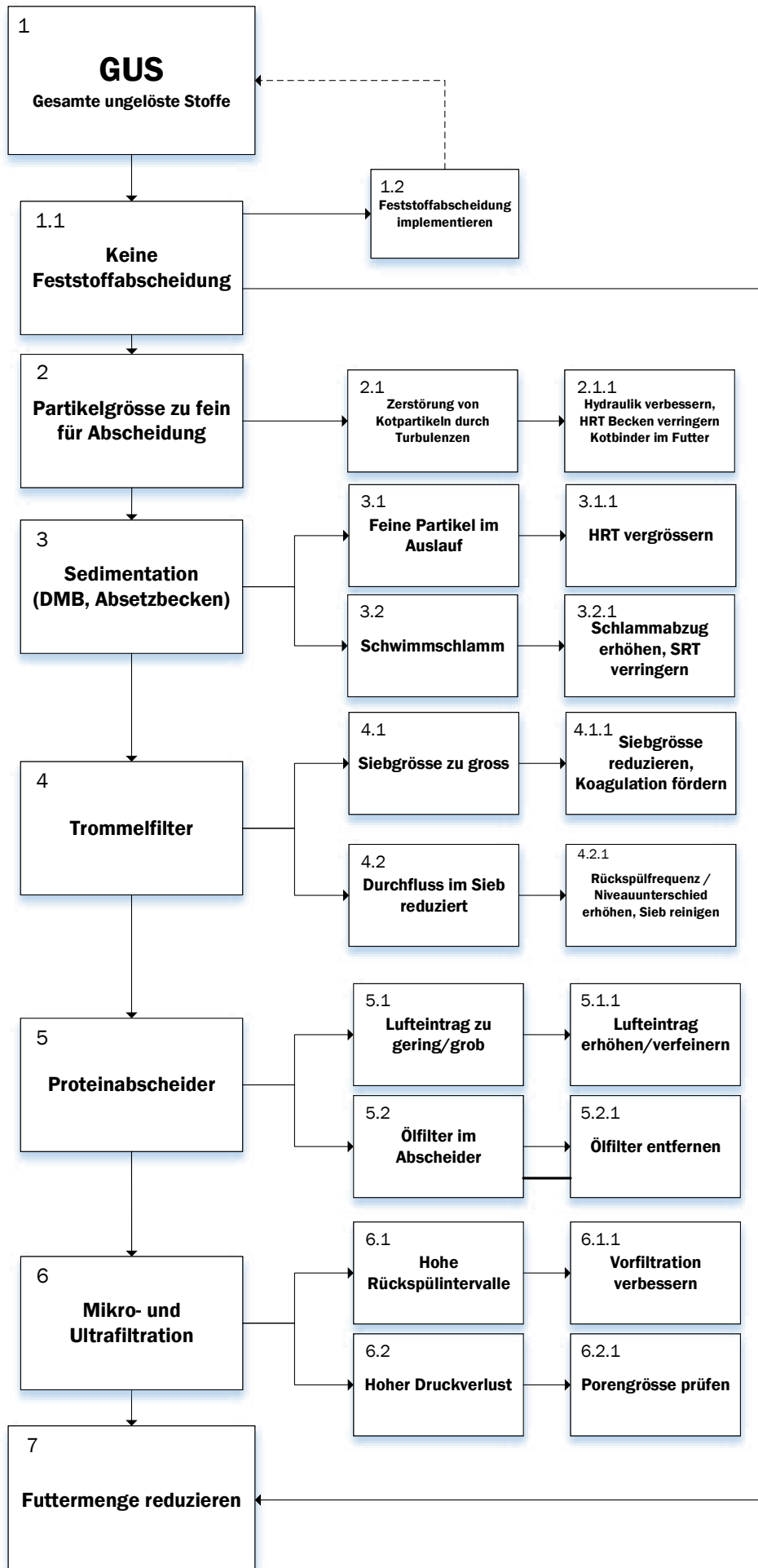
5.4 Gesamte ungelöste Stoffe

Ungelöste Stoffe (Gesamte ungelöste Stoffe, **GUS** ^{→1}) werden in Aquakulturanlagen durch die Ausscheidung der Fische und ungefressenes Futter eingetragen. Wird die GUS-Konzentration im Ablaufwasser der Anlage zu hoch, kann dies an einer fehlenden Feststoffabscheidung liegen (**Keine Feststoffabscheidung** ^{→1.1}). Dieses Problem kann behoben werden, indem eine solche in der Anlage eingesetzt wird (**Feststoffabscheidung implementieren** ^{→1.2}).

Für die in Aquakulturanlagen eingesetzten Technologien zur Reduktion der GUS-Konzentration ist die Partikelgrösse entscheidend. Je kleiner die Partikelgrösse, desto technisch anspruchsvollere Methoden müssen eingesetzt werden, um die Partikel zu entfernen. Wenn die **Partikelgrösse zu fein für die Abscheidung** ^{→2} ist, kann dies durch eine **Zerstörung der Kotpartikel durch Turbulenzen** ^{→2.1} verursacht sein. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die Hydraulik in der Anlage verbessert, die hydraulische Aufenthaltszeit in den Becken reduziert und Futter mit Kotbinder eingesetzt werden (**Hydraulik verbessern, Aufenthaltszeit [HRT] in den Becken verringern, Kotbinder im Futter** ^{→2.1.1}). Mögliche Strömungsquellen sollen verringert werden und eine reduzierte hydraulische Aufenthaltszeit in den Becken führt zu einer verbesserten Abtrennung der GUS, da diese weniger lange einem Zersetzungsprozess ausgeliefert sind, bevor sie durch eine Feststoffabscheidung entfernt werden können.

Ist eine Technologie zur **Sedimentation** ^{→3} in der betroffenen Anlage eingebaut, sind typischerweise zwei verschiedene Probleme vorhanden: Eine hohe Konzentration von feinen Partikeln im Auslauf (**feine Partikel im Auslauf** ^{→3.1}) lässt sich durch eine Erhöhung der hydraulischen Aufenthaltszeit verbessern. Die langsam sinkenden Partikel erhalten dadurch mehr Zeit, sich abzusetzen. Anfallender **Schwimm-schlamm** ^{→3.2}, welcher aufgrund des hohen Gasgehaltes nicht sedimentiert, kann durch eine Erhöhung des Schlammabzuges und einer Verringerung der Feststoffverweilzeit (Solids Retention Time, SRT) verbessert entfernt werden (**Schlammabzug erhöhen, SRT verringern** ^{→3.2.1}).

Abbildung 7
Entscheidungsbaum zur Reduktion von Feststoffen innerhalb und im Ablaufwasser von Aquakulturanlagen.



Wird ein **Trommelfilter** ^{→4} in der betroffenen Anlage zur Entfernung der GUS genutzt, kann eine zu grosse Siebgrösse (**Siebgrösse zu gross** ^{→4.1}) typischerweise nur eine ungenügende Menge der Fraktion der kleinen Partikel entfernen. Mittels einer Reduktion der Siebgrösse oder einer Unterstützung der Koagulation von Partikeln durch Ozon oder UV kann eine verbesserte Abtrennung erreicht werden (**Siebgrösse reduzieren** ^{→4.1.1}). Wenn der **Durchfluss im Sieb reduziert** ^{→4.2} ist, kann dies mittels Reinigung durch Entkalker oder Fettlöser behoben werden. Eine Erhöhung der Rückspülfrequenz führt zu einem weniger starken Filterkuchen, welcher leichter zu entfernen ist. Zusätzlich kann der Niveauunterschied im Trommelfilter erhöht werden, was dazu führt, dass das einfließende Kreislaufwasser oder Ablaufwasser mit stärkerem Druck durch das Sieb gepresst wird (**Rückspülfrequenz erhöhen, Niveauunterschied erhöhen oder Sieb reinigen** ^{→4.2.1}).

Wird eine höhere Wasserqualität benötigt oder ist nur ein sehr geringer Wasseraustausch möglich, wird ein **Proteinabscheider** ^{→5} zur Entfernung von Kleinstpartikeln benötigt. Der Lufteintrag in die Reaktionskammer des Proteinabscheiders ist besonders wichtig für dessen Leistungsfähigkeit: Zu kleine Luftblasen lösen sich im Wasser und führen nicht zu der gewünschten Schaumbildung, während zu grobe Luftblasen die Blasenbildung verhindern, da der Schaum sich bei der mechanischen Einwirkung von groben Luftblasen nur ungenügend entwickeln kann (**Lufteintrag zu gering oder zu grob** ^{→5.1}). Dies kann entsprechend durch eine Erhöhung oder Verfeinerung des Lufteintrages verbessert werden (**Lufteintrag erhöhen oder verfeinern** ^{→5.1.1}).

Zur weiteren Abscheidung von Feststoffen kann eine Mikro- oder Ultrafiltration in die Anlage implementiert werden (**Mikro- und Ultrafiltration** ^{→6}). Beide Filtrationssysteme können dazu neigen, dass **hohe Rückspülintervalle** ^{→6.1} nötig sind. Entweder weil die Systeme nicht für die Partikelgrösse im zu behandelnden Wasser optimiert sind oder weil zu grosse Partikel eintreffen, welche die Filter schnell verstopfen. Mittels einer verbesserten beziehungsweise angepassten Vorfiltration kann die eintreffende Partikelgrösse für das jeweilige System optimiert werden (**Vorfiltration verbessern** ^{→6.1.1}). Dies geht meist mit einem **hohen Druckverlust** ^{→6.2} einher. Deswegen soll die Porengrösse geprüft werden, damit diese der entsprechenden Spezifikation für die eintreffende Partikelgrösse entspricht (**Porengrösse prüfen** ^{→6.2.1}).

Zuletzt kann bei zu hoher GUS-Konzentration im Ablaufwasser die Futtermenge reduziert werden, damit die vorgegebenen Abwasserwerte eingehalten werden können (**Futtermenge reduzieren** ^{→7}).

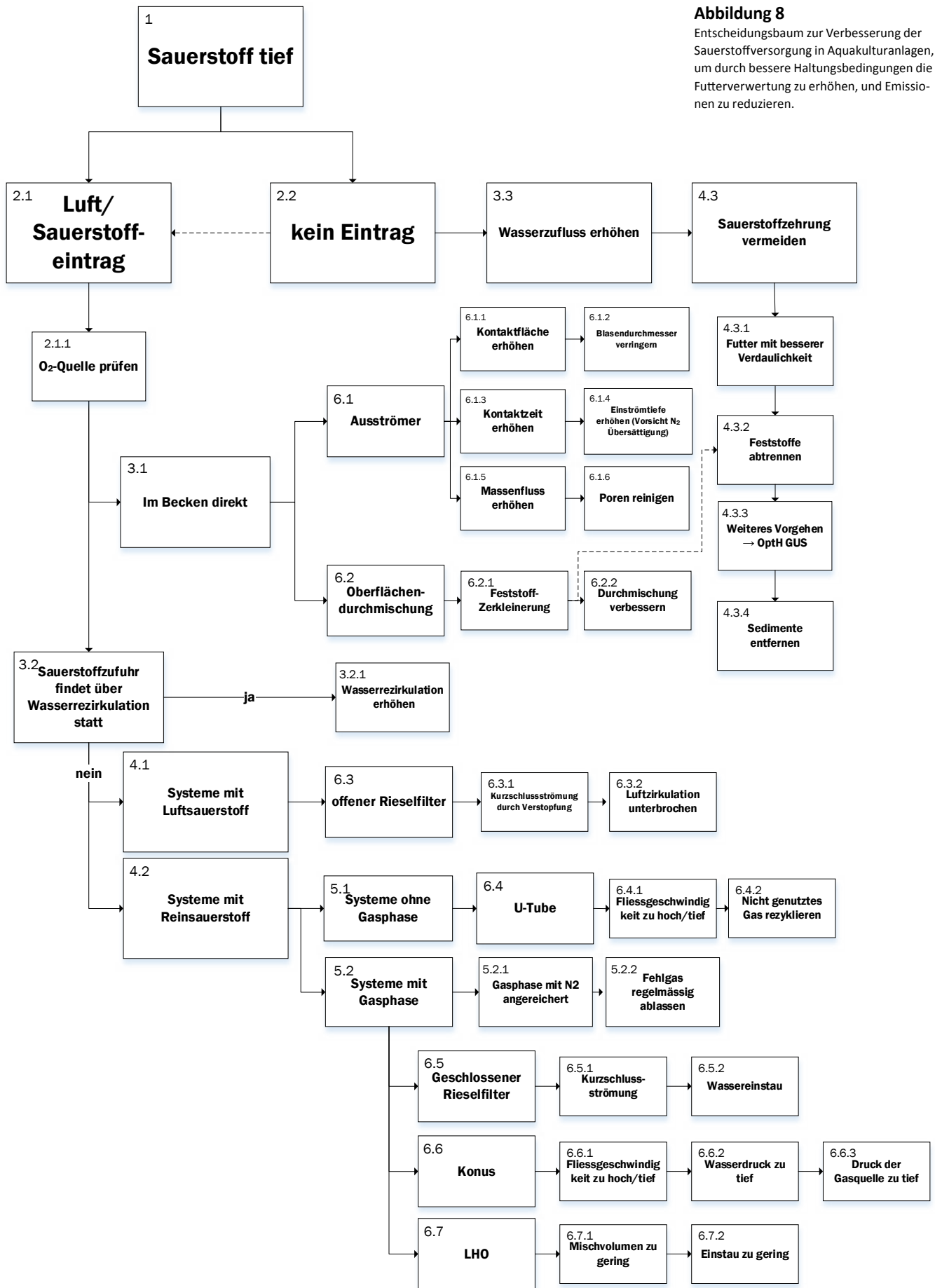
5.5 Sauerstoff

Sauerstoff stellt nicht direkt einen Abwasserparameter dar, jedoch ist die Aufrechterhaltung einer guten Wasserqualität die Grundlage für eine gute Futterverwertung, was bereits an der Quelle die Wasserbelastung reduziert (siehe Futtermittel). Deshalb fokussiert diese Optimierungshilfe auf die gängigen Ursachen von tiefen Sauerstoffkonzentrationen und schlägt Lösungen für die Probleme vor.

Als erstes unterscheiden sich Systeme mit **Luft- oder Sauerstoffeintrag** ^{→2.1}, worunter die Intensitätsstufen 2, 3 und 4 fallen und Systeme, welche **keinen Luft- und Sauerstoffeintrag** ^{→2.2} haben (Intensitätsstufe 1). In letzteren findet die gesamte Sauerstoffzugabe über den Zufluss statt. Eine **Erhöhung des Zuflusses** ^{→3.3} ist die erste zu prüfende Massnahme. Weiter können unnötige **Sauerstoffzehrunen im Fischbecken** ^{→4.3} reduziert werden, indem **Futtermittel mit besserer Verdaubarkeit** ^{→4.3.1} eingesetzt, **Feststoffe abgetrennt** ^{→4.3.2} und **Sedimente regelmässig entfernt** ^{→4.3.4} werden. Hierfür stehen vielfältige Lösungen aus der **Optimierungshilfe zu GUS** ^{→4.3.3} zur Verfügung.

In Systemen mit **Luft- oder Sauerstoffeintrag** ^{→2.1} ist eine Überprüfung der Sauerstoffquelle und Zuleitung ein erster Schritt. Bei der Produktion von Sauerstoff aus Luft über Sauerstoffkonzentratoren nimmt deren Leistung über die Zeit ab und bedarf regelmässiger Wartung der Geräte. Die Zumischung von nicht-reinem Sauerstoff unter Druck (z. B. Konus) kann zu Gasübersättigungen mit Fehlgasen (N₂) führen.

Werden Luft oder Sauerstoff **direkt ins Fischbecken über Ausströmer eingetragen** ^{→6.1}, stellt dies eine der ineffizientesten Arten des Eintrags dar. Gaseintrag ins Becken erzeugt auch Turbulenzen, was die Abtrennung von Feststoffen aus dem Becken verschlechtert. Wird es dennoch gemacht, so kann eine



Erhöhung der Kontaktfläche ^{→6.1.1} durch **Verringerung der Blasengrösse** ^{→6.1.2} die Effizienz des Sauerstoffeintrages erhöhen. Hierfür sind aber ein höherer Druck des Gases oder eine grössere Ausströmerfläche nötig. Weiter kann durch eine **Erhöhung der Einströmtiefe** ^{→6.1.3} **die Kontaktzeit verlängert** ^{→6.1.4} werden, ebenso durch Abwärtsströmung im Kontaktbehälter. Als letzte Massnahme kann der Eintrag auch über **einen höheren Massenfluss** ^{→6.1.5} (mehr Sauerstoff) erhöht werden. Dabei ist zu vermeiden, dass die feinen Blasen aufgrund eines grossen Gasflusses und höherer Turbulenz sich zu schnell zu grösseren Blasen verbinden. Die empfohlenen Durchflüsse der Ausströmer sollten aus Effizienzgründen nicht überschritten und die **Poren regelmässig gereinigt** ^{→6.1.6} werden.

Beim Einsatz von **Geräten zur Oberflächenbelüftung eines Fischtanks oder Teiches** ^{→6.2}, wie Wasserräder (Paddle Wheels), Wasserpilze und Venturis, ist zu beachten, dass diese **Fischkot und Futterreste mechanisch zerkleinern** ^{→6.2.1} und dadurch eine zusätzliche Sauerstoffzehrung verursachen. Ebenfalls sollte die erzeugte **Strömung** ^{→6.2.2} dafür genutzt werden, die Feststoffabscheidung zu unterstützen und nicht zu beeinträchtigen.

Eine andere weit verbreitete Art des Sauerstoffeintrags ist diesen über einen Kreislauf über **die Wasserrezirkulation** ^{→3.2} einzutragen, welche entweder mit **Luftsauerstoff** ^{→4.1} oder mit **Reinsauerstoff** ^{→4.2} betrieben wird. Ein häufiges Problem bei tiefem Sauerstoff ist, dass zwar die Sauerstoffsättigung beim Auslass der Einheit hoch ist, aber die **Wasserrezirkulation** ^{→3.2.1} zu gering ist. Dadurch erreicht ein zu geringer Massenfluss an Sauerstoff die Fischbecken. Gründe dafür können eine falsche Planung von Leitungssystemen und Wasserniveaus sein, welche die benötigte Wasserrezirkulation verunmöglichen. Je nach System ist eine Anpassung unterschiedlich aufwändig umzusetzen. Falsche Niveaus sind oft im Bereich des über Gravitation transportierten Wasserstromes zu suchen (zwischen Fischbecken und Filtration).

Offene Rieselfilter ^{→6.3} können mit Luftsauerstoff betrieben werden. Deren Effizienz lässt bei der Ausbildung von **Kurzschlussströmungen durch Verstopfung** ^{→6.3.1} und **verringert Luftzirkulation** ^{→6.3.2} deutlich nach. Es ist deshalb sehr wichtig, dass diese Filter, die auch der Entgasung dienen, regelmässig auf Verschmutzung kontrolliert und bei Bedarf gereinigt werden.

Systeme, die Reinsauerstoff über Umwälzung eintragen, haben stets eine Sauerstoffsättigung von weit über 100% im Zulauf des Fischbeckens zum Ziel. **Systeme ohne Gasphase** ^{→5.1}, d. h. ohne Kammer, welche einen Grossteil des Sauerstoffes enthält, funktionieren wie das **U-Tube** ^{→6.4} und kombinieren eine möglichst hohe Kontaktzeit zwischen Sauerstoffblase und Wasser mit einer Druckerhöhung. Die Kontaktzeit der Sauerstoffblase erhöht sich, wenn diese langsam mit dem Wasserstrom mitgetragen wird und nicht ausgasen kann. Bei zu **tiefer oder zu hoher Fließgeschwindigkeit** ^{→6.4.1} verringert sich die Kontaktzeit und die Eintrageffizienz sinkt. Weiter sollte das **nicht genutzte Gas rezykliert** ^{→6.4.2} werden, um den Eintrag zu erhöhen.

Ein generelles Problem mit geschlossenen **Systemen mit Gasphase** ^{→5.2} ist die Verwendung von mit Stickstoff verunreinigtem Sauerstoff. Der besser lösliche Sauerstoff reichert sich im Wasser an, wodurch der Stickstoff in der Gasphase zurückbleibt und sich stark **anreichert** ^{→5.2.1}. Bei hohem Druck kann dies dazu führen, dass das Wasser mit Stickstoff übersättigt wird. Eine **tägliche Entleerung des Gasvolumens** ^{→5.2.2} ist deshalb empfehlenswert.

In **geschlossenen Rieselfiltern** ^{→6.5}, in denen eine Sauerstoffatmosphäre herrscht, können durch **Kurzschlussströmungen** ^{→6.5.1} und ungewollten **Wasserstau** ^{→6.5.2} die Kontaktfläche und -zeit des Wassers mit der Sauerstoffphase die Sauerstoffanreicherung deutlich reduzieren. Eine regelmässige Reinigung des Filtermediums beugt dem vor.

Im **Sauerstoffkonus** ^{→6.6} führt eine **falsche Fließgeschwindigkeit** ^{→6.6.2} dazu, dass die Sauerstoffblasen entweder mit der Strömung mitgerissen werden oder im oberen Bereich des Konus gesammelt werden. Die Leistung des Konus nimmt dadurch stark ab. Weiter führt ein **zu tiefer Druck** ^{→6.6.2} im Konus zu einer verminderten Anreicherung. Bei falscher Planung ist der **Druck der Sauerstoffquelle zu tief** ^{→6.6.3} (z. B. bei einem medizinischen Sauerstoffkonzentrator). Ist dies der Fall, kann der Eintrag über ein Venturi erfolgen, welches durch den Unterdruck die Druckdifferenz ausgleichen kann.

In **LHO** ^{→6.7} sind häufige Fehler eine **zu geringe oder zu grosse Gasphase** ^{→6.7.1} unterhalb der Düsenplatte. Gute Werte werden oft im Bereich von 10 bis 20 cm erzielt und bedingen einen ausreichend hohen **Einstau des Low-Head-Oxygenators** ^{→6.7.2}. Hierbei ist es entscheidend, dass dieser Einstau durch das partielle Verschliessen der Düsenplatte und nicht durch die Reduktion eines Schiebers im Zufluss des Beckens entsteht.

VERZEICHNISSE

Literaturverzeichnis

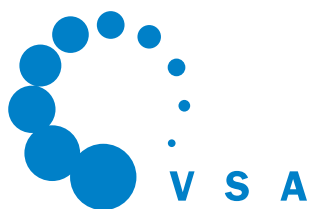
- [1] van Rijn J. (1995): The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture – A review. *Aquaculture* 139:181–201.
- [2] Cripps S.J., Bergheim A. (2000): Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22:33–56.
- [3] von Ahnen M., Pedersen L.-F., Pedersen P.B., Dalsgaard J. (2015): Degradation of urea, ammonia and nitrite in moving bed biofilters operated at different feed loadings. *Aquacultural Engineering* 69:50–59. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.10.004>
- [4] Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. (2006): Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257:346–358. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>
- [5] Colt J. (2006): Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural Engineering* 34:143–156. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.011>
- [6] Timmons M.B., Ebeling J.M. (2010): *Recirculating aquaculture*, 2nd ed. Cayuga Aqua Ventures.
- [7] Zhu S., Chen S. (2001): Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering* 25:1–11. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00071-1)
- [8] Guerdat T.C., Losordo T.M., Classen J.J., et al. (2011): Evaluating the effects of organic carbon on biological filtration performance in a large-scale recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 44:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.10.002>
- [9] Ling J., Chen S. (2005): Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. *Aquacultural Engineering* 33:150–162. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.002>
- [10] Kamstra A., Blom E., Terjesen B.F. (2017): Mixing and scale affect moving bed biofilm reactor (MBBR) performance. *Aquacultural Engineering* 78:9–17. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.04.004>
- [11] Malone R.F., Pfeiffer T.J. (2006): Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 34:389–402. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.007>
- [12] Rusten B., Eikebrokk B., Ulgenes Y., Lygren E. (2006): Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering* 34:322–331. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002>
- [13] Summerfelt S.T., Zühlke A., Kolarevic J., et al. (2015): Effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and system pH in semi-commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors. *Aquacultural Engineering* 65:46–54. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.11.002>
- [14] Eding E.H., Kamstra A., Verreth J.A.J., et al. (2006): Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering* 34:234–260. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.007>
- [15] van Rijn J., Tal Y., Schreier H.J. (2006): Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 34:364–376.
- [16] Müller-Belecke A., Zienert S., Thürmer C., et al. (2013): The «self cleaning inherent gas denitrification-reactor» for nitrate elimination in RAS for pike perch (*Sander lucioperca*) production. *Aquacultural Engineering* 57:18–23.
- [17] Bhuvanesh S., Maneesh N., Sreekrishnan T.R. (2013): Start-up and performance of a hybrid anoxic reactor for biological denitrification. *Bioresource Technology* 129:78–84.

- [18] Tsukuda S., Christianson L., Kolb A., et al. (2015): Heterotrophic denitrification of aquaculture effluent using fluidized sand biofilters. *Aquacultural Engineering* 64:49–59.
- [19] Zhu S.-M., Deng Y.-L., Ruan Y.-J., et al. (2015): Biological denitrification using poly (butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment. *Bioresource technology* 192:603–610.
- [20] van der Hoek J.P., Latour P.J.M., Klapwijk A. (1987): Denitrification with methanol in the presence of high salt concentrations and at high pH levels. *Appl Microbiol Biotechnol* 27:199–205. <https://doi.org/10.1007/BF00251945>
- [21] Labbé N., Parent S., Villemur R. (2003): Addition of trace metals increases denitrification rate in closed marine systems. *Water Research* 37:914–920.
- [22] Suhr K.I., Pedersen A. (2013): End-of-pipe denitrification using RAS effluent waste streams: Effect of C/N-ratio and hydraulic retention time. *Aquacultural Engineering* 53:57–64.
- [23] Suhr K.I., Pedersen L.F., Nielsen J.L. (2014): End-of-pipe single-sludge denitrification in pilot-scale recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 62:28–35.
- [24] Suhr K.I., Letelier-Gordo C.O., Lund I. (2015): Anaerobic digestion of solid waste in RAS: effect of reactor type on the biochemical acidogenic potential (BAP) and assessment of the biochemical methane potential (BMP) by a batch assay. *Aquacultural Engineering* 65:65–71.
- [25] Regazzoni L. (2019): Denitrification using anaerobic liquid fish faeces digestion. Master Thesis, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW)
- [26] Yatong X. (1996): Volatile fatty acids carbon source for biological denitrification. *Journal of Environmental Sciences* 8:257–268.
- [27] Letelier-Gordo C.O., Larsen B.K., Dalsgaard J., Pedersen P.B. (2017): The composition of readily available carbon sources produced by fermentation of fish faeces is affected by dietary protein:energy ratios. *Aquacultural Engineering* 77:27–32.
- [28] Letelier-Gordo C.O., Dalsgaard J., Suhr K.I., et al. (2015): Reducing the dietary protein:energy (P:E) ratio changes solubilization and fermentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) faeces. *Aquacultural Engineering* 66:22–29.
- [29] Conroy J., Couturier M. (2010): Dissolution of minerals during hydrolysis of fish waste solids. *Aquaculture* 298:220–225.
- [30] 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.
- [31] Klas S., Mozes N., Lahav O. (2006): A conceptual, stoichiometry-based model for single-sludge denitrification in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* 259:328–341.
- [32] de-Bashan L.E., Bashan Y. (2004): Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water Research* 38:4222–4246. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.014>
- [33] Johnson W., Chen S. (2006): Performance evaluation of radial/vertical flow clarification applied to recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 34:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.05.001>
- [34] Davidson J., Summerfelt S.T. (2005): Solids removal from a coldwater recirculating system – comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering* 33:47–61. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.002>
- [35] Dolan E., Murphy N., O’Hehir M. (2013): Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 56:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.005>
- [36] Losordo T.M., Masser M.P., Rakocy J.E. (1999): Recirculating aquaculture tank production systems: a review of component options. Southern Regional Aquaculture Center Publication
- [37] Summerfelt S., Bebak J., Tsukuda S. (2001): Controlled Systems: Water Reuse and Recirculation. In Second Edition of *Fish Hatchery Management*. pp 285–395.

- [38] Chen S., Timmons M.B., Bisogni J.J.J., Aneshansley D.J. (1993): Suspended-Solids Removal by Foam Fractionation. *The Progressive Fish-Culturist* 55:69–75.
- [39] Chen S., Timmons M.B., Bisogni J.J., Aneshansley D.J. (1994): Modeling surfactant removal in foam fractionation: II — Experimental investigations. *Aquacultural Engineering* 13:183–200. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)90002-7)
- [40] Tal Y., Schreier H.J., Sowers K.R., et al. (2009): Environmentally sustainable land-based marine aquaculture. *Aquaculture* 286:28–35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.043>
- [41] Sharrer M., Rishel K., Taylor A., et al. (2010): The cost and effectiveness of solids thickening technologies for treating backwash and recovering nutrients from intensive aquaculture systems. *Bioresource Technology* 101:6630–6641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.101>
- [42] Ebeling J.M., Welsh C.F., Rishel K.L. (2006): Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent. *Aquacultural Engineering* 35:61–77. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.006>
- [43] Wakeman R.J. (2007): Separation technologies for sludge dewatering. *Journal of Hazardous Materials* 144:614–619. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.084>
- [44] Pfeiffer T.J., Wills P.S. (2011): Evaluation of three types of structured floating plastic media in moving bed biofilters for total ammonia nitrogen removal in a low salinity hatchery recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 45:51–59. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.06.003>
- [45] Gerardi M.H. (2003): Nitrification and denitrification in the activated sludge process. John Wiley & Sons.
- [46] Lekang O.-I., Kleppe H. (2000): Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering* 21:181–199. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00032-1)
- [47] Kamstra A., van der Heul J.W., Nijhof M. (1998): Performance and optimisation of trickling filters on eel farms. *Aquacultural Engineering* 17:175–192. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00014-4)
- [48] Geller G., Höner G. (2003): *Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen: Praktisches Qualitätsmanagement bei Planung, Bau und Betrieb*. Springer-Verlag.
- [49] Regazzoni L. (2017): Phosphatausfällung mit Calciumhydroxid in Fischzuchtabwasser. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW).
- [50] Boyd C.E. (1998): Pond water aeration systems. *Aquacultural Engineering* 18:9–40.
- [51] Ahmad T., Boyd C.E. (1988): Design and performance of paddle wheel aerators. *Aquacultural Engineering* 7:39–62. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(88\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0144-8609(88)90037-4)
- [52] Wedemeyer G. (1996): *Physiology of Fish in Intensive Culture Systems*. Springer US.
- [53] VSA Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (2022): *Leitfaden Aquakulturanlagen, Teil 1: Anforderungen an die Abwasserableitung, Überwachung und Schlammverwertung*

Abkürzungsverzeichnis

Ammonium	Menge an gelöstem Ammonium. Entsteht durch den Metabolismus der Fische. Abhängig vom pH in variablen Anteilen der Formen NH_4^+ und NH_3 vorhanden. Bereits in kleinen Konzentrationen stark fischtoxisch.
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf: Benötigter Sauerstoff (als O_2) für die mikrobiell abbaubaren Bestandteile im Abwasser. Gibt indirekt einen Hinweis auf die Belastung durch leicht abbaubare, organische Verbindungen, die bspw. bei einer Einleitung in ein Gewässer zu Sauerstoffzehrung führen können.
CSB_{gel}	Chemischer Sauerstoffbedarf (gelöst): bezieht sich nur auf die Menge an chemischem Sauerstoffbedarf, der durch gelöste organische Stoffe verursacht wird.
CSB_{part}	Chemischer Sauerstoffbedarf (partikulär): bezieht sich nur auf die Menge an chemischen Sauerstoff, der durch partikuläre organische Stoffe verursacht wird.
CSB_{tot}	Chemischer Sauerstoffbedarf (total), Menge an Sauerstoff (als O_2), welche benötigt würde, um alle vorhandene organische Substanz zu CO_2 und H_2O oxidieren zu können. $\text{CSB}_{\text{tot}} = \text{CSB}_{\text{gel}} + \text{CSB}_{\text{part}}$
DOC	Dissolved organic carbon (DOC), gelöster organischer Kohlenstoff: bezieht sich auf die Menge an gelöstem organischem Kohlenstoff ($<0.45 \mu\text{m}$).
GUS	Gesamte ungelöste Stoffe: Stoffe, welche ungelöst, d. h. partikulär im Fischzuchtwasser vorhanden sind und zur Bestimmung in der Praxis durch eine Filtrierung ($0.45 \mu\text{m}$) vom Wasser abgetrennt und anschliessend getrocknet werden. Entspricht der Trockensubstanz (Rückstand beim Eindampfen einer Probe) abzüglich der im Wasser gelösten Stoffe (z. B. Salze).
Nitrat	Nitrat (NO_3^-) ist das Endprodukt der Nitrifikation und reichert sich typischerweise in Kreislaufanlagen an. Wird meist über das Ablaufwasser ausgetragen.
Nitrit	Nitrit (NO_2^-) ist ein Zwischenprodukt der Nitrifikation im Biofilter und kann auch bei Anlagen mit unvollständiger Denitrifikation verstärkt auftreten. Bereits in kleinen Konzentrationen stark fischtoxisch.
P_{gel}	Gelöster Phosphor: Menge an Phosphor, welcher in gelöster Form im Abwasser vorhanden ist (z.B. als Phosphat PO_4^{3-}).
POC	Particulate organic carbon (POC), partikulärer organischer Kohlenstoff: bezieht sich auf die Menge an partikulärem organischem Kohlenstoff ($<0.45 \mu\text{m}$), entspricht näherungsweise dem organischen Anteil der GUS.
P_{part}	Partikulärer Phosphor: Menge an Phosphor, welche in partikulärer Form im Abwasser vorhanden ist (meist in organischer Substanz gebundener Phosphor oder Fällprodukte).
P_{tot}	Gesamtphosphor: Gesamte Menge an Phosphor (in unbestimmter Form), welche im Abwasser vorhanden ist. $\text{P}_{\text{tot}} = \text{P}_{\text{gel}} + \text{P}_{\text{part}}$
TN	Gesamtstickstoff, Summenparameter für alle Stickstoffverbindung, welche im Abwasser vorhanden sind. $\text{TN} = \text{TN}_{\text{gel}} + \text{TN}_{\text{part}}$
TN_{gel}	Gelöster Gesamtstickstoff: Summenparameter für alle gelösten Stickstoffverbindungen welche im Abwasser vorhanden sind. In der Aquakultur primär Ammonium, Nitrit, Nitrat. $\text{TN}_{\text{gel}} = \text{Ammonium} + \text{Nitrit} + \text{Nitrat}$
TN_{part}	Partikulärer-Gesamtstickstoff: entspricht der Menge Stickstoff, welche in partikulärer Form vorhanden ist (z. B. in Proteinen).
TOC	Total organic carbon (TOC), gesamter organischer Kohlenstoff, ein Summenparameter: Entspricht der Menge an organischem Kohlenstoff, welche im Abwasser vorhanden ist. $\text{TOC} = \text{DOC} + \text{POC}$



Verband Schweizer Abwasser-
und Gewässerschutzfachleute (VSA)
Europastrasse 3
Postfach, 8152 Glattbrugg
sekretariat@vsa.ch
www.vsa.ch
Tel. 043 343 70 70