

Synopse der übergeordneten Erkenntnisse aus der Nachhaltig- keitsbewertung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen der DBU-Förderinitiative „Nachhaltige Aquakultur“

Studie im Auftrag der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Freiburg, 30.09.2015

Autoren

Dipl. Ing. Martin Möller
Florian Antony

(Öko-Institut e.V.)

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1. Hintergrund	7
2. Zielsetzung und Aufbau der vorliegenden Studie	8
3. Geschlossene Aquakultur-Kreislaufanlagen (RAS)	9
3.1. Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	9
3.1.1. Technologischer Überblick	9
3.1.2. Stand der technischen Implementierung und Positionierung geschlossener Kreislaufanlagen gegenüber anderen Aquakulturzuchtformen	11
3.1.3. Einsatz von elektrochemischen Verfahren zur Prozesswasseraufbereitung	12
3.1.4. Kombiniertes Einsatz von niederfrequentem Ultraschall und UV-Licht zur Prozesswasseraufbereitung	13
3.1.5. Kombinierte Feststoffseparation und Denitrifikation zur Prozesswasseraufbereitung	14
3.2. Einordnung der bestehenden prozesstechnischen und tierschutzrelevanten Herausforderungen	15
3.2.1. Handhabung von Problemen, die aus der Umwelt ins System eingetragen werden	15
3.2.2. Handhabung technischer und tierschutzrelevanter Prozessparameter innerhalb der Anlage	16
3.2.3. Kontrolle von Problemen, die aus dem System in die Umwelt ausgetragen werden	17
3.3. Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltige Fischzucht in Kreislaufanlagen	17
3.3.1. Bestehende Kriterien bei Zertifizierungseinrichtungen und NGOs	17
3.3.2. Differenzierung der Vermarktung von Fischprodukten	18
3.3.3. Potenziale und Herausforderungen der Multitrophie bzw. Polykultur	19
3.4. Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs	20
3.4.1. Optimierung der Prozess- und Anlagentechnik	20
3.4.2. Systematische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquakultur-Systeme	21
3.4.3. Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU	23
4. Nachhaltige Bereitstellung von Futtermitteln	25
4.1. Status quo der Futtermittelbereitstellung	25
4.1.1. Herstellung von Fischmehl und Fischöl	25
4.1.2. Einsatz von Fischmehl und Fischöl in der Aquakultur	27
4.1.3. Ökologische Nachteile und Risiken	28
4.1.4. Ökonomische Aspekte	28
4.2. Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	29

4.2.1.	Überblick	29
4.2.2.	Einsatz von Mikroalgen als alternatives Futtermittel	30
4.2.3.	Anreicherung von Nematoden für die Fütterung von Shrimp-Larven	31
4.2.4.	Erzeugung von Trockenfuttermitteln aus konservierten Nebenprodukten	32
4.3.	Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltiges Fischfutter	33
4.3.1.	Bestehende Kriterien bei Zertifizierungseinrichtungen und NGOs	33
4.3.2.	Weiterentwicklung von hochwertigen Proteinen und Fetten aus Pflanzen und Mikroorganismen	35
4.3.3.	Steigerung des Anteils von Fischmehl und Fischöl aus Fischnebenprodukten	35
4.3.4.	Verwendung von Fischmehl und Fischöl aus nachhaltig bewirtschafteten Quellen	36
4.3.5.	Differenzierung der Vermarktung von Fischprodukten und Verbraucherinformation	36
4.4.	Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs	37
4.4.1.	Identifizierung der unter Umweltgesichtspunkten optimalen futtermittelbezogenen Prozessparameter für die verschiedenen in Aquakultur gezüchteten Spezies	37
4.4.2.	Erhöhung des Anteils aus Fischsilage bereitgestellten Futtermittels	38
4.4.3.	Effizienzsteigerung bei der Mikroalgenproduktion	38
4.4.4.	Optimierung und Ausweitung der Zucht von Friedfischen	39
4.4.5.	Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU	39
5.	Integrierte Produktion	41
5.1.	Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	41
5.1.1.	Technologischer Überblick	41
5.1.2.	Stand der technischen Implementierung	43
5.1.3.	Biologische Abwasserreinigung in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch integrierte Kultur von Halophyten	44
5.1.4.	Nährstoff-Recycling in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch die integrierte Produktion von Algenbiomasse	45
5.2.	Ansatzpunkte für eine integrierte Nutzung von Energie und Abwärme in Aquakulturanlagen	46
5.3.	Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs	47
5.3.1.	Optimierungsansätze zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit	47
5.3.2.	Optimierung der Fisch- und Pflanzenwahl in Abhängigkeit des geographischen Bezugsrahmens	49
5.3.3.	Optimierung der Systemintegration	49
5.3.4.	Behandlung von Krankheitserregern	50
5.3.5.	Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU	51
6.	Zusammenfassung und übergreifende Erkenntnisse	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	In deutscher Aquakultur erzeugte Menge an Fisch, nach Anlagenart	12
Abbildung 4-1:	Prozentuale Verteilung der für die Fischmehlherstellung genutzten Arten	26
Abbildung 4-2:	Zeitreihe der weltweiten Produktion von Fischmehl und Fischöl (in 1.000 Tonnen)	26
Abbildung 4-3:	Entwicklung der Preise für Fischmehl und Sojamehl in Deutschland	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Übersicht zur Aquakulturproduktion (nur Fische) in Deutschland in 2013	11
Tabelle 3-2:	Vor- und Nachteile einer Ökobilanz (engl. „life cycle assessment“, LCA)	22
Tabelle 3-3:	Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Aquakultur in Kreislaufanlagen	24
Tabelle 4-1:	Entwicklung des FIFO-Verhältnisses für wichtige Aquakultur-Fischarten	34
Tabelle 4-2:	Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Futtermittelbereitstellung	40
Tabelle 5-1:	In Aquaponiksystemen vorzugsweise eingesetzte Fisch- und Pflanzenarten	44
Tabelle 5-2:	Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Futtermittelbereitstellung	51

1. Hintergrund

Angesichts stagnierender bzw. in Zukunft voraussichtlich sinkender Fischfangerträge der marinen Fischerei setzen die Fischwirtschaft, eine Reihe von Regierungen und Institutionen (zum Beispiel die Weltbank oder der Internationale Währungsfond) sowie Forschungsgruppen ihre Hoffnungen darauf, den steigenden Fischbedarf in Zukunft durch einen weiteren Ausbau der Aufzucht von Fischen in Aquakultursystemen zu decken.

Die weltweite Produktion von Fisch, Schalentieren und Algen in Aquakulturen ist seit den 1970er Jahren enorm angestiegen. Aquakultur ist der am schnellsten wachsende Lebensmittelsektor. 2009 stammten laut der Food and Agriculture Organization (FAO) der Vereinten Nationen 55 Millionen Tonnen Fisch aus Aquakulturen, das war etwas mehr als ein Drittel der insgesamt 145 Millionen Tonnen gefangenen Fisches. Die Wachstumsraten lagen in den zurückliegenden 20 Jahren bei 5-10% p.a. Angesichts dieser sehr dynamischen Entwicklung stellt Aquakultur eines der herausragenden Themen in Hinblick auf die langfristige Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Nahrungsmittelversorgung der Menschheit dar.

Mit diesem Wachstum geht aber auch eine Reihe von Umweltproblemen einher. Dazu gehören die Überdüngung von Gewässern sowie die Belastung von Gewässern mit Schadstoffen (z.B. durch den Einsatz von Antifoulingmitteln oder Antibiotika) und die genetische Gefährdung von Wildfischbeständen durch entweichende Zuchtarten. Ein weiteres Problem besteht auch im erhöhten Fangdruck auf Fischbestände, die für die Herstellung von Fischmehl und -öl als Futtermittel für Aquakulturen gefangen werden. Andererseits ist zu jedoch berücksichtigen, dass Aquakulturanlagen anders als die Wildfischerei keinen Beifang verursachen, was nicht zuletzt aus Tierschutzgesichtspunkten ein großes Problem darstellt. Beispielsweise kann in der Shrimpsfischerei der Beifang bis zu 80 Prozent der Fangmenge betragen.

Vor diesem Hintergrund hat die Deutsche Bundesstiftung Umwelt im Jahr 2009 eine Förderinitiative „Nachhaltige Aquakultur“ ausgeschrieben, die zum Ziel hat, die Entwicklung innovativer Aquakultursysteme zu fördern, die einen Beitrag für mehr Nachhaltigkeit leisten. Vorrangiges Ziel dieser Initiative ist es, die Entwicklung anwendungsrelevanter Techniken zu fördern, die u.a. die Energie- und Ressourceneffizienz von offenen und geschlossenen Aquakultursystemen steigern. Neben der Optimierung der Aggregate der Kreislauftechnologie sollen auch optimierte Futtermittelkonzepte sowie Ansätze zur integrierten Produktion (Schließen von Nährstoffkreisläufen bei der Produktion hochwertiger Eiweiße) untersucht und entwickelt werden.

Im Rahmen der Förderinitiative Aquakultur wurde das Öko-Institut e.V. beauftragt, die zehn geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben einer prozessbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung zu unterziehen (AZ 29198-34; im Folgenden „Bewertungsprojekt“ genannt). Konkret wurden in diesem Zuge jeweils die einzelnen Vorhaben in einer lebenswegorientierten Perspektive analysiert. Dabei wurde so weit als möglich auf einer quantitativen Ebene ermittelt, ob, in welchem Umfang und ggf. unter welchen Bedingungen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten relevante Optimierungspotenziale erschlossen werden können. Durch die integrierte Begleitforschung und die dabei entwickelte Bewertungsmethode für die verschiedenen Entwicklungspfade der praxisbezogenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnten so zeitnah individuelle Bewertungen unter nachhaltigkeitsrelevanten Kriterien vorgenommen werden.

Nachdem nun im Rahmen des Bewertungsprojekts acht¹ der zehn Forschungs- und Entwicklungsvorhaben einer Nachhaltigkeitsbewertung unterzogen wurden bzw. derzeit noch werden, besteht nunmehr die einmalige Chance, die in diesem Zuge durch das Öko-Institut zusammengetragenen umfangreichen und aktuellen Datenbestände der jeweils individuellen Vorhabensbewertungen für eine übergeordnete Auswertung weiterzuverwenden.

2. Zielsetzung und Aufbau der vorliegenden Studie

Ziel der vorliegenden Studie ist es, auf der Grundlage der Datenbestände aus den individuellen Vorhabensbewertungen **übergeordnete Erkenntnisse und konkrete Empfehlungen** für eine möglichst nachhaltige und tierschutzgerechte zukünftige Entwicklung der Aquakultur abzuleiten. Auf der Grundlage dieser Empfehlungen können auch prioritäre Ansatzpunkte identifiziert werden. Im Rahmen einer **synoptischen Darstellung** sollen dabei die Ergebnisse aus der prozessbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung der im Rahmen der DBU-Initiative geförderten Projekte aufgegriffen und in einen größeren Zusammenhang gesetzt werden. Für diese Auswertung werden drei **inhaltlich-thematische Cluster** genauer betrachtet, die im Zuge des Bewertungsprojektes als besonders vielversprechende Ausgangspunkte für eine übergeordnete Betrachtung in Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte identifiziert werden konnten:

- Geschlossene Aquakultur-Kreislaufanlagen (RAS);
- Nachhaltige Bereitstellung von Futtermitteln;
- Integrierte Produktion.

Für diese inhaltlich-thematischen Cluster werden im Folgenden sowohl der **aktuelle Stand** bezüglich innovativer technologischer Lösungen als auch künftige **Entwicklungspotenziale** detailliert beschrieben. Sowohl bei der Betrachtung geschlossener Kreislaufanlagen als auch bei der integrierten Produktion wird dabei unter Einbeziehung von anerkannten Experten² explizit auf **Tierschutzaspekte** eingegangen.

Auf der Basis dieser Informationen wird eine **Roadmap** für die Entwicklungspfade in den drei Clustern entwickelt.

Als unmittelbarer Nutzen für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt ergibt sich aus dieser übergeordneten Auswertung eine **Entscheidungsgrundlage**, ob und ggf. in welchen Segmenten weitere **Förderthemen/-inhalte** im Bereich Aquakultur aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten weiterverfolgt werden sollten.

¹ Aufgrund von erheblichen technischen bzw. organisatorischen Schwierigkeiten bei zwei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben können durch das Öko-Institut im Rahmen der (bereits verlängerten) Laufzeit des Bewertungsprojekts nur acht der zehn Vorhaben betrachtet werden. Bei den nicht betrachteten Forschungs- und Entwicklungsprojekten handelt es sich um AZ 28134-34 und AZ 28173-23.

² Beispielsweise ist geplant, mittels Interviews Experten aus der Arbeitsgruppe Fischkrankheiten und Fischhaltung der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover (Prof. Dr. Steinhagen) in das Projekt mit einzubeziehen. In diesem Zusammenhang steht v.a. eine Optimierung der Prozessparameter (z.B. Besatzdichte, Partikelkonzentration) unter Tierschutzaspekten im Vordergrund. Darüber hinaus werden auch die (ggf. positiven) Auswirkungen von Haltebedingungen, die unter Tierschutzgesichtspunkten optimiert sind, auf die Produktivität der Zucht betrachtet.

3. Geschlossene Aquakultur-Kreislaufanlagen (RAS)

In der Aquakultur werden für die Zucht der Fische grundsätzlich verschiedene Anlagentypen unterschieden. Neben traditionellen Formen der Teichwirtschaft, dem Netzgehege und sogenannten Durchflussanlagen kommt mit geschlossenen Kreislaufanlagen (engl. „Recirculating Aquaculture Systems“, RAS) einer neuen Fischzuchttechnik eine wachsende Bedeutung zu. Eine Kreislaufanlage umfasst, neben dem eigentlichen Fischhaltebecken, einen Prozesswasseraufbereitungskreislauf mit weiteren Becken und verschiedenen, je auf die Bedürfnisse der Besatzfische angepassten Wasseraufbereitungsprozessen. Das Prozesswasser in einer Kreislaufanlage wird mehrmals täglich mittels einer Pumpe umgewälzt und passiert dabei in aller Regel mehrere Reinigungsstufen, bevor es wieder zurück in das Fischhaltebecken geführt wird.

Unter den Kreislaufanlagen lassen sich Süß- und Salzwasseranlagen unterscheiden. In Deutschland gibt es bereits erste kommerziell betriebene Süßwasseraquakulturanlagen. (Destatis 2014). Eine Salzwasser-Kreislaufanlage im kommerziellen Maßstab existiert derzeit in Völklingen im Saarland. Nach einem kürzlich erfolgten Verkauf der Anlage an einen Investor ist die Zukunft bzw. der Fortbestand der Anlage jedoch unklar. Weitere kommerziell betriebene landbasierte marine Aquakultursysteme finden sich derzeit bereits in Norwegen (z.B. Smøla Hatchery and Smolt production farm, Norwegen).

Angesichts der weiter wachsenden Nachfrage, die nicht durch gesteigerte Erträge der Fangfischerei gedeckt werden kann, stellt sich die Frage, welche Aquakultursysteme bzw. Technologieoptionen künftig relevant sein werden. Neben einer Aquakultur in marinen Netzkäfigen, der insbesondere auf globaler Ebene voraussichtlich eine große Bedeutung zukommen wird, bietet sich ein großes Potenzial, den wachsenden Bedarf zumindest teilweise, jedoch in zunehmendem Umfang, aus intensiv geführter Fischzucht in Kreislaufanlagen zu decken.

3.1. Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

In diesem Kapitel erfolgt eine Bestandsaufnahme zu aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der technologischen Weiterentwicklung von Aquakultur in Kreislaufanlagen. Hierzu wird in Abschnitt 3.1.1 zunächst ein technologischer Überblick gegeben. Eine Übersicht zur Aquakulturproduktion in Deutschland sowie eine Einschätzung zum Stand der technischen Implementierung von Kreislaufanlagen folgt in Abschnitt 3.1.2. Darauf aufbauend werden die Beiträge, die durch die im Rahmen der DBU-Initiative „Nachhaltige Aquakultur“ geförderten Projekte zu den jeweiligen Forschungsfeldern gebracht wurden, vorgestellt und eingeordnet (Abschnitte 3.1.3–3.1.5).

3.1.1. Technologischer Überblick

Die technische Machbarkeit einer Fischzucht in landbasierten Kreislaufanlagen ist bereits seit geraumer Zeit nachgewiesen. Anlagen zur intensiven Fischproduktion in Kreislaufanlagen mit dem Ziel der kontrollierten und jahreszeitlich unabhängigen Produktion hochpreisiger Fischarten entstanden in Deutschland bereits in den 1980er Jahren (Wedekind o. J.). Trotz der vorhandenen Vorteile der Kreislauf-Aquakultur kommt nach wie vor ein Großteil der Fische aus alternativen Aquakultur-Zuchtformen (siehe auch Abschnitt 3.1.2). Trotz technologischer Fortschritte in den vergangenen Jahren ist die Fischzucht in Kreislaufanlagen gegenwärtig zum Teil nicht wirtschaftlich. Ursache hierfür sind zum einen Betriebskosten, die oftmals höher sind als erwartet; zum anderen kann die prognostizierte Produktionsleistung in der Praxis mitunter nicht erreicht werden (Wedekind o. J.).

Für Aquakulturanlagen, bei denen das Prozesswasser kontinuierlich im Kreislauf geführt wird, ist eine effektive und zugleich effiziente Wasseraufbereitung erforderlich. Nur so ist es möglich, die zentralen physikalischen und chemischen Prozessparameter zu gewährleisten und auf diese Weise optimale Haltungsbedingungen für die Fische bereit zu stellen. Gelingt dies nicht, kann es zur Akkumulation fischtoxischer Substanzen und gelöster organischer Substanzen kommen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere zu hohe Konzentrationen von Ammonium und Nitrit zu nennen, die eine chemische oder physikalische Wasserbehandlung notwendig machen (Schroeder et al. 2011).

Eine weitere in der Kreislauf-Aquakultur häufig auftretende Schwierigkeit sind Verluste, die durch Fischkrankheiten entstehen. So werden pathogene Keime und Bakterien zum Problem, wenn diese etwa über die Fütterung mit Lebendfutter und Mikroalgen oder aber direkt über den Frischwasserzulauf ins System eingetragen werden (Attramadal et al. 2012).

Der vorbeugende Schutz gegenüber Krankheiten und die effektive Kontrolle des Keimdrucks in der Anlage sind daher von großer Bedeutung. Eine effektive Wasseraufbereitung und eine ausreichende Desinfektion des Prozesswassers, um dem Ausbruch von Krankheiten vorzubeugen, nehmen deshalb eine wichtige Rolle ein. Dies gilt nicht zuletzt auch in Hinblick auf ökonomische Aspekte (Johari et al. 2015).

Zur Entkeimung des Wassers in Kreislaufanlagen werden verschiedene technische Verfahren eingesetzt. Eine Behandlung kann zum Beispiel durch Einsatz von Ozon oder durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht (UV-Licht) erfolgen. Das zumindest in marinen Kreislaufsystemen häufig angewandte Verfahren der Ozonierung wird zum Teil kontrovers diskutiert. Sie kann sowohl als Verfahren zur Wasseraufbereitung als auch zur Desinfektion eingesetzt werden (Reiser et al. 2010). So konnte gezeigt werden, dass durch Ozonierung die Wasserqualität in Kreislaufanlagen verbessert werden kann, indem durch Eintrag von Ozon Wasserparameter wie der Gehalt an Schwebstoffen und der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) kontrolliert werden können. Der Einsatz von Ozon kann darüber hinaus auch die Trübung durch Huminstoffe (sogenannte Gelbstoffe), den Nitritgehalt des Wassers sowie die Anreicherung von bakterieller Biomasse reduzieren (Schroeder et al. 2011).

Für eine effektive Desinfektion benötigt man mitunter große Mengen an Ozon. Gleichzeitig kann die Menge an Ozon nicht beliebig gesteigert werden, da sich das eingetragene Ozon, wenn es aus dem Wasseraufbereitungskreislauf ins Fischhaltebecken gelangt, schon in geringen Mengen toxisch auf die Fische auswirken kann (Good et al. 2011; Ballagh et al. 2011; Attramadal et al. 2012). Bei der Ozonierung entstehen Oxidantien (engl. „ozone-produced oxidants“ (OPO)), die histologische und physiologische Veränderungen bei den Fischen verursachen können (Reiser et al. 2010).

Als Alternative zur Ozonierung kann insbesondere bei Süßwasseranlagen auch eine physikalische Behandlung mit UV-Licht erfolgen, ggf. ergänzt durch eine Behandlung mit Ultraschall (Summerfelt 2003).

Neben der physikalischen und chemischen Behandlung des Wassers ist auch die biologische Behandlung von großer Bedeutung für die Kontrolle der Haltungsbedingungen in geschlossenen Kreislaufanlagen. Im Zuge der biologischen Reinigungsstufe wird eine Nitrifikation und Denitrifikation durchgeführt, wobei potenziell toxische Stoffwechselprodukte der Besatzfische von nitrifizierenden bzw. denitrifizierenden Bakterien zunächst zu Nitrat und anschließend zu molekularem Stickstoff abgebaut werden (van Rijn et al. 2006). Während die Nitrifikation prozesstechnisch vergleichsweise gut handzuhaben ist, muss die Denitrifikation unter Sauerstoffausschluss durch anaerobe Bakterienstämme erfolgen. Eine wesentliche Herausforderung bei der Denitrifikation

besteht letztlich darin, den Zielkonflikt zwischen den sich diametral unterscheidenden Anforderungen der Besatzfische und den für die Denitrifikation zuständigen Bakterienstämmen zu kontrollieren.

Ohne ausreichende Denitrifikation muss eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Verdünnung des Prozesswassers durch Frischwasser vorgenommen werden. Der Wasseraustausch wirkt sich jedoch nicht nur kritisch auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus; die mit dem Wasser aus dem System entlassenen Nährstoffe (Stickstoff und Phosphate) stellen aufgrund ihrer eutrophierenden Wirkung zudem ein Umweltproblem dar (vgl. Abschnitt 3.1.5).

Ergänzend ist festzustellen, dass unter dem Sammelbegriff „RAS“ eine ganze Vielzahl unterschiedlicher technischer Anlagen und Systeme zusammengefasst werden. Je nach äußeren Gegebenheiten und beispielsweise den spezifischen Ansprüchen von Besatzfischen an die Haltungsbedingungen erfordert jede Anlage ein spezifisches Design und eine entsprechend abgestimmte technische Auslegung.

3.1.2. Stand der technischen Implementierung und Positionierung geschlossener Kreislaufanlagen gegenüber anderen Aquakulturzuchtformen

Insgesamt wurden in deutschen Aquakulturbetrieben im Jahr 2013 25.517 t Fisch erzeugt (Statistisches Bundesamt). Die Erzeugung verteilte sich im selben Jahr entsprechend der in Tabelle 3-1 aufgeführten unterschiedlichen Techniken der Fischzucht in Aquakultur.

Tabelle 3-1: Übersicht zur Aquakulturproduktion (nur Fische) in Deutschland in 2013

Art des Aquakulturbetriebes	Betriebe [Anzahl]	Erzeugte Menge [kg]
Fischzuchtbetriebe insgesamt	6.093	20.409.983
Teiche	3.885	6.349.003
Becken/Fließkanäle/Forellenteiche	2.833	12.228.366
Kreislaufanlagen	51	1.679.062
Netzgehege	20	136.467
Sonstige Verfahren	7	17.085

Quelle: Destatis (2014)

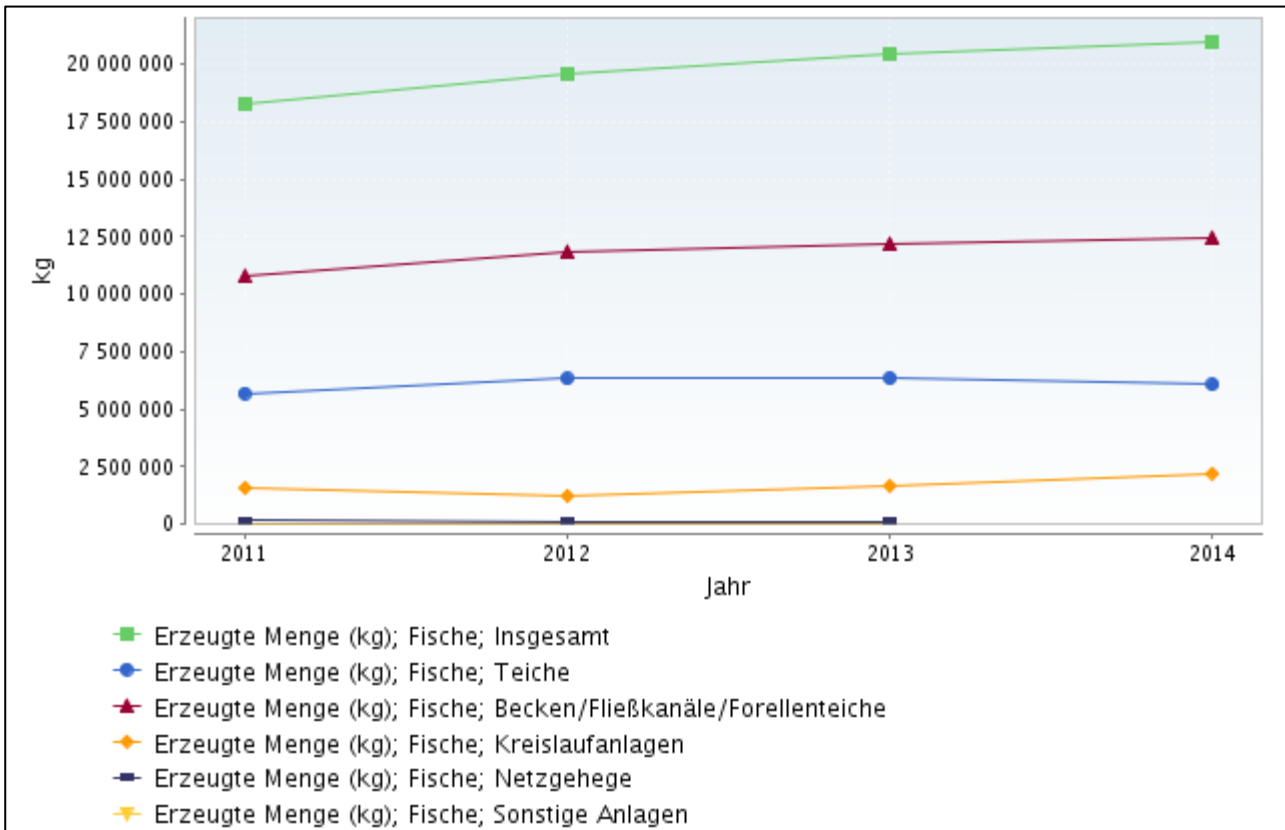
Demnach wurden in Deutschland im Jahr 2013 1.679 Tonnen Fisch in Kreislaufanlagen produziert, bei denen es sich laut Destatis zu 100% um Fisch aus Süßwasseranlagen gehandelt hat (Destatis 2014). Bezogen auf den insgesamt in 2013 in Deutschland gezüchteten Fisch entspricht dies einem Anteil von 8% der in Kreislaufanlagen gezüchteten Fische.

Betrachtet man die Entwicklung der deutschen Aquakulturproduktion in den Jahren von 2011-2014³, so stellt man fest, dass die insgesamt erzeugte Menge über die letzten Jahre entgegen dem globalen Trend nur in geringem Maße angestiegen ist (Abbildung 3-1). Von den in deutschen Aquakulturbetrieben gezüchteten Fischen stammen ca. 6.350 Tonnen der Fische (entspricht etwa 31% der Gesamtproduktion) aus Teichen. Dabei nicht berücksichtigt sind Forellenteiche, die gemeinsam mit der Aquakulturzucht in künstlich angelegten Fischzuchtbecken und Fließkanälen erfasst werden und mit ca. 12.230 Tonnen (entspricht etwa 60% der Gesamtproduktion) den

³ Nur für diesen Zeitraum waren Daten in der Datenbank GENESIS-Online des Statistischen Bundesamtes (Destatis) verfügbar.

größten Anteil der Fischzucht in Deutschland ausmachen. Die Beiträge aus der Fischzucht in Netzgehegen und sonstigen Anlagenarten sind demgegenüber von nachrangiger Bedeutung. Über die Jahre zeigt sich für alle Anlagenarten und somit auch für die Fischzucht in Kreislaufanlagen ein relativ stabiles, jedoch nicht signifikant wachsendes Produktionsniveau.

Abbildung 3-1: In deutscher Aquakultur erzeugte Menge an Fisch, nach Anlagenart



Quelle: Datenbank GENESIS-Online des Statistischen Bundesamtes

Im Folgenden sollen nun ausgewählte F&E-Projekte vorgestellt werden, die im Rahmen der DBU-Initiative „Nachhaltige Aquakultur“ gefördert wurden und zugleich einen direkten Bezug zu den im Überblick aktueller Arbeiten bereits aufgeführten Ansatzpunkten für eine nachhaltigere Fischzucht in Kreislaufanlagen aufweisen.

3.1.3. Einsatz von elektrochemischen Verfahren zur Prozesswasseraufbereitung

Im Rahmen des F&E-Projektes „Elektrochemische Verfahren in der Aquakultur“ (AZ: 28126-31; Kurztitel „EVA“) wurde untersucht, inwiefern die erforderliche Entkeimung von Kreislaufwasser aus geschlossenen Aquakulturanlagen mittels eines Elektrolyseverfahrens erfolgen kann. Ziel des F&E-Projektes war es, eine effektive Alternative zur klassischen Ozonierung bereitzustellen. Dieses Projekt wurde an den Forschungseinrichtungen der Gesellschaft für Marine Aquakultur in Büsum (GMA Büsum) durchgeführt.

Zur Desinfektion des Kreislaufwassers wurde im F&E-Projekt ein Elektrolyseverfahren eingesetzt, bei dem im Zuge der Elektrolyse an Diamantelektroden Hydroxidionen entstehen. Diese übernehmen die Funktion des Ozons als primäres Oxidationsmittel. In Wasser wirken Hydroxidionen hoch reaktiv, was zwar den Vorteil großer Effektivität, aber auch den Nachteil einer kürzeren

Halbwertszeit und damit einer kürzeren Wirkdauer im Vergleich zu Ozon mit sich bringt. Die Neuentwicklung wurde für das Wasseraufbereitungssystem einer landbasierten marinen Kreislaufanlage mit einem Gesamtvolumen von 40.000 Litern entwickelt; als Besatzfisch für die Testläufe wurde der Steinbutt (*Scophthalmus maximus*) betrachtet. Bei diesem System handelte es sich um eine Forschungsanlage, mit welcher die grundsätzliche Machbarkeit der neuen Technik demonstriert werden sollte. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden mehrere Versuchsdurchläufe absolviert, wobei die Anlage jeweils über einen Zeitraum von ca. 10 bis 14 Tagen in Betrieb war.

Im Zuge einer vom Öko-Institut durchgeführten vergleichenden Nachhaltigkeitsanalyse konnte gezeigt werden, dass die in ihrer Wirkung nutzengleichen Systeme auch aus Umweltsicht als gleichwertig anzusehen sind: So bestehen bei allen betrachteten Standard-Wirkungskategorien keine signifikanten Unterschiede zwischen Neuentwicklung und Referenztechnologie (hier: Ozonierung). Beispielsweise beträgt für beide Verfahren das Treibhausgaspotenzial 0,35 kg CO₂-Äquivalente pro 1.000 Liter behandeltem Prozesswasser. In Hinblick auf eine mögliche Weiterentwicklung der neuen Prozesstechnik ist zu erwähnen, dass der im Zuge der durchgeführten Untersuchung identifizierte, gegenüber der klassischen Ozonierung höhere Strombedarf des EVA-Systems im Wesentlichen auf den Betrieb einer zusätzlichen Pumpe zurückzuführen ist. Laut Aussage der Verantwortlichen des F&E-Projektes ist es jedoch denkbar, dass das EVA-Aggregat nicht wie bislang in einem eigenen Kreislauf und damit unter Einsatz einer eigenen Pumpe betrieben werden muss, sondern beispielsweise auch einer Proteinabschäumung vorgeschaltet werden kann. Somit ließe sich durch den Verzicht auf eine eigene Pumpe für das EVA-Verfahren entsprechend Strom einsparen (Möller et al. 2015).

Aus ökonomischer Perspektive konnten Anhaltspunkte für eine mögliche Vorteilhaftigkeit des EVA-Verfahrens gegenüber der klassischen Ozonierung aufgezeigt werden. Dies zeigt zum Beispiel der Vergleich der Kosten für die Bereitstellung von Strom und Sauerstoff. Die Mehrkosten durch den zusätzlichen Strombedarf des EVA-Aggregats liegen demnach um den Faktor 7 unter den Kosten für die Bereitstellung des für die Ozonierung erforderlichen flüssigen Sauerstoffs (Möller et al. 2015).

3.1.4. Kombiniertes Einsatz von niederfrequentem Ultraschall und UV-Licht zur Prozesswasseraufbereitung

Ziel des F&E-Projektes „Ultraschall-UV-Desinfektionssystem für Kreislaufanlagen in der Aquakultur“ (AZ: 2 28130-31; Kurztitel „US/UV“) war es, die Machbarkeit einer Wasseraufbereitung zu demonstrieren, welche unabhängig von Ozon ist und zugleich hohe Wasserqualitäten für einen kontinuierlichen Einsatz in kreislaufgeführten Aquakultur-Anlagen sichert. Das Projekt wurde von der Berliner Firma BANDELIN electronic GmbH & Co. KG in Kooperation mit der AquaVet Technologies Ltd. (Israel) und dem Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) in Berlin durchgeführt. Im Projekt wurde angestrebt, die desinfizierende Wirkung durch Behandlung mit UV-Licht und die günstigen Eigenschaften von niederfrequentem Ultraschall (US) zu kombinieren. Die im US/UV-Projekt entwickelte Technologie stellt eine Neuerung dar, die eine besonders effektive Desinfektion von Kreislaufwasser erlauben soll. Übergeordnetes Ziel war es, den Keimdruck, also die Gefahr des Entstehens von Krankheiten während des Dauerbetriebs einer Kreislaufanlage, auf ein für die Fische unbedenkliches Maß zu begrenzen und damit einen Beitrag zu einem dauerhaften Betrieb einer Kreislaufanlage zu leisten.

Der zusätzliche Betrieb eines Moduls zur Behandlung des Wassers mit niederfrequentem Ultraschall, im Vergleich zur alleinigen Behandlung des Wassers mit UV-Licht, wirkt sich in Form eines höheren Energiebedarfs der Neuentwicklung aus. Im Zuge der ökobilanziellen Untersuchung durch das Öko-Institut wurde quantifiziert, inwiefern entsprechend auch das berechnete Treibhausgas-

potenzial für die kombinierte Anwendung über dem jeweiligen Referenzszenario, der alleinigen Behandlung des Wassers mit UV-Licht, liegt (Möller et al. 2015).

In Hinblick auf einen möglichen Zusatznutzen des entwickelten US/UV-Systems können sich allerdings positive Effekte bezüglich einer geringeren Sterblichkeit der Besatzfische ergeben, die sich auch aus ökologischer Sicht positiv auswirken können. So konnte im Zuge überschlägiger Berechnungen gezeigt werden, dass sich unter bestimmten Voraussetzungen ein ökologischer Vorteil für das US/UV-Verfahren ergeben kann, falls durch die Neuentwicklung eine ca. 20% höhere Überlebensquote für die gezüchteten Fische erreicht wird (Möller et al. 2015).

Ein weiterer, potenzieller Vorteil des US/UV-Verfahrens besteht in den möglicherweise positiven Auswirkungen einer effektiveren Wasserentkeimung auf den Wachstumsprozess der Besatzfische. Allerdings konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis keine quantitativen Aussagen getroffen werden (Möller et al. 2015).

3.1.5. Kombinierte Feststoffseparation und Denitrifikation zur Prozesswasseraufbereitung

Das F&E-Projekt „Entwicklung einer umweltschonenden Technologie in der Aquakultur zur Entnahme von Stickstoff und Mikropartikeln in Kreislaufanlagen“ (AZ-28092-23, Kurztitel „Verringerung Mikropartikel“) hatte zum Ziel, ein Verfahren zur Senkung des Frischwasserbedarfs in geschlossenen Kreislaufanlagen zu entwickeln. Um den Wasserkreislauf der zur Verfügung stehenden Testanlage weitestgehend zu schließen, wurde ein biologisches Verfahren zur Denitrifikation (d.h. der Entfernung von Nitrat-Stickstoff) mit einer Membraneinheit zur Elimination von Feststoffen kombiniert. Beide Prozesse wurden in einem Prozess, dem Membran-Denitrifikations-Reaktor (MDR), gekoppelt. Im Projekt, das in den Einrichtungen des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart durchgeführt wurde, wurde die Wechselwirkung von Denitrifikation und Membranreinigung untersucht. Darüber hinaus wurde das Potenzial zur Begrenzung des unerwünschten Nährstoffeintrags in die Umwelt (Eutrophierung) ermittelt. Weiterhin sollte auch geprüft werden, ob sich durch die Denitrifikation die Lebens- und Haltungsbedingungen der Fische in Aquakulturanlagen verbessern lassen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Nachhaltigkeitsanalyse des Öko-Instituts zeigen, dass sich die Verwendung eines MDR in Form einer potenziell höheren Umweltbelastung im Vergleich zu einem Haltungssystem ohne MDR niederschlägt. Dies gilt jedoch nur dann, wenn bei einem Einsatz der MDR in einer großtechnischen Anlage die Betriebsbedingungen nicht optimiert werden können und insbesondere die Stickstoff-Eliminierungskapazität des Reaktors nicht voll ausgeschöpft werden kann. Die im F&E-Projekt entwickelte Verfahrenstechnik wird derzeit noch nicht in kommerziellen Aquakultur-Kreislaufanlagen eingesetzt. Bei der Auslegung der zur Verfügung stehenden Technikumsanlage konnten Effizienzaspekte, insbesondere bei der Pumpentechnik, bislang nicht berücksichtigt werden. Im Zuge der im Bewertungsprojekt durchgeführten Sensitivitätstests konnte gezeigt werden, dass sich der bei der betrachteten Anlage festgestellte ökologische Nachteil des MDR-Verfahrens mit zunehmender Stickstofffracht verringert. Demnach lohnt sich der Einsatz eines MDR auch aus ökologischen Gesichtspunkten, sofern die Nitrat-N-Reduktionskapazität einen bestimmten Schwellenwert erreicht (Möller et al. 2015).

Die durchgeführten tierärztlichen Untersuchungen ergaben, dass das MDR-Verfahren dazu beitragen kann, den Stresspegel der Besatzfische signifikant zu senken. Somit kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz des MDR-Verfahrens unter Tierwohlaspekten ein Zusatznutzen für die Besatzfische besteht. Allerdings konnte dieser Zusatznutzen aufgrund der zur Verfügung

stehenden Datenbasis nicht in ökologisch bzw. ökonomisch quantifizierbare Größen übersetzt werden (Möller et al. 2015).

3.2. Einordnung der bestehenden prozesstechnischen und tierschutzrelevanten Herausforderungen

Es existieren aus den zurückliegenden Jahren vergleichsweise wenige Artikel in der wissenschaftlichen Fachliteratur, die sich explizit und auf Systemebene mit der technischen Machbarkeit von Kreislaufanlagen beschäftigt haben. Wohl aber gibt es zahlreiche Beiträge zur Erweiterung des verfahrenstechnischen Repertoires auf Prozessebene und zu Ansätzen der weiteren Optimierung bestehender technischer Lösungen.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel dargestellt, stehen hier Forschungsvorhaben zu Prozessen im Vordergrund, die derzeit noch technologische Herausforderungen darstellen (z.B. Denitrifikation), oder aber solche Prozesse, bei denen hinsichtlich der Betriebskosten ein großes Optimierungspotenzial vermutet wird (z.B. Desinfektion). Ziel der Forschungsvorhaben ist dabei häufig die Suche nach einer optimalen Einstellung relevanter Parameter in Hinblick auf eine effektive und zugleich effiziente Prozessführung. Ebenso steht häufig die Verbesserung der Haltungsbedingungen von in Kreislaufanlagen gezüchteten Fischen im Vordergrund.

Entsprechend ihres Ursprungs lassen sich folgende unterschiedliche Typen von Herausforderungen in Bezug auf die Kreislauftechnik charakterisieren:

- Herausforderungen, die von außen ins System eingetragen werden (z.B. Desinfektion des Frischwassers, Verunreinigung durch Futtermittel, Eintrag von Pathogenen auf Besatzfische) – vgl. Abschnitt 3.2.1;
- Herausforderungen, die im Zuge der Kreislaufführung innerhalb des Systems entstehen (Anreicherung des Wassers mit nicht aufgenommenen Futterbestandteilen und Ausscheidungen der Fische, Veränderungen der physikalischen und chemischen Wasserparameter über die Zeit) – vgl. Abschnitt 3.2.1;
- Herausforderungen, die aus dem System in die Umwelt abgegeben werden. (z.B. Feststoffseparation, eutrophierend wirksame Nitrat- und Phosphatfrachten im Abwasser) – vgl. Abschnitt 3.2.1.

3.2.1. Handhabung von Problemen, die aus der Umwelt ins System eingetragen werden

Pathogene Bakterien und Keime gelangen entweder über die eingesetzten Fische selbst, das insbesondere in der Fischlarven- und Jungfischzucht erforderliche Lebendfutter oder aber auch über den Frischwasserzulauf in die Kreislaufanlage. Ebenso ist für bestimmte Prozesse wie z.B. Nitrifikation und Denitrifikation der Einsatz von Hilfsstoffen erforderlich. So sinkt zum Beispiel im Zuge der Nitrifikation der pH-Wert des Kreislaufwassers ab, der durch die Zugabe von Hydrogencarbonat neutralisiert werden muss. Die anaeroben denitrifizierenden Bakterienstämme sind auf die Zugabe einer externen Kohlenstoffquelle angewiesen, was je nach Wahl des Substrats negative Auswirkungen auf die Wasserqualität in der Anlage haben kann (Hamlin et al. 2008). Aus technologischer Sicht existieren die nachfolgend aufgeführten Maßnahmen zur Kontrolle von Problemen, die aus der Umwelt in das Kreislaufsystem eingetragen werden:

- Verfahren zur effektiven, zugleich aber schonenden Desinfektion besonders sensibler Entwicklungsstadien (Fischeier, frühe Larvenstadien) (Johari et al. 2015, Lahnsteiner & Kletzl 2015, Chambel et al. 2014).

- Einhaltung einer Quarantänephase vor dem Einsetzen der Fische in neue Haltungsbecken.
- Kontrolle und vorbeugende Behandlung des Frischwassers mit einer Kombination von UV-Licht und/oder Ozonierung.
- Weitgehend isolierte Produktion von Lebendfutter (z.B. Artemien, Rädertierchen) zur Fischlarvenaufzucht und dadurch weitgehende Reduzierung der Gefahr einer Einschleppung von Pathogenen.

Auch bei sorgfältiger Anwendung der skizzierten Maßnahmen wird sich nicht verhindern lassen, dass für Fische pathogene Keime in das System gelangen. Somit ist eine Doppelstrategie aus der möglichst weitgehenden Begrenzung des Eintrags solcher Schadorganismen und zugleich deren effektiver Kontrolle innerhalb des Zuchtssystems unabdingbar.

3.2.2. Handhabung technischer und tierschutzrelevanter Prozessparameter innerhalb der Anlage

Innerhalb der Anlage sind sowohl die ins System eingetragenen Pathogene, als auch die Akkumulation solcher Stoffe problematisch, die sich negativ auf die Haltungsbedingungen auswirken. Krankheiten entstehen nicht de novo und können von diesem Standpunkt aus grundsätzlich den Problemen zugeordnet werden, die aus der Umwelt ins System eingetragen werden (vgl. Abschnitt 3.2.1). Greifen die in Abschnitt 3.2.1 genannten Maßnahmen jedoch nicht, muss die Behandlung von Krankheiten, unabhängig von der Herkunft des Erregers, innerhalb des Kreislaufs geschehen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich in Bezug auf die Tiergesundheit immer wieder Wechselwirkungen (z.B. stressbedingt erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten) ergeben können, die das Immunsystem von einzelnen Organismen angreifen. Gelingt es nicht, den Keimdruck innerhalb der Anlage auf ein für die Fische verträgliches Maß zu begrenzen, führt dies letztlich zu einer höheren Anfälligkeit der Tiere gegenüber Krankheiten.

Die Eignung von Ozon zur effektiven Entfernung von toxischen Substanzen aus dem Kreislaufwasser, insbesondere die Entfernung von Ammonium, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen (Schroeder et al. 2011). Zudem können die bei der Ozonierung entstehenden Oxidationsprodukte (OPO, s.o., S. 10) eine toxische Wirkung auf die Fische in der Anlage haben (Reiser et al. 2010). Ebenso besteht bei nicht ausreichender Separation von Feststoffen die Gefahr, dass für die Entwicklung von Pathogenen günstige Bedingungen geschaffen werden (Wold et al. 2014). Aus prozesstechnischer Sicht bestehen die nachfolgend aufgeführten Maßnahmen zur Kontrolle der Herausforderungen, die innerhalb der Anlage bestehen:

- Design der Anlagen (Form, Größe und Materialien für die Fischhaltebecken, einzustellende bzw. aufrechtzuerhaltende Strömungsverhältnisse).
- Entscheidung für eine Prozesswasseraufbereitung in einem eigenen Aufbereitungskreislauf oder alternativ für ein Konzept der intergrierten Prozesswasseraufbereitung im Fischhaltebecken.
- Wahl der unter gegebenen Anforderungen jeweils am besten geeigneten Verfahren zur mechanischen, biologischen und chemischen Reinigung und Aufbereitung des Prozesswassers (siehe Kapitel 3.1).
- Überwachung von Stressparametern in der Anlage (z.B. Monitoring des Stresshormons Cortisol im Prozesswasser).
- Ggf. Schaffung von Zonen, die den Fischen Raum für angeborene Verhaltensmuster bieten (z.B. Ruhe- bzw. Rückzugsräume, Schwarmbildung).

- Weitgehende Automation der Prozessführung mit integriertem, gegenüber dem Ausfall von Komponenten resilientem Störfallmanagement.

3.2.3. Kontrolle von Problemen, die aus dem System in die Umwelt ausgetragen werden

Ein immanenter Vorteil der Fischzucht in landbasierten Kreislaufanlagen besteht darin, dass sich vergleichsweise gut kontrollieren lässt, welche Stoffe und Substanzen aus dem System in die Umwelt gelangen. Theoretisch kann daher ein Austrag schädlicher Stoffe weitgehend vermieden werden. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass es im Zuge von Störungen im Produktionsablauf (z.B. notwendige Verdünnung kritischer Nitrat-N-Konzentrationen) auch bei Kreislaufanlagen zum Anfall nitratbelasteten Abwassers und damit dem Austrag eutrophierend wirksamer Stoffe kommt. Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten zur Behandlung des Abwassers. Die Klärung kann entweder direkt vor Ort in einer eigenen Kläranlage erfolgen oder aber über die Abwasserentsorgung in einer kommunalen Kläranlage (KKA). In beiden Fällen gilt, dass ggf. eine externe Zugabe von Kohlenstoff erforderlich ist, wenn die Anlage bereits stickstofflimitiert ist.

3.3. Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltige Fischzucht in Kreislaufanlagen

3.3.1. Bestehende Kriterien bei Zertifizierungseinrichtungen und NGOs

Für den Wildfang von Fischen werden schon seit einiger Zeit Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für eine langfristig tragfähige, die marinen Ressourcen schonende und letztlich nachhaltige Fischerei diskutiert. Mit dem starken Wachstum der Aquakultur-Fischzucht wurden auch für diesen Sektor entsprechende Zertifizierungskriterien eingeführt, die eine transparente Vergabe von Labels im Aquakultursektor ermöglichen sollen. Heute gibt es mehrere, mitunter auch sehr verschiedene Zertifizierungssysteme. Neben den fischartenspezifischen Standards des Aquaculture Stewardship Council (ASC)⁴, sind hier beispielsweise die Initiativen von GlobalG.A.P.⁵ und Friends of the Sea (FOS)⁶ zu nennen. Sehr weitreichende Anforderungen erhebt auch die Zertifizierung durch Naturland im Vorfeld der Vergabe ihres Siegels für ökologische Aquakultur⁷. Ebenso hat sich die Europäische Union im Zuge ihrer EU-Öko-Verordnung⁸ mit Vorgaben zur Sicherstellung nachhaltiger Aquakultur beschäftigt.

Die Fischzucht in geschlossenen Kreislaufanlagen wird in den genannten Kriterienkatalogen entweder nicht explizit diskutiert (GlobalG.A.P.; FOS) oder aber die Aufzucht und Haltung der Fische in künstlichen Behältnissen (z.B. Glasfaser, Polyester) wird für eine Zertifizierung als unzulässig beschrieben (Naturland ökologische Aquakultur). Als Hauptargument wird hier eine nicht artgerechte Haltung der Fische in künstlichen Becken und Behältnissen angeführt. Entsprechend wird gefordert, dass der Beckenboden gekiest oder mit Erde bedeckt sein und dass den Fischen die Möglichkeit zum Rückzug in Verstecke und zum artspezifischen Verhalten gegeben werden muss. In dieselbe Richtung zielt auch die Argumentation seitens der Europäischen Union, die in ihren spezifischen Vorschriften für aquatische Haltungseinrichtungen geschlossene Kreislaufanlagen als Haltungssysteme für die ökologische Tierproduktion in Aquakultur

⁴ www.asc-aqua.org

⁵ www.globalgap.org

⁶ www.friendofthesea.org

⁷ www.naturland.de/de/naturland/richtlinien.html

⁸ www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Oekolandbau/_Texte/EG-Oeko-VerordnungFolgerecht.html

explizit verbieten. Davon ausgenommen sind lediglich Brut- und Jungtierstationen sowie Anlagen zur Erzeugung von ökologischen Futterorganismen (EG 889 2008; EG 710 2009).

In den fischartenspezifischen Standards des ASC wird die Aufzucht von Junglachsen (sog. Smolts) in halb-geschlossenen und geschlossenen Frischwasseranlagen diskutiert, wobei besonders darauf verwiesen wird, dass eine Beeinträchtigung natürlicher Fischbestände durch die Aquakultur vermieden werden muss. Weiterhin wird gefordert, dass die Wasserqualität in Kreislaufanlagen kontinuierlich im Ausfluss des Systems zu messen und die Einhaltung einer Obergrenze zur O₂-Saturierung des Ausflusswassers sicherzustellen ist (ASC Salmon Standard). Mit Bezug zur Zucht von Regenbogenforellen wird als Ziel angegeben, die Umweltauswirkungen der Fischzucht unabhängig vom jeweiligen Zuchtsystem zu erfassen (ASC Freshwater Trout Standard). Jedoch wird nicht spezifiziert, wie sich die funktionelle Äquivalenz der Systeme in der Praxis sicherstellen lässt.

Die Kreislaufaquakultur pauschal von einer Zertifizierung als ökologisch/biologische Fischzucht auszuschließen, hat in der Vergangenheit bereits Diskussionen ausgelöst (fair-fish 2014). Die in diesem Zusammenhang häufig vorgebrachte Argumentation, wonach eine möglichst naturnahe Tierzucht in künstlichen Haltungssystemen nicht bereitgestellt werden könne, ist nach Ansicht der Autoren nicht grundsätzlich gerechtfertigt. Hinterfragenswert ist zum Beispiel die Bedingung, wonach dem Fisch der Kontakt mit natürlichem Boden geboten sein muss. Es erscheint fraglich, ob für das Leben der Fische tatsächlich die naturnahe Gestaltung des Bodens oder nicht vielmehr das Wasser, in dem die Fische leben, entscheidend ist. Für diese ursprünglich aus der biologischen Landwirtschaft stammende Bedingung wäre zudem kritisch zu prüfen, ob ein entsprechender Zugang zu natürlichem Grund in Netzkäfigen sichergestellt ist, die grundsätzlich bio-zertifiziert werden können. Die Autoren vertreten daher wie die Nichtregierungsorganisation fair-fish die Ansicht, dass ein wesentliches Ziel einer guten Aquakulturpraxis darin besteht, eine der jeweiligen Fischart entsprechende Umgebung zu schaffen. Dies kann unter geeigneten Rahmenbedingungen auch eine Kreislaufanlage bieten (fair-fish 2014). Grundsätzlich ist eine Kreislaufanlage aus technologischer Sicht sehr gut dazu geeignet, dauerhaft für die Fische optimale Haltungsbedingungen bereitzustellen.

Sollte im Zuge eines künftigen Ausbaus der Fischzucht in geschlossenen Kreislaufanlagen auch die (Weiter-) Entwicklung anlagenspezifischer Standards für eine nachhaltige Fischzucht verstärkt in den Fokus rücken, wird es darauf ankommen zu prüfen, inwiefern tiergesundheitliche und Tierwohlaspekte in Kreislaufanlagen adressiert und entsprechende Herausforderungen effektiv gehandhabt werden können. Dabei gilt es, fischartenspezifisch zentrale Prozessparameter wie maximale Besatzdichten und Vorgaben zur Gestaltung der Haltebecken zu identifizieren und zugleich Vorgaben zur Kontrolle von Tierschutzaspekten (z.B. der Stresshormonkonzentrationen im Kreislaufwasser) zu entwickeln. Hier bietet sich die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen der Tiermedizin wie der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover (TiHo Hannover)⁹ an.

3.3.2. Differenzierung der Vermarktung von Fischprodukten

Die Herkunft von Fischen und Fischprodukten ist für die erfolgreiche Vermarktung schon heute von großer Bedeutung. Die Angaben zum jeweiligen Fanggebiet oder auch des Herkunftslandes bei Fischen aus Aquakultur sind typische Informationen, die an die Konsumentinnen und Konsumenten kommuniziert werden. Im sogenannten „Einkaufsratgeber Fisch“¹⁰ werden den

⁹ www.tiho-hannover.de

¹⁰ www.greenpeace.de/fischratgeber/

Konsumentinnen und Konsumenten darüber hinaus Informationen zum Wildfischbestand in der jeweiligen Region bzw. zur Gefährdung natürlicher Bestände angeboten.

Um eine möglichst nachhaltige Aquakultur in geschlossenen Kreislaufanlagen zu befördern, könnte sich die Vermarktung von Fischprodukten aus landbasierter Kreislaufaquakultur in Zukunft vor allem auf solche Fischarten fokussieren, die einerseits von Konsumentinnen und Konsumenten stark nachgefragt werden, und deren Wildbestände andererseits bereits heute durch die marine Fangfischerei unter erheblichem Fangdruck stehen. Die Aufzucht von Fischen in landbasierten marinen Kreislaufsystemen könnte zur Verminderung des Fangdrucks auf die natürlichen Bestände beitragen, indem sie einen signifikanten Teil der Nachfrage von Verbraucherinnen und Verbrauchern decken. Eine in diese Richtung weisende Initiative stellt die Vermarktung von Doraden und Wolfsbarschen aus der Meeresfischzucht Völklingen in ausgewählten Märkten der EDEKA-Gruppe sowie deren Kommunikation in ihrem Kundenmagazin dar.

Fische aus Kreislaufanlagen könnten zukünftig weitere, für die Kaufentscheidung der Konsumentinnen und Konsumenten relevante Vorteile bieten. So sind in diesem Zuge beispielsweise die Bereitstellung besonders frischer Produkte von konstanter Qualität aus kontrollierten Zuchtssystemen und mit vergleichsweise kurzen Transportwegen zu nennen. Hierzu ist es jedoch erforderlich, dass das Wissen um Tiergesundheit und Tierschutz in Kreislaufanlagen weiter ausgebaut und die Ergebnisse entsprechend in die Praxis überführt werden können. Nach Einschätzung der schweizerischen Nichtregierungsorganisation „fair-fish“ ist grundsätzlich kein Zuchtssystem besser zur Kontrolle der Haltungsbedingungen geeignet als eine Kreislaufanlage. Begründet wird dies damit, dass hier alle relevanten Prozessparameter umfassend kontrolliert werden können. Dies schließt auch Parameter mit ein, die für das Fischwohl besonders relevant sind (fair-fish 2014).

3.3.3. Potenziale und Herausforderungen der Multitrophie bzw. Polykultur

Unter Multitrophie versteht man die gemeinsame und zeitgleiche Zucht bzw. Produktion von Organismen unterschiedlicher trophischer Ebenen. Gemeint ist damit, dass Algen, Krebse und Würmer gemeinsam mit kleineren und größeren Fischen in einem Zuchtssystem gehalten werden.

Ein Ansatzpunkt zur Realisierung der Potenziale des Multitrophie-Ansatzes ist die sogenannte „Biofloc“-Technologie, die darauf zielt, die Wasserqualität in der Aquakultur zu verbessern, indem durch Wachstum von Mikroorganismen die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte innerhalb der Anlage kontrolliert und zugleich proteinreiche Nahrung für die Besatzfische produziert wird. Konkret erfolgt dies entweder über eine extern zugegebene Kohlenstoffquelle oder über mit Kohlenstoff angereichertes Futter (Avnimelech 2014; Crab et al. 2012). Als eine mögliche Herausforderung der Technologie ist die Trübung zu nennen, die der Einsatz von Bioflocs¹¹ im Wasser hervorruft. Dies kann sich z.B. nachteilig auf eine Behandlung des Wassers mit UV-Licht auswirken. Weiterhin bestehen derzeit noch Unsicherheiten bezüglich der dauerhaft stabilen, kombinierten Aufzucht von Organismen verschiedener trophischer Ebenen. Bezüglich der Vielfalt möglicher Wechselwirkungen und Interaktionen besteht Forschungsbedarf.

Auch in Bezug auf die biologische Kontrolle von Parasiten wird die Polykultur, d.h. die gemeinsame Haltung verschiedener Besatzfischarten in derselben Anlage bzw. Haltungsbecken diskutiert. Dahinter steht die Idee, dass die Tiere einen direkten Nutzen aus der Polykultur ziehen, wenn etwa Lippfische zur biologischen Beseitigung von Ektoparasiten in der Lachszeit eingesetzt werden. Wenn auch auf umweltoffene Teichsysteme bezogen, ist entsprechend der „Naturland

¹¹ Bioflocs bestehen aus Bakterien und eukaryotischen Einzellern (Protozoen) und sind wenige Millimeter groß.

Richtlinien für die ökologische Aquakultur“ eine Haltung in Polykultur zu bevorzugen (Naturland e.V. 2014).

3.4. Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Grundsätzlich bestehen bei Kreislaufanlagen erhebliche Potenziale, zu einer nachhaltigen Aquakultur beizutragen. In diesem Zusammenhang wird besonders betont, dass das Wasser in einer Kreislaufanlage rezykliert wird und sich somit die Einträge aus der Anlage in die Umwelt reduzieren lassen. Gleichzeitig steht der wirtschaftliche Betrieb einer Kreislaufanlage vor der Herausforderung des hohen spezifischen Energiebedarfs und des derzeit auch in einer geschlossenen Anlage noch erforderlichen Wasseraustauschs. Bezüglich des Betriebs einer Kreislaufanlage und insbesondere bezüglich der effektiven und zugleich effizienten Aufbereitung des Prozesswassers sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, die im folgenden Abschnitt dargestellt werden (3.4.1). Aktuelle Ansätze und verbleibende Forschungsbedarfe im Bereich der systematischen Nachhaltigkeitsbewertung der Fischzucht in Aquakultur werden im Abschnitt 3.4.2 diskutiert. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 3.4.3 eine zeitliche Einordnung der beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sowie eine Evaluation der jeweiligen Ansätze hinsichtlich der Relevanz für ein weiteres Engagement seitens der DBU.

3.4.1. Optimierung der Prozess- und Anlagentechnik

Der Bereitstellung prozesstechnisch robuster, langfristig wirtschaftlich arbeitender und dabei den Anforderungen an den Tierschutz genügender Kreislaufsysteme kommt eine wesentliche Bedeutung bei der künftigen Entwicklung des Aquakultursektors zu. Dabei wird es insbesondere darauf ankommen, die in der Vergangenheit häufig im Labormaßstab oder an Pilotanlagen erprobten Verfahren und Prozesse in Produktionsanlagen zu evaluieren. Dies bedeutet, dass im Zuge experimenteller Studien wesentliche Prozessparameter (wie die Wahl der Besatzfische, die jeweils optimalen Besatzdichten sowie die Wahl des Fütterungsregimes) unter alltagspraktischen Bedingungen erprobt und evaluiert werden müssen. Die derzeit vorliegenden Erkenntnisse beruhen vielfach auf Analysen, die in experimentellen Forschungsanlagen gewonnen wurden. Dies wirkt sich nicht zuletzt in entsprechend geringeren Partikel- und Stickstofffrachten aus, mit denen die jeweiligen Komponenten der Wasseraufbereitung beaufschlagt wurden. In Bezug auf die erforderliche Hochskalierung der Anlagentechnik gilt es, im Zuge weiterer F&E-Aktivitäten einen effizient betriebenen Wasserkreislauf mit einer optimalen Dimensionierung ggf. erforderlicher Pumpen und Netzteile sowie einer weitgehenden Automation der Anlagentechnik zu realisieren. Hierzu ist es auch erforderlich, kritisch zu prüfen, welcher Mehrwert durch eine bestimmte Kombination zweier oder mehrerer Verfahren erzielt werden kann (siehe Abschnitte 3.1.4 und 3.1.5). Ebenso sollte im Zuge weiterer F&E-Aktivitäten evaluiert werden, ob und ggf. für welche Teilprozesse (z.B. die Entkeimung des Wassers durch Anwendung von niederfrequentem Ultraschall) eine temporäre Zuschaltung ausreicht oder aber, ob ein kontinuierlicher Betrieb erforderlich ist.

In bestimmten Fällen, wie etwa bei der Behandlung des Prozesswassers mit elektrochemischen Verfahren (siehe Abschnitt 3.1.3), schließt der Forschungs- und Entwicklungsbedarf zunächst auch die weitere Erprobung der vielversprechenden Technik in Langzeitversuchen mit ein. So besteht z.B. weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der unter Praxisbedingungen erzielbaren Standzeiten von Diamantelektroden, die in dem Verfahren zur Elektrolyse des Wassers eingesetzt werden. Auch die Frage der optimalen Integration dieses Verfahrens in bereits bestehende Prozesse der Wasseraufbereitung stellen vor diesem Hintergrund vielversprechende Ansätze zur weiteren Entwicklung des Verfahrens dar.

Die Erprobung und weitere Optimierung der in den Abschnitten 3.1.3 bis 3.1.5 skizzierten Verfahren zur Entkeimung des Prozesswassers und zur Verringerung der Stickstoff und Partikel-fracht in hochskalierten Zuchtanlagen bietet auch die Möglichkeit, stärker als bisher den gesamten Zuchtzyklus in den Mittelpunkt der Betrachtung zu stellen. Darauf aufbauend ist es dann möglich, den Mehrwert des jeweiligen Verfahrens im Zuge von Kosten-Nutzen-Betrachtungen zu evaluieren (siehe auch Abschnitt 3.1.4).

Auch unter Tierschutzaspekten besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich einer möglichst schonenden Erhebung und kontinuierlichen Kontrolle tierschutzrelevanter Prozessparameter innerhalb einer Kreislaufanlage. Basierend auf einer entsprechend verbesserten Datengrundlage sollte es zudem ein Ziel weiterer F&E-Aktivitäten sein, artspezifische Vorgaben für eine nachhaltige Fischzucht in Kreislaufanlagen abzuleiten. Ein Beispiel hierfür ist die Echtzeit-Erhebung des Cortisolgehaltes im Fischhaltebecken, die einen Rückschluss auf den innerhalb einer Kreislaufanlage herrschenden Stresspegel erlaubt (vgl. Abschnitt 3.1.5).

Darüber hinaus bestehen derzeit noch erhebliche Wissenslücken bezüglich der bei einer kommerziellen Fischzucht in Kreislaufanlagen anfallenden Verluste. Neben einer verbesserten Wissensbasis zu diesen Verlusten sollten künftige F&E-Aktivitäten im Bereich der Hochskalierung prozess-technischer Verfahren soweit möglich auch vor dem Hintergrund evaluiert werden, welchen Beitrag sie zur Verminderung von Verlusten leisten können.

Mit einem weiteren Ausbau der Fischzucht in geschlossenen Kreislaufanlagen werden perspektivisch auch solche Maßnahmen verstärkt in den Fokus rücken, die auf eine Optimierung der langfristig erzielbaren Erträge ausgerichtet sind. Diesbezüglich zu nennen sind Maßnahmen zu einem weiter verbesserten Bestandsmanagement, etwa in Hinblick auf die für einen kontinuierlichen Zuchtbetrieb erforderliche Planung zeitversetzter Zuchtkohorten. Hierunter fallen auch solche Maßnahmen, die über eine entsprechende Angebotsdiversifikation zu einer gezielten Absicherung gegen produktionsbedingte Risiken bzw. nachfragebedingte Marktrisiken beitragen können.

3.4.2. Systematische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquakultur-Systeme

Grundsätzlich ist es aus methodischer Sicht kaum möglich, eine Nachhaltigkeitsbewertung von neuen, in Entwicklung befindlichen Technologien im Bereich der Aquakultur in einer absoluten Betrachtungsweise durchzuführen. Möglich ist es hingegen, diese neuen Technologien geeigneten Referenztechnologien gegenüber zu stellen und damit die relativen Vorteile bzw. Nachteile unter verschiedenen Nachhaltigkeitskriterien quantitativ zu erfassen und zu vergleichen. Dazu müssen sowohl die neuen Technologien als auch die betreffenden Referenztechnologien festgelegt und hinsichtlich der Systemgrenzen der Bilanzierung beschrieben werden. Referenztechnologien können dabei entweder herkömmliche, d.h. gegenwärtig am Markt vorherrschende Technologien, aber auch alternative Neuentwicklungen sein. Dabei sollten jeweils der gesamte Lebenszyklus und alle relevanten Prozesse im Lebenszyklus in die Betrachtung einbezogen werden.

Unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen sollte im Zuge weiterer F&E-Aktivitäten ein umfassender Vergleich mit der jeweiligen Referenztechnologie gewährleistet sein. Die durchzuführenden Nachhaltigkeitsanalysen sollten zunächst auf der Ebene der ökologischen Aspekte durchgeführt werden, da die Umweltfreundlichkeit einer Neuentwicklung die Grundvoraussetzung für einen positiven Beitrag in Hinblick auf eine nachhaltige Aquakultur darstellen sollte. Als Ausgangspunkt für einen quantifizierenden Vergleich der Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Aquakultursysteme werden Ökobilanzen als geeignete methodische Ansatzpunkte empfohlen. In Tabelle 3-2 werden die Vor- und Nachteile der Ökobilanzmethodik vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile einer Ökobilanz (engl. „life cycle assessment“, LCA)

Eine Ökobilanz kann...	Eine Ökobilanz kann nicht...
ein Produkt bezüglich seiner Umwelleistung mit einem bestehenden Produkt am Markt vergleichen	bzw. nur lückenhaft stoffbezogene Risiken berücksichtigen
während des Entwicklungsprozesses verschiedene Verfahrens- bzw. Materialalternativen bewerten	qualitative Nachhaltigkeitsaspekte adressieren, sofern diese mit Stoff- bzw. Energieflussmodellen nicht erfassbar sind (z.B. Tierschutzaspekte)
Verlagerungen von Umweltbelastungen identifizieren (sowohl innerhalb von Lebenswegabschnitten als auch von Umweltmedien)	lokale Umweltauswirkungen identifizieren
in Kombination mit einer lebenszyklusbasierten Kostenanalyse (engl. „life cycle costing“, LCC) die öko-effizientesten Lösungen identifizieren	prozess- bzw. technologiebezogene Expertise ersetzen, aber diese bei der Identifizierung von optimalen Lösungen unterstützen

Quelle: Öko-Institut e.V.

In Ergänzung zu einer ökobilanziellen Analyse kann es, abhängig vom jeweiligen Bewertungskontext, erforderlich sein, gezielt methodische Ansätze zu identifizieren, welche die Ökobilanz sinnvoll ergänzen. So ist es z.B. in Bezug auf die Eutrophierung möglich, eine ergänzende, stoffbezogene Expositionsabschätzung zur Evaluation lokaler Umweltauswirkungen auf die umgebenden Ökosysteme zu erstellen. Auch bezüglich der im Rahmen einer Ökobilanz nur bedingt möglichen Bewertung von Biodiversitätseffekten kann der Einbezug weiterer Analyseinstrumente erforderlich sein.

Es ist davon auszugehen, dass es auch bei der zukünftigen Ausgestaltung des Aquakultursektors einen Mix aus verschiedenen Technologien und unterschiedlichen Aquakultursystemen geben wird. Die Ableitung von unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu favorisierenden Technologieoptionen stellt somit ein weiteres prioritäres Ziel künftiger Forschungsansätze dar. Ebenso wird es erforderlich sein, für die in der Zukunft als relevant identifizierten Systeme jeweils technologie-spezifische Optimierungspotenziale herauszuarbeiten. Insbesondere für die Fischzucht in Kreislaufanlagen konnten diesbezüglich durch die Analysen, die im Zuge des Bewertungsprojekts der DBU-Förderinitiative „Nachhaltige Aquakultur“ durchgeführt wurden, wesentliche Beiträge geleistet werden. Beispielsweise ist in diesem Zusammenhang die Bewertung des Projekts „Biologische Abwasserreinigung in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch integrierte Kultur von Halophyten“ zu nennen (vgl. Abschnitt 5.1.3), bei der die Fischzucht in einer Kreislaufanlage mit der Fischzucht in einem Netzkäfig verglichen wurde.

Insbesondere vor dem Hintergrund des kontinuierlichen Wachstums der Aquakultur in ihren verschiedenen technologischen Ausprägungen ist der Aus- und Aufbau einer belastbaren Datengrundlage zur Bewertung der jeweiligen Nachhaltigkeitspotenziale der verschiedenen Systeme und Technologieoptionen von grundlegender Bedeutung. Dies wiederum ist eine wesentliche Voraussetzung, um das gegenwärtig starke Wachstum des Aquakultursektors frühzeitig in geordnete, aus Umweltsicht wünschenswerte Bahnen zu lenken. Aus dem rasanten Wachstum ergibt sich nicht zuletzt auch eine Dringlichkeit zur baldmöglichen Identifikation von unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten relevanten Leistungsindikatoren. Entsprechende Leistungsindikatoren (engl. „Key Performance Indicators“, KPI), die sich beispielsweise auf den Energiebedarf der Anlage, den Bedarf an

Frischwasser oder aber auf die Futtermittelverwertung beziehen können, können ferner dazu genutzt werden, die jeweils besten verfügbaren Technologien (BVT) zu bestimmen. In einem weiteren, darauf aufbauenden Schritt ist es perspektivisch auch möglich, unterschiedliche Anlagen entsprechend der jeweils realisierten Technologieoptionen einem Leistungsvergleich (Benchmarking) zu unterziehen.

Eine systematische Nachhaltigkeitsbewertung entfaltet insbesondere dann eine große Wirkung, wenn sie frühzeitig erfolgt. Daher sollte bereits während des Entwicklungsprozesses für ggf. bestehende Technologieoptionen eine Analyse der jeweils nachhaltigkeitsrelevanten Aspekte durchgeführt werden. So ist es sinnvoll, bereits bei der Planung künftiger F&E-Aktivitäten eine entwicklungsbegleitende Bewertung dieser Aspekte mitzuberücksichtigen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die für eine Bewertung erforderliche Datenerfassung bereits bei der Konzeption der Anlage mitbedacht wird. Liegen Daten zu bestimmten Leistungsindikatoren entsprechend frühzeitig vor, können diese entsprechend in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.

Um dem Lebenszyklusgedanken von ökobilanziellen Analysen vollständig Rechnung zu tragen, ist es erforderlich, im Zuge künftiger F&E-Aktivitäten auch die der Fischzucht nachgelagerten Prozesse in die Betrachtung miteinzubeziehen. Entsprechend sollten auch die Verarbeitungsprozesse, der bei Fischprodukten in aller Regel gekühlt erfolgende Transport und die Lagerung im Handel mitberücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Lagerung und Zubereitung der Produkte im Haushalt der Verbraucherinnen und Verbraucher. Auf der Basis dieser Gesamtschau aller relevanten Prozesse sollten schließlich die Optimierungen in Hinblick auf die Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt werden.

Mittelfristig sollte es auch das Ziel weiterer Forschungsaktivitäten sein, ein umfassendes Stoffstrommodell der Bereitstellung, der Prozessierung und der Nachfrage von Fisch und Fischprodukten zu entwickeln. Dieses sollte perspektivisch auf internationaler Ebene angelegt werden. Hierzu wird es darauf ankommen, die Aquakulturprozesskette in ihrer Gesamtheit (siehe oben) genau zu analysieren und dabei die wesentlichen systembeeinflussenden Faktoren zu identifizieren. Die Ergebnisse des daraus entstehenden Modells können genutzt werden; um in Form wissenschaftlicher Zukunftsszenarien die weitere Entwicklung des Aquakultursektors unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu begleiten.

3.4.3. Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Fischzucht in Kreislaufanlagen zeitlich eingeordnet und bezüglich ihrer Relevanz für ein mögliches Engagement seitens der DBU evaluiert. Daraus ergibt sich ein möglicher Fahrplan („Roadmap“) für die **strategische Weiterentwicklung der Forschung zur Fischzucht in Kreislaufanlagen** unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten (siehe Tabelle 3-3):

Tabelle 3-3: Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Aquakultur in Kreislaufanlagen

Zeithorizont	Forschungs- und Entwicklungsansatz	Relevanz für ein Engagement der DBU
Kurzfristig (1-3 Jahre)	Optimierung der Prozesstechnik zur effizienten Entkeimung des Kreislaufwassers im Produktionsmaßstab	X
	Optimierung der Prozesstechnik zur Denitrifikation im Produktionsmaßstab	X
	Optimierung des Monitorings und des Managements wesentlicher tierschutzbezogener Prozessparameter	X
Mittelfristig (3-5 Jahre)	Ableitung fischartenspezifischer Qualitätsstandards für die Fischzucht in Kreislaufanlagen	
	Systematische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquakultursysteme, inklusive der Ableitung von zentralen, technologiespezifischen Leistungsindikatoren	X
Langfristig (5-10 Jahre)	Unterschiedliche, kommerziell betriebene Aquakultursysteme innerhalb Deutschlands können auf systematischer Basis unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten vergleichend geprüft und bewertet werden.	X

Quelle: Eigene Darstellung

Aus Tabelle 3-3 geht hervor, dass die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in Hinblick auf die Optimierung der Prozesstechnik zur effizienten Entkeimung des Kreislaufwassers bzw. der Optimierung der Denitrifikation in Kreislaufanlagen schon kurzfristig angegangen werden können. Die erforderlichen Erkenntnisse liegen bereits vor und bedürfen im nächsten Schritt der Überprüfung im Zuge der Hochskalierung der Anlagen. Auch die Optimierung des Monitorings und des Managements zentraler tierschutzbezogener Prozessparameter kann und sollte kurzfristig angegangen und durchgeführt werden. Durch den starken Praxisbezug und eine entsprechend große Relevanz für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), werden die entsprechenden F&E-Ansätze als relevant für ein mögliches Engagement der DBU eingeschätzt. Demgegenüber besteht mit der Ableitung fischartenspezifischer Qualitätsstandards ein Forschungsansatz auf der mittelfristigen Ebene, der angesichts des besonders ausgeprägten Grundlagencharakters als nur bedingt relevant für ein mögliches Engagement der DBU eingeschätzt wird. Gleichwohl können zentrale Erkenntnisse der kurzfristigen F&E-Ansätze (siehe oben) grundlegende Beiträge zur Ableitung fischartenspezifischer Qualitätsstandards beisteuern. Das mittelfristige Ziel zur systematischen Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquakultursysteme wird in Hinblick auf die Auswahl künftig zu priorisierender Einzelvorhaben als besonders relevant erachtet und sollte daher bei den Förderschwerpunkten der DBU berücksichtigt werden. Einen eher langfristigen F&E-Ansatz stellt der systematische Vergleich unterschiedlicher kommerziell betriebener Aquakultursysteme dar. Hierzu bedarf es zunächst eines erheblichen Ausbaus der Aquakultur in Deutschland. Dies gilt insbesondere für die Weiterentwicklung der Fischzucht in Kreislaufanlagen. Aufgrund der hohen Relevanz dieses langfristig angelegten Forschungsansatzes für KMUs wird dieser Ansatz ebenfalls als für ein Engagement der DBU geeignet eingestuft.

4. Nachhaltige Bereitstellung von Futtermitteln

Die Futtermittelbereitstellung stellt einen besonders wichtigen Abschnitt der Aquakultur-Prozesskette dar, da durch die Auswahl der Futtermittel unmittelbar das Wachstum, aber auch das Wohlbefinden und die Fortpflanzungsfähigkeit der Fische beeinflusst wird. Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten sind zudem die vorgelagerten Prozesse zur Futtermittelbereitstellung besonders relevant, da die verschiedenen Futtermittelbestandteile, v.a. Fischmehl und Fischöl, aber auch mögliche Alternativen z.T. mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden sind. Zudem verdienen Futtermittel mit einem Beitrag von 30-70% an den Gesamtkosten der Fischzucht aus Kostengesichtspunkten besondere Aufmerksamkeit (IGB o.J.a).

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden zunächst auf die gegenwärtig praktizierten Prozessabläufe bei der Futtermittelbereitstellung eingegangen (vgl. Kapitel 4.1), bevor auf der Basis einer Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (vgl. Kapitel 4.2) konkrete Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltiges Fischfutter identifiziert werden (vgl. Kapitel 4.3). Abschließend werden daraus prioritäre Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für eine strategische Weiterentwicklung der Futtermittelbereitstellung unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten abgeleitet (vgl. Kapitel 4.4).

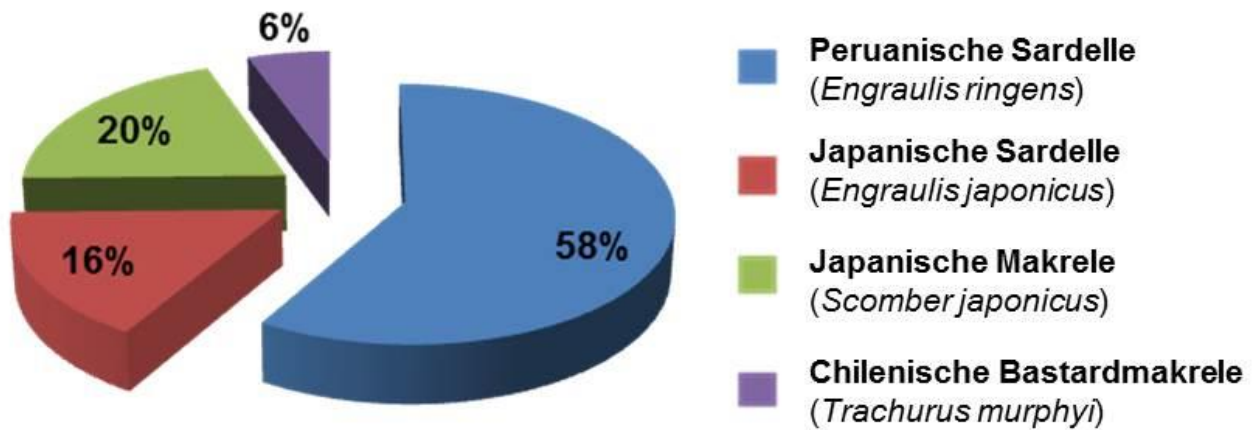
4.1. Status quo der Futtermittelbereitstellung

Die gegenwärtig in der Aquakultur dominierenden Futtermittel bestehen aus gepressten Pellets, die neben Getreide v.a. Fischmehl und Fischöl enthalten. Daneben wird insbesondere von kleinen Aquakulturbetreibern auch Futter eingesetzt, welches direkt vor Ort wächst bzw. bereitgestellt werden kann, z.B. Pflanzen, Getreide- und Fischabfälle (World Ocean Review o.J.).

4.1.1. Herstellung von Fischmehl und Fischöl

Aus ökologischer Sicht kritisch diskutiert werden insbesondere Futtersorten, deren Hauptbestandteile Fischmehl und Fischöl sind, da diese Komponenten zum überwiegenden Teil (ca. 75%) aus dem Fang von Wildfischen gewonnen werden müssen. Dabei handelt es sich um kleine pelagische, d.h. im freien Wasser lebende Fischarten. Wie der folgenden Abbildung entnommen werden kann, werden für die Herstellung von Fischmehl v.a. Bestände der Peruanischen Sardelle (*Engraulis ringens*) sowie der Japanischen Sardelle (*Engraulis japonicus*), der Japanischen Makrele (*Scomber japonicus*) und der Chilenischen Bastardmakrele (*Trachurus murphyi*) genutzt.

Abbildung 4-1: Prozentuale Verteilung der für die Fischmehlherstellung genutzten Arten

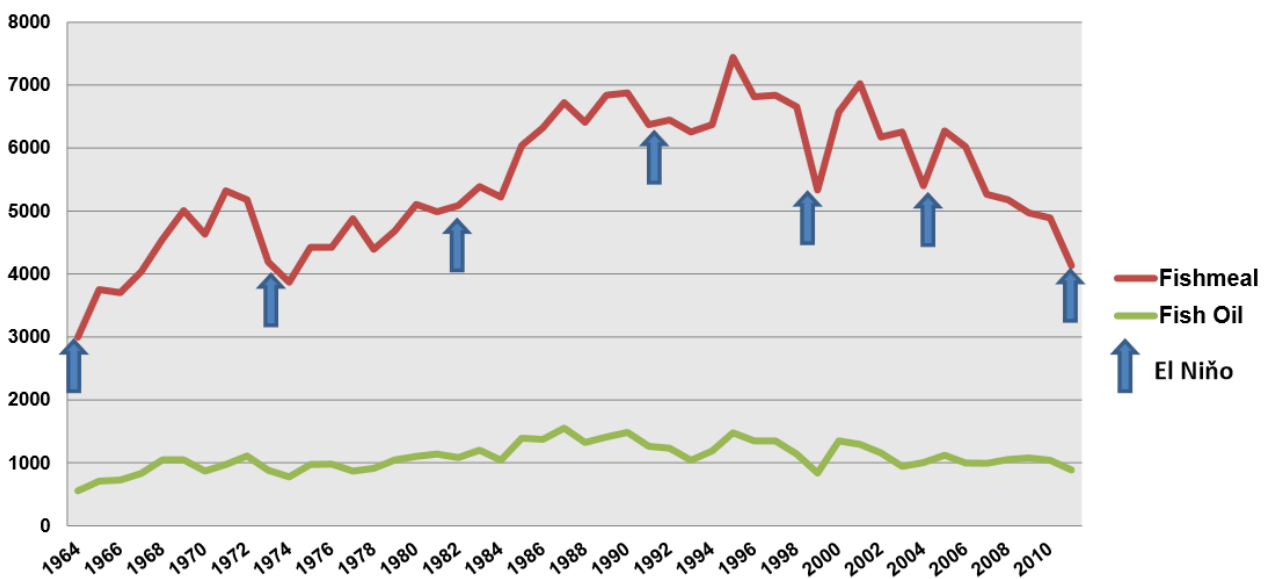


Prozentuale Verteilung der für die Fischmehlherstellung genutzten Arten (FAO 2012)

Quelle: (IGB o.J.b)

Allein von der Peruanischen Sardelle, dem weltweit am stärksten genutzten Fisch der Welt, werden durchschnittlich pro Jahr rund 5 Millionen Tonnen gefangen. Während in besonders ertragreichen Jahren sogar mehr als 12 Millionen Tonnen angelandet werden, gehen in ausgeprägten El-Niño-Jahren durch den Anstieg der Wassertemperatur die Fangraten zurück (IGB o.J.c). Wie der folgenden Grafik entnommen werden kann, gingen in den El-Niño-Jahren auch die weltweiten Produktionsmengen von Fischmehl und Fischöl zurück. Unabhängig von diesen z.T. klimabedingten Schwankungen sanken jedoch die Fangmengen bei den Sardellen seit 2005 kontinuierlich (FAO 2014).

Abbildung 4-2: Zeitreihe der weltweiten Produktion von Fischmehl und Fischöl (in 1.000 Tonnen)



Quelle: Shepherd & Jackson (2012)

Um die Rückgänge bei den Fangmengen zumindest teilweise ausgleichen zu können, wurden in den zurückliegenden Jahren zunehmend Nebenprodukte aus der Fischverarbeitung eingesetzt, deren Anteil an den Rohmaterialien nunmehr bereits rund 25% ausmacht (Shepherd & Jackson 2012).

Beim Prozess der Herstellung von Fischmehl werden die Fische (bzw. Fischnebenprodukte) zunächst zerkleinert und gekocht, anschließend zentrifugiert und schließlich bei Temperaturen zwischen 70 und 100°C getrocknet. Während der Fischmehlherstellung werden auch Fischöle gewonnen, die nach der Extraktion aus dem Fisch durch Zentrifugation gereinigt werden und etwa fünf bis sechs% der insgesamt verwendeten Rohmasse ausmachen (FAO 2009; World Ocean Review o.J.).

Die Produktion findet weltweit in ca. 400 spezialisierten Anlagen statt, wobei gegenwärtig pro Jahr rund 6,3 Mio. Tonnen Fischmehl und 1 Mio. Tonnen Fischöl hergestellt werden. Dafür sind ca. 33 Millionen Tonnen Wildfische bzw. Fischnebenprodukte erforderlich. Das mit Abstand wichtigste Erzeugerland ist mit ca. 2 Mio. Tonnen jährlich produziertem Fischmehl Peru, gefolgt von Chile, Thailand und China; wichtige europäische Erzeugerländer mit jeweils rund 200.000 Tonnen Fischmehl p.a. sind Dänemark, Island und Norwegen. Trotz der eigenen Produktion ist Europa – wie auch die meisten anderen Aquakulturerzeuger – mit Importen in Höhe von ca. 1,6 Mio. Tonnen Fischmehl bzw. 240.000 Tonnen Fischöl ein Nettoimporteur dieser Produkte (FAO 2009).

4.1.2. Einsatz von Fischmehl und Fischöl in der Aquakultur

Aufgrund der enormen Nachfrage der Aquakultur nach Fischmehl werden gegenwärtig laut Schätzungen der IFFO (International Fishmeal and Fish Oil Organisation) mit 73% fast drei Viertel des gesamten Fischmehls für die Fischzucht benötigt, während sich das verbleibende Viertel der Produktionsmenge mit 20% bzw. 5% auf die Zucht von Schweinen und Hühnern verteilt. Bei Fischöl wird ca. 71% der Weltproduktion für die Aquakultur benötigt, gefolgt von 26% für den direkten menschlichen Verzehr (FAO 2014).

Angesichts der erheblichen Mengen an Fischmehl und Fischöl, welche inzwischen für die Aquakultur benötigt werden und in der Vergangenheit sukzessive von der Schweine- und Hühnerzucht abgezogen wurden, sollte allerdings auch beachtet werden, dass es sich bei Fischen um vergleichsweise effiziente Futtermittelverwerter handelt. So reicht bei vielen Fischarten rund ein Kilogramm Futter aus, um eine Zunahme des Körpergewichts im gleichen Umfang zu erzielen. Im Vergleich dazu werden bei anderen Zuchttieren deutlich höhere Futtermittelmengen für ein Kilogramm Gewichtszuwachs benötigt: Bei einem Huhn sind beispielsweise rund zwei Kilogramm Futter erforderlich, bei einem Rind sogar rund acht Kilogramm (IGB o.J.a).

Die Hauptgründe eines auf Fischmehl basierenden Futters bestehen darin, dass es besonders proteinreich und leicht verdaulich ist sowie dass der verwendete Fisch aus Wildfang einen hohen Anteil an essentiellen mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Omega-3-Fettsäuren) enthält. Letztere bieten für den Menschen nach dem Verzehr von Fischen aus Aquakultur einen guten Schutz gegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

Aufgrund dieser Funktionsmerkmale werden fischmehlreiche Futtersorten v.a. bei karnivoren (d.h. fleischfressenden) Fischarten bzw. hohen Ansprüchen an Proteingehalt und Verdaulichkeit benötigt. Folglich gehört die Zucht von Garnelen, Salmoniden (v.a. Lachse) und marine Fischarten (z.B. Dorade und Wolfsbarsch) mit jeweils über 20% des im Aquakultursektors eingesetzten Fischmehls zu den größten Fischmehlverbrauchern. So betrug 2008 der durchschnittliche Fischmehlanteil im Futter von Garnelen ca. 20%, bei Lachsen ca. 25%, und auch Forellenfutter weist einen

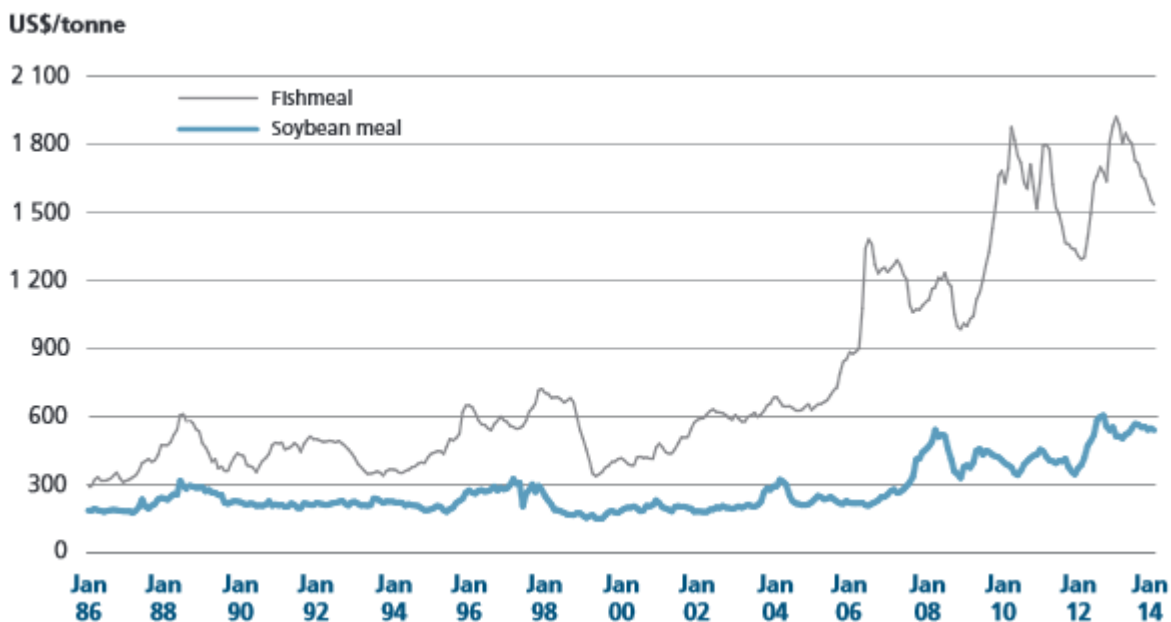
Fischmehlanteil in Höhe von 25% auf. Im Gegensatz dazu zeichnen sich Friedfische durch einen deutlich geringeren Fischmehlanteil im Futter aus, der beispielsweise bei Karpfen lediglich 3% beträgt (IGB o.J.b). Fischöl stellt zudem einen wichtigen Bestandteil bei der Aufzucht von Lachsen und Forellen dar, wobei rund 65% des gesamten in der Aquakultur benötigten Fischöls für diese beiden Spezies benötigt wird (FAO 2009).

4.1.3. Ökologische Nachteile und Risiken

Auch wenn Fischmehl (wie auch Fischöl) überwiegend aus Fischen hergestellt wird, die kurze Generationszeiten aufweisen und für den direkten menschlichen Verzehr meist nicht oder nur in geringem Maße vermarktbar sind, ist ein auf Fischmehl basierendes Futter mit einer Reihe von Nachteilen bzw. Risiken verbunden. So stehen die verwendeten Fische (wie insbesondere Sardinen) in der marinen Umwelt nicht mehr als Futter für karnivore Fische zur Verfügung (IGB o.J.b). Mittelbar ist somit bei einer nicht nachhaltigen Nutzung von Wildfischbeständen für die Tierfutterbereitstellung eine Gefährdung der Wildfischbestände insgesamt und damit des ökologischen Gleichgewichtes zu befürchten. Im Gegensatz zu Speisefischen existieren für die Bewirtschaftung der für die Fischmehl- und Fischölproduktion bestimmten Arten so gut wie keine Fangbeschränkungen, obwohl sich in den dabei verwendeten Netzen mit geringer Maschengröße auch eine große Zahl von Jungtieren anderer Arten verfangen. Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass viele Wildfischbestände aktuell ohnehin schon überfischt sind, erscheint daher eine Verwendung von Fischen aus Wildfang als Fischfutter in der Tat als fragwürdig, insbesondere da die eingesetzte Wildfischmenge aufgrund von Verlusten bei der Verarbeitung letztendlich eine geringere Zuchtfischmenge ergibt.

4.1.4. Ökonomische Aspekte

Zusätzlicher Problemdruck ergibt sich aus ökonomischen Aspekten heraus, da die Preise für Fischmehl und Fischöl in den zurückliegenden stark angestiegen sind (siehe folgende Abbildung). So wurde beispielsweise Fischmehl in der jüngsten Vergangenheit zu Preisen von bis zu über 1.800 US-Dollar pro Tonne gehandelt, was einer Verdreifachung in den letzten zehn Jahren entspricht.

Abbildung 4-3: Entwicklung der Preise für Fischmehl und Sojamehl in Deutschland

Quelle: FAO (2014)

Insbesondere im Vergleich zu Sojamehl, einer möglichen Alternative zu Fischmehl, haben sich die ökonomischen Randbedingungen sehr zuungunsten von Fischmehl entwickelt. Während der Fischmehl-Sojamehl-Preisquotient im Dezember 2013 noch bei 2,8:1 lag, betrug dieser im Dezember 2014 bereits 4,1:1 (FAO 2014).

Aufgrund der beschriebenen Angebot- und Nachfragesituation ist nicht davon auszugehen, dass sich an der Kostenentwicklung für Fischmehl grundsätzlich etwas verändern wird. Vielmehr wird angenommen, dass im Zeitraum bis 2030 die ökonomische Vulnerabilität von Fischmehl und Fischöl weiter zunehmen wird. In diesem Zusammenhang werden Preissteigerungen von 90% bzw. 70% im Vergleich zu 2010 prognostiziert (Globefish 2015).

4.2. Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

4.2.1. Überblick

Angesichts der zentralen Bedeutung der Futtermittelbereitstellung für die Aquakulturproduktion und der zunehmenden ökologischen und ökonomischen Risiken der Nutzung von Fischmehl und Fischöl, werden in Forschung und Entwicklung bereits seit einigen Jahren mögliche Alternativen zu diesen Futtermittelbestandteilen untersucht. Im Zentrum stehen dabei **pflanzliche Proteine** aus Soja, Raps, Kartoffeln, Weizen bzw. Erbsen (IGB o.J.a; World Ocean Review o.J.). In diesem Zusammenhang werden insbesondere auch Abfallstoffe als Rohstoffquelle betrachtet, z.B. Gluten oder Rapskuchen. Daneben werden auch Rohstoffe aus gentechnisch modifizierten Pflanzen beforscht, z.B. transgener Leindotter (*Camelina sativa*) als Substitut für Fischöl (Betancor et al. 2015). Es wird davon ausgegangen, dass insbesondere durch Kombinationen pflanzlicher Proteine aus unterschiedlichen Quellen Aminosäurezusammensetzungen im Futter erreicht werden können, welche mit den auf Fischmehl basierenden Futtersorten vergleichbar sind.

Übergeordnetes Ziel der F&E-Arbeiten besteht darin, das sogenannte Fish-in/Fish-out-Verhältnis (FIFO-Verhältnis) zu verbessern, d.h. den Quotienten aus im Futtermittel enthaltenem Fisch und dem Schlachtgewicht des gezüchteten Fisches so weit wie möglich zu senken. Hauptproblem ist der deutlich geringere Proteingehalt der pflanzlichen Alternativen. Beispielsweise weist Raps nur einen Proteingehalt von 20-25% auf, während Fischmehl ca. 60% erreicht. Daher wird im Rahmen der F&E-Arbeiten versucht, Proteinextrakte herzustellen und durch Kombination verschiedener Proteine eine gute Verdaulichkeit des Futters sicherzustellen.

Durch Substitution mit pflanzlichen Alternativen kann je nach Fischart bis zu 100% des benötigten Proteins abgedeckt werden. So kann beispielsweise bei Karpfenfutter der Fischmehlanteil auf 1% bzw. 0% reduziert werden. Bei karnivoren Fischarten ist zur Sicherstellung der erforderlichen Gewichtszuwächse pro Zeiteinheit, aber auch aus Gründen einer artgerechten Haltung, ein verbleibender Anteil an Fischmehl und Fischöl bislang noch erforderlich. Zudem wäre aus ernährungsphysiologischen Gesichtspunkten für den Menschen ein völliger Verzicht dieser beiden Futterkomponenten wenig sinnvoll, da die darin enthaltenen Omega-3-Fettsäuren von den Fischen nicht selbst synthetisiert werden können. Im Falle einer ausschließlich auf pflanzlichen Rohstoffen basierenden Nahrung würden den Zuchtfischen diese gesunden Fettsäuren fehlen, wodurch für viele Verbraucherinnen und Verbraucher ein wichtiger Grund wegfallen würde, Fisch zu konsumieren (IGB o.J.a).

Die untersuchten alternativen Futtermittelbestandteile auf pflanzlicher Basis bergen aber auch Risiken. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass keine sogenannte Antinutritiva enthalten sind, d.h. Substanzen, die von den Fischen schlecht verwertet werden und Stoffwechselstörungen hervorrufen können (World Ocean Review o.J.). Beispielsweise konnte im Rahmen von Experimenten mit Gelbschwanzmakrelen, bei denen lösemittel-extrahiertes Sojaprotein und Sojakonzentrat verfüttert wurden, die Entwicklung von subakuter Enteritis (d.h. Darmentzündung) nachgewiesen werden (Bansemer et al. 2015).

Eine neben pflanzlichen Substituten weitere wichtige Alternative zu Fischmehl und Fischöl sind Futtermittelbestandteile aus **Mikroalgen** sowie **Insekten** wie Fliegenmaden und Fadenwürmern (Nematoden). Daneben werden auch **Rädertierchen** (Rotatorien) als ein geeignetes Futter zur Initialfütterung von Fischlarven diskutiert (Chauton et al. 2015; Hagiwara et al. 2014; Hawkyard et al. 2015; IGB o.J.a; Möller et al. 2015).

Im Folgenden sollen nun ausgewählte F&E-Projekte vorgestellt werden, um aus diesem Überblick aktueller Arbeiten bereits bestehende Ansatzpunkte für eine nachhaltigere Futtermittelbereitstellung zu identifizieren und insbesondere weitere Lösungsansätze für zukünftige F&E-Vorhaben herauszuarbeiten. Wichtige Impulse für eine ökologische und ökonomische Optimierung der Futtermittelbereitstellung wurden insbesondere im Rahmen der DBU-Förderinitiative „Nachhaltige Aquakultur“ gesetzt, wobei die Gewinnung von Futtermittelbestandteilen mit mehrfach ungesättigten Fettsäuren (engl. polyunsaturated fatty acids, PUFA) als Ersatzstoffe für Fischmehl und Fischöl, aber auch die Nutzung von Fischnebenprodukten adressiert wurde.

4.2.2. Einsatz von Mikroalgen als alternatives Futtermittel

Ziel des F&E-Projektes „Einsatz der Mikroalge *Pavlova spec.* als alternatives Futtermittel für die Larvenaufzucht in der marinen Aquakultur“ (AZ: 28183; Kurztitel „**Pavlova**“) war die Entwicklung der für eine industrielle Produktion der Mikroalge *Pavlova* geeigneten Verfahrenstechnik. Das Projekt wurde von der Firma BlueBioTech GmbH in Kooperation mit der Gesellschaft für Marine Aquakultur (GMA) durchgeführt. Das im F&E-Projekt hergestellte *Pavlova*-Produkt ist Teil der Formulierung eines neuen Futtermittels, das beim Kooperationspartner GMA in vergleichenden

Fütterungsexperimenten mit einem großtechnisch produzierten Futtermittel auf Fischmehl- und Fischölbasis getestet wurde. Eine vom Öko-Institut durchgeführte vergleichende Nachhaltigkeitsanalyse kam zu dem Ergebnis, dass das produzierte Algenprodukt derzeit ein größeres Umweltbelastungspotenzial aufweist als großtechnisch produzierte, konventionelle Futtermittel auf Fischmehlbasis. Bezogen auf die Vergleichsgröße der Betrachtung, die Zucht von 1.000 Kabeljau-Larven, liegt das mit dem Pavlova-Produkt verbundene Treibhausgaspotenzial um ca. Faktor 3 über dem des Referenzprodukts. Hierfür sind im Wesentlichen zwei Faktoren verantwortlich: Zum einen hat die Herstellung algenbasierter Anreicherungsprodukte derzeit noch einen höheren spezifischen Energiebedarf, da die Produktion algenbasierter Anreicherungsprodukte üblicherweise in Anlagen im Technikumsmaßstab erfolgt. Konventionelle Futtermittel auf Fischmehl- und Fischölbasis werden hingegen in weitgehend optimierten, industriellen Produktionsprozessen hergestellt. Eine industrielle Produktion von Mikroalgen der Gattung Pavlova ist grundsätzlich möglich, existiert gegenwärtig jedoch noch nicht. Zum anderen führt die Fütterung mit algenbasierten Anreicherungsprodukten derzeit noch zu geringeren Überlebensraten als die konventionellen Futtermittel auf Fischmehl- und Fischölbasis. Diese Futtermittel sind als komplex formulierte Produkte exakt auf die Bedürfnisse der Zielfischart abgestimmt. Essentielle, auch in kleinsten Dosen zugesetzte Bestandteile haben daher einen großen Einfluss auf die Überlebensrate der Fische. Demgegenüber handelt es sich bei dem algenbasierten Anreicherungsprodukt um ein Produkt, welches durch entsprechende Optimierung seine Effektivität, Effizienz und damit auch seine Umweltfreundlichkeit noch deutlich steigern kann (Möller et al. 2015).

4.2.3. Anreicherung von Nematoden für die Fütterung von Shrimp-Larven

Das F&E-Projekt „Fermentation der Ω -3-Fettsäure Docosahexaensäure (DHA) mit heterotrophen Algen zur Anreicherung von Nematoden für die Fütterung von Shrimp-Larven in der Aquakultur“ (AZ-28110-34; Kurztitel „**FeeDH-A-Shrimp**“) hatte zum Ziel, ein für die Fütterung von Larven des Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) geeignetes, mit DHA-angereichertes Nematoden-Produkt zu entwickeln. Das Projekt wurde in den Forschungseinrichtungen der e-nema – Gesellschaft für Biotechnologie und biologischen Pflanzenschutz mbH (e-nema) durchgeführt. Begleitende wissenschaftliche Maßnahmen wurden an der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Phytopathologie, Abt. Biotechnologie und biologischer Pflanzenschutz, vorgenommen. Im Projekt wurden die hinsichtlich ihres Gehalts an mehrfach ungesättigten Fettsäuren als besonders vielversprechend identifizierten heterotrophen Mikroalgen *Cryptocodinium cohnii* und *Schizochytrium sp.* produziert. Diese weisen einen Anteil von bis zu 20% DHA in ihrer Trockenmasse auf und lassen sich lichtunabhängig in Fermentern produzieren. Die Fermentation erfolgt in einem zweistufigen Batch-Prozess. Ein wichtiges Projektziel war auch die Entkopplung der Produktion von Futterorganismen und der Bereithaltung von Shrimp-Larven. Damit sollte ein Beitrag zum Abbau bestehender Ineffizienzen in der Shrimp-Zucht geleistet werden. Zu den Zielen des Forschungsvorhabens gehörten weiterhin die Optimierung der Verfahrenstechnik zur Produktion von DHA-angereicherten Nematoden und die Prüfung des entwickelten Produktes auf seine Eignung als Futtermittel. Langfristig soll damit die Bereitstellung von DHA aus heterotrophen Algen zu einer Alternative zur Bereitstellung von DHA aus Fischöl werden. Wie die im Rahmen der vergleichenden Nachhaltigkeitsanalyse vom Öko-Institut durchgeführte ökobilanzielle Untersuchung zeigt, weist das produzierte Nematodenprodukt gegenwärtig schon ein geringeres Umweltbelastungspotenzial als das Referenzprodukt auf. So liegt beispielsweise das Treibhausgaspotenzial um etwa 20% unter dem Wert für die Bereitstellung eines Anreicherungsproduktes auf Basis von Artemien und einem Trockenfutter auf Fischmehlbasis. Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Prozess der Shrimp-Larvenaufzucht einen dominierenden Einfluss auf die Ergebnisse der ökobilanziellen Untersuchung hat. Zur Bedeutung dieses Prozesses tragen wiederum der energetische Aufwand für den Betrieb von Pumpen und der Beheizung des Wassers bei. In der weiteren Steigerung der

Energieeffizienz dieses Prozesses liegen demnach auch die größten Potenziale für künftige Optimierungen bei der Shrimp-Larvenzucht. Die im Rahmen des hier dargestellten Systemvergleichs ermittelte Vorteilhaftigkeit des Nematodenprodukts würde auch bei einer solchen energetischen Optimierung bestehen bleiben, wobei dessen systembedingte Vorteile im direkten Vergleich mit der Referenztechnologie noch deutlicher sichtbar werden. Ein weiterer Systemvorteil Nematodenprodukts besteht darin, dass durch den Einsatz von Nematoden bereits einen Tag früher mit der Lebendfütterung von Shrimp-Larven begonnen werden kann und dadurch ein schnelleres Wachstum der Shrimp-Larven ermöglicht wird. Diese Erkenntnisse können im Rahmen der gezielten Weiterentwicklung der eingesetzten Prozesstechnik genutzt werden (Möller et al. 2015).

4.2.4. Erzeugung von Trockenfuttermitteln aus konservierten Nebenprodukten

Im Rahmen des F&E-Projekts „Konzeptstudie zur Erzeugung von Trockenfuttermitteln aus konservierten Nebenprodukten der Süßwasserfischverarbeitung und deren Verwertung durch karnivore Wirtschaftsfischarten“ (AZ-28114-34; Kurztitel „**Fischnebenprodukte**“) wurde die Eignung von Silierungsverfahren zur Konservierung von Fischnebenprodukten und damit als Alternative zur Tiefkühlagerung untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil der Analyse war die Frage, wie eine zentrale bzw. ggf. auch dezentrale Weiterverarbeitung der so behandelten Fischnebenprodukte zur Herstellung von Trockenfuttermitteln für die Fischzucht ermöglicht werden und auf diese Weise zur Substitution von Fischmehl und Fischöl aus Wildfang beitragen kann (Referenztechnologie). Das Projekt wurde an den Forschungseinrichtungen des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) an der Humboldt-Universität Berlin durchgeführt. Der Ablauf dieses F&E-Projekt kann in zwei Hauptphasen unterteilt werden: In der ersten Phase wurde zunächst ein für die gegebenen Produkthanforderungen geeignetes Verfahren zur Haltbarmachung der Fischnebenprodukte ermittelt. Anschließend wurde in der zweiten Projektphase die Eignung der konservierten Fischnebenprodukte als Formulierungsbestandteil eines Trockenfischfutters für karnivore Wirtschaftsfischarten untersucht. Die vergleichende Nachhaltigkeitsbetrachtung durch das Öko-Institut konnte zeigen, dass die entwickelten Silierungsverfahren gegenüber der Tiefkühlagerung aus ökobilanzieller Sicht im Vorteil sind. Innerhalb der Silierungsverfahren wiederum schneidet von den untersuchten Verfahren die chemische Silierung ohne Sterilisation am besten ab. Weiterhin konnte im Rahmen der ökobilanziellen Bewertung nachgewiesen werden, dass der Einsatz von silierten Fischnebenprodukten als Formulierungsbestandteil für Fischfutter in allen betrachteten Umwelt-Wirkungskategorien mit einem konventionell hergestellten Trockenfischfutter aus ökologischer Sicht mindestens gleichwertig ist. Für die Wirkungskategorien Versauerungs-, Eutrophierungs- und Photooxidantienpotenzial ergeben sich durch den Einsatz von Fischnebenprodukten gegenüber dem Referenzfischfutter z.T. erhebliche ökologische Einsparpotenziale (bei Photooxidantienpotenzial über 50% Reduktion). Aus produktionstechnischer Sicht stellt insbesondere der höhere Feuchtigkeitsgehalt des aus siliertem Fischnebenprodukt hergestellten Fischfutters eine Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund besteht ein Optimierungsansatz darin, durch die Zugabe verschiedener Komponenten zur Bindung dieser Feuchtigkeit (z.B. durch Erhöhung des Blutmehlanteils) den Fischmehlanteil im Fischfutter mit siliertem Fischnebenprodukt zu reduzieren (Möller et al. 2015).

4.3. Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltiges Fischfutter

4.3.1. Bestehende Kriterien bei Zertifizierungseinrichtungen und NGOs

Ausgangspunkt für die Ableitung von Qualitätskriterien und Ansatzpunkte für nachhaltiges Fischfutter bilden entsprechende Kriterien, die bei der Vergabe von Labels im Aquakultursektor bzw. seitens Nichtregierungsorganisationen (engl. Non-Governmental Organisations, NGOs) bereits eingefordert werden. Exemplarisch sollen an dieser Stelle die futterbezogenen Kriterien bei der Labelvergabe des Aquaculture Stewardship Councils (ASC) sowie die entsprechenden Richtlinien der schweizerischen NGO „fair-fish“ dargestellt werden.

Im Rahmen der Zertifizierung des Labels des **ASC** besteht ein umfangreicher Anforderungskatalog, wobei in einem eigenen Kapitel futtermittelrelevante Gesichtspunkte adressiert werden. Dabei handelt es sich um die „verantwortungsvolle und ökologisch effiziente Nutzung von Ressourcen“, wobei im Einzelnen die folgenden Kriterien zu berücksichtigen sind (ASC 2013):

- **Rückverfolgbarkeit und Transparenz der Futterrohstoffe:** Ausweisung und Nachvollziehbarkeit der Hersteller für alle Futtermittelbestandteile, die mehr als 1% Anteil am Futter haben;
- **Verantwortungsvolle Quelle für die verwendeten marinen Rohstoffe:** innerhalb von drei Jahren (nach Zertifizierung) muss 10% des Fischmehl und Fischöls und innerhalb von fünf Jahren 100% aus einer zertifizierten Quelle stammen (ISEAL-akkreditiertes Schema); zudem ist ein Nachweis erforderlich, dass verwendeter Beifang nicht gefährdete Arten gemäß der Roten Liste der IUCN enthält;
- **Abhängigkeit von Futtermittelbestandteilen in Wildfischbeständen:** die sogenannte Fishmeal Forage Dependency Ratio (Abhängigkeit des Futtermittels von Fischmehl) darf höchstens 1,5 betragen; ferner darf der Anteil von essentiellen mehrfach ungesättigten Fettsäuren Eicosa-pentaensäure (EPA) / Docosahexaensäure (DHA) aus marinen Quellen 9% nicht überschreiten;
- **Verantwortungsvolle Quellen für nicht-marine Futtermittelbestandteile:** 100% des verwendeten Sojas muss innerhalb von fünf Jahren (nach Zertifizierung) aus Quellen stammen, die gemäß des „Roundtable on Sustainable Soja“ (oder vergleichbar) zertifiziert sind; zudem dürfen keine Futtermittelbestandteile verwendet werden, die mehr als 0,9% transgene Pflanzen enthalten.

Gemäß der Position von „fair-fish“ ist Fischzucht erst dann nachhaltig, wenn sie deutlich weniger Fisch verfüttert als letztendlich für die Verbraucherinnen und Verbraucher in Form von verzehrfähigem Fisch zur Ernährung bereitstellt. Idealerweise sollte aus der Sicht von „fair-fish“ ganz auf die Nutzung von Tiermehl verzichtet werden. Für Fischarten, bei denen das nicht möglich ist, sollte höchstens so viel Fischmehl verwendet werden, wie in den fair-fish-Richtlinien vorgeben. Demnach dürfen Futtermittelbestandteile bei ihrem Einsatz ein FIFO-Verhältnis (vgl. Abschnitt 4.2.1) von 0,2:1 nicht überschreiten, d.h. für die Gewinnung von einem Kilogramm Zuchtfisch (Lebendgewicht) dürfen höchstens 200 Gramm Wildfisch (Lebendgewicht) eingesetzt werden. Bei dieser Berechnungen dürfen Fischmehl und Fischöl ausgenommen werden, die aus Schlachtnebenprodukten von Wildfischen bzw. nicht marktfähigen Wildfischen aus zertifiziert nachhaltiger Fischerei hergestellt werden. Ferner ist sicherzustellen, dass das Futter frei von tierischen und pflanzlichen Komponenten ist, die mittels Gentechnik produziert wurden. Weitere Empfehlungen, die mittelbare Auswirkungen auf die Bereitstellung von Fischfutter haben können, richtet „fair-fish“ an die Verbraucherinnen und Verbraucher. Ihnen wird empfohlen, vorzugsweise Zuchtfisch nicht-räuberischer Arten (wie Karpfen, Pangasius und Tilapia) zu konsumieren, welche ohne Fischmehl oder Fischöl gefüttert werden können (fair-fish 2015).

Angesichts der bestehenden Labelkriterien und Forderungen von NGOs, aber auch der bisherigen Schwerpunkte im Bereich der Futtermittelforschung wird ersichtlich, dass aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ein wichtiges übergeordnetes Ziel für die zukünftige Futtermittelbereitstellung darin bestehen muss, Fischmehl und Fischöl als derzeit z.T. noch unverzichtbare Futtermittelbestandteile sparsamer zu nutzen sowie nach und nach durch Erschließung alternativer Rohstoffquellen so weit wie möglich zu substituieren. Ein wichtiger Indikator bei der Erreichung dieses Ziels stellt das FIFO-Verhältnis dar. Wie der nachfolgenden Tabelle entnommen werden kann, konnte dieser Indikator für wichtige in Aquakultur gezüchtete Spezies in den zurückliegenden Jahren deutlich verbessert werden.

Tabelle 4-1: Entwicklung des FIFO-Verhältnisses für wichtige Aquakultur-Fischarten

Farmed Fed Category	2000	2010
Eels	3.0	1.8
Salmonids (including trout)	2.6	1.4
Marine fish	1.5	0.9
Crustacea including shrimps & crabs	0.9	0.4
Tilapia	0.3	0.2
Other fed freshwater fish (e.g. catfish & pangasius)	0.6	0.2
Fed Cyprinids	0.1	0.1
Total for fed Aquaculture	0.6	0.3

Quelle: IFFO (2013)

Aus diesem übergeordneten Ziel lassen sich schließlich folgende Ansatzpunkte einer nachhaltigeren Futtermittelbereitstellung ableiten:

- Weiterentwicklung von hochwertigen Proteinen und Fetten aus Pflanzen und Mikroorganismen;
- Steigerung des Anteils von Fischmehl und Fischöl aus Fischnebenprodukten;
- Verwendung von Fischmehl und Fischöl aus nachhaltig bewirtschafteten Quellen;
- Differenzierung der Vermarktung von Fischprodukten sowie Verbraucherinformation.

Diese Ansatzpunkte sollen nun im Folgenden näher erläutert werden.

4.3.2. Weiterentwicklung von hochwertigen Proteinen und Fetten aus Pflanzen und Mikroorganismen

Dieser Ansatzpunkt greift die die bereits vorliegenden Ergebnisse der Futtermittelforschung auf. Auf dieser Grundlage besteht ein wichtiges Qualitätskriterium für eine nachhaltigere Futtermittelbereitstellung darin, den Anteil von Proteinen und Fetten auf pflanzlicher Basis zu steigern. Neben den bereits erwähnten Substituten auf der Basis von Soja, Raps, Kartoffeln, Weizen bzw. Erbsen werden in der Literatur auch Mais und Palmöl diskutiert (Amirkolaie et al. 2014; Overturf et al. 2012).

Neben Proteinen und Fetten auf pflanzlicher Basis sind auch bestimmte Mikroalgen von wesentlicher Bedeutung, da diese hochwertige, mehrfach ungesättigte Fettsäuren im Fischfutter substituieren können, die sonst üblicherweise in Form von Fischmehl und Fischöl aus Wildfischbeständen bereitgestellt werden. Beispielsweise enthält Rapsöl als ein mögliches Substitut für Fischöl kein EPA und DHA (Bowyer et al. 2012). Die ausreichende Versorgung mit mehrfach ungesättigten Fettsäuren wird folglich zu einem limitierenden Faktor für den Einsatz pflanzlicher Proteine, weshalb für einen möglichst weitgehenden Verzicht auf Fischmehl und Fischöl bestimmte Mikroalgen, welche EPA und DHA in einem geeigneten Verhältnis produzieren, einen essentiell wichtigen Baustein einer nachhaltigeren Futtermittelbereitstellung darstellen. Um den Anteil von Proteinen und Fetten zu steigern, welche aus solchen Mikroorganismen gewonnen werden, muss insbesondere die Effizienz der Produktion von Mikroalgen mit einem hohen PUFA-Gehalt gesteigert werden.

Zudem wird es auch darauf ankommen, weitere Quellen für hochwertige Proteine und Fette zu erschließen. In diesem Zusammenhang ist auch der Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) zu prüfen. Die IFFO geht davon aus, dass gentechnisch veränderte Pflanzen sowie Öl aus gentechnisch veränderten Algenarten die wahrscheinlichsten alternativen Quellen für Futtermittelbestandteile mit einem hohen Anteil an Omega-3-Fettsäuren sein werden. Allerdings werden diese Komponenten kurzfristig (d.h. vor 2017) nicht in nennenswertem Umfang zur Verfügung stehen; mittel- bis langfristig können allerdings beachtliche Potenziale erwartet werden (IFFO 2013). Um den Anforderungen an eine nachhaltige Futtermittelbereitstellung zu genügen, ist es jedoch unabdingbar, dass die Produktion der GVO in geschlossenen Anlagen erfolgt und eine Freisetzung von lebenden GVO in die Umwelt nicht stattfindet.

4.3.3. Steigerung des Anteils von Fischmehl und Fischöl aus Fischnebenprodukten

Bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Einsatzes von Fischmehl und Fischöl in der Aquakultur ist laut Prognosen der FAO zu erwarten, dass im Jahre 2022 die Produktion von Fischmehl und Fischöl 10% bzw. 15% höher liegen wird als im Zeitraum zwischen 2010-2012. Gleichzeitig ist aber davon auszugehen, dass der Anteil des aus Wildfischbeständen hergestellten Fischmehls und Fischöls sinkt¹². Angesichts der stagnierenden Fangmengen aus der Wildfischerei muss das zusätzliche Fischmehlaufkommen im Wesentlichen aus anderen Quellen wie einer verbesserten Nutzung von Fischnebenprodukten stammen. Ausgehend von dem gegenwärtigen Anteil von 35% wird angenommen, dass im Jahre 2022 Fischmehl zu rund der Hälfte (49%) aus Fischnebenprodukten stammen wird (FAO 2014).

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass bezüglich der Ausschöpfung der vorhandenen Potenziale bei der Nutzung von Fischnebenprodukten große länderspezifische Unterschiede

¹² So wird entsprechend des FAO Fish Models davon ausgegangen, dass 2022 nur noch 16% der weltweiten Wildfischbestände zu Fischmehl und Fischöl verarbeitet werden, während es im Zeitraum zwischen 2010 und 2012 noch rund 7% mehr waren (FAO 2014).

bestehen. So werden z.B. in Dänemark schätzungsweise 80% aller Nebenprodukte aus der Fischverarbeitung der Herstellung von Fischmehl und Fischöl zugeführt, während in Deutschland, Frankreich und Großbritannien der Anteil zwischen 33% und 50% liegt und in Spanien sogar nur 10% erreicht werden (FAO 2009). Insgesamt lassen sich in Europa und insbesondere auch in Deutschland diesbezüglich noch erhebliche Potenziale erschließen. Gleiches gilt für die Situation in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern. Insbesondere in diesen Ländern sind die Einrichtungen zur Fischverarbeitung oftmals sehr klein, und die Menge der anfallenden Fischnebenprodukte rechtfertigt daher in der Regel nicht die Installation einer Anlage zur Herstellung von Fischmehl. Ebenso verfügen die Betriebe üblicherweise nicht über geeignete Vorrichtungen zur Haltbarmachung der anfallenden Nebenprodukte.

Vor diesem Hintergrund stellt die Silierung von Fischnebenprodukten ein geeignetes und vergleichsweise kostengünstiges Verfahren zur Haltbarmachung dar. In Norwegen ist es bei der Lachszucht bereits gängige Praxis, dass silierte Fischnebenprodukte von mehreren (kleineren) Schlachtbetrieben in einer zentralen Fabrik zu konzentriertem Fischprotein-Hydrolysat weiterverarbeitet werden (FAO 2014). In anderen europäischen Ländern sowie im weltweiten Maßstab ist dies allerdings noch nicht in gleichem Maße etabliert.

4.3.4. Verwendung von Fischmehl und Fischöl aus nachhaltig bewirtschafteten Quellen

Trotz der vorhandenen Potenziale zur Substitution von Fischmehl und Fischöl bzw. dessen Herstellung aus Fischnebenproduktion wird es auf absehbare Zeit nicht möglich sein, vollständig auf Fischmehl und Fischöl aus Wildfischbeständen zu verzichten. Es wird daher darauf ankommen, diesen verbleibenden Bedarf aus möglichst nachhaltig bewirtschafteten Quellen zu bestreiten.

Ein erster Ansatzpunkt hierfür ist eine Zertifizierung der verwendeten Rohstoffe durch eine unabhängige Einrichtung. In diesem Zusammenhang spielt insbesondere der Aspekt der Rückverfolgbarkeit eine wichtige Rolle. So sollten Fischmehlhersteller über genaue Kenntnisse zu den verarbeiteten Fischarten und ihrem Ursprung verfügen. Diese Informationen sollten anschließend über eine entsprechende Deklaration auf dem Produkt den Kundinnen und Kunden sowie der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden (FAO 2009).

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit der Rückverfolgung der Ursprünge der verwendeten Rohstoffe sollte darin bestehen, in erster Linie Rohstoffe aus der jeweiligen Region zu verwenden, um lange Transportwege zu vermeiden. Ferner sollten Hersteller von Fischmehl und Fischöl darauf achten, die Herstellungsprozesse so effizient und umweltfreundlich wie möglich zu gestalten. Angesichts des vergleichsweise hohen Wärmeenergiebedarfs der verwendeten Prozesse verdient daher das Energiemanagement besonderes Augenmerk, wobei insbesondere die konsequente Nutzung von Abwärme (am Produktionsstandort bzw. dessen Nachbarschaft) sowie die Verwendung erneuerbarer Energieträger geprüft werden sollte.

4.3.5. Differenzierung der Vermarktung von Fischprodukten und Verbraucherinformation

Ein weiterer wesentlicher Ansatzpunkt für eine nachhaltige Futtermittelbereitstellung kann auch darin bestehen, den Bedarf besonders hochwertiger Futtermittelbestandteile zu reduzieren. Dies könnte beispielsweise dadurch erreicht werden, dass bei Fischarten mit einem besonders hohen Bedarf an Fischmehl und Fischöl (z.B. Lachse) zukünftig unterschiedliche Qualitäten angeboten werden. Diese abgestuften Qualitäten könnten sich im Falle von Lachsen z.B. durch verschiedene Gehalte an Omega-3-Fettsäuren unterscheiden. Während das teurere Premium-Produkt weiterhin über den bisher üblichen Gehalte an Omega-3-Fettsäuren verfügt, könnte ein zusätzlich ange-

botenes, preiswerteres Produkt einen niedrigeren Gehalt aufweisen und dadurch mit einem reduzierten Fischöleinsatz während der Zucht auskommen (IFFO 2013).

Wichtig in diesem Zusammenhang ist eine transparente Kommunikation seitens des Handels gegenüber den Verbraucherinnen und Verbrauchern, um diesen eine bewusste Wahl zwischen einem besonders ‚gesundheitsfördernden‘ und einem besonders ‚preiswerten‘ Produkt zu ermöglichen. Dabei sollte im Übrigen nicht verschwiegen werden, dass das gesundheitsfördernde Produkt mit dem hohen Gehalt an Omega-3-Fettsäuren während der Zucht einen höheren Verbrauch an Fischöl verursacht.

Eine gute Verbraucherinformation sollte zudem darauf hinweisen, dass durch den Konsum und Verzehr von Friedfischen (z.B. Karpfen) nochmals eine nahezu vollständige Reduzierung des Bedarfs an Fischmehl und Fischöl erreicht werden kann. Idealerweise wäre ein solcher Hinweis verbunden mit attraktiven bzw. innovativen Rezepten sowie Maßnahmen zur Überwindung von Vorbehalten bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern (z.B. Grätenschneider für Karpfen). In diesem Zusammenhang sollten seitens der Fischzüchter und des Handels auch weitere Anstrengungen unternommen werden, um das Spektrum von Friedfischarten aus Aquakultur auszuweiten und diese den Verbraucherinnen und Verbrauchern als besonders umweltfreundliche Proteinquellen anzubieten.

4.4. Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Vor dem Hintergrund der Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie den Qualitätskriterien und Ansatzpunkten für nachhaltiges Fischfutter werden im Folgenden konkrete Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für eine strategische Weiterentwicklung der Futtermittelbereitstellung unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten abgeleitet.

4.4.1. Identifizierung der unter Umweltgesichtspunkten optimalen futtermittelbezogenen Prozessparameter für die verschiedenen in Aquakultur gezüchteten Spezies

Forschungsbedarf besteht zunächst bei einer Reihe von Prozessparametern, die in einem direkten Zusammenhang mit dem Futtermiteinsatz stehen. Die Wassertemperatur stellt einen solchen Parameter dar. Die Wahl der Wassertemperatur hat einen erheblichen Einfluss auf den Futtermittelbedarf und die Verdaulichkeit des Futters sowie die Enzymaktivität und den Metabolismus bei den gezüchteten Fischen. Eine optimale Wassertemperatur führt zu optimalem Fischwachstum und sollte daher für alle in Aquakultur gezüchteten Arten bekannt sein (Bowyer et al. 2012).

Einen weiteren Forschungsbedarf stellt auch die optimale Nährstoffzusammensetzung für Futtermittel für verschiedene Arten dar. Dieser Bedarf ist insbesondere im Zusammenhang mit Ersatzprodukten für Fette und Proteine aus tierischen Quellen zu sehen. So führt bei zahlreichen Arten die Gabe von Sojamehl oder anderweitig veränderten Nährstoffzusammensetzungen zu einem langsameren Wachstum. Hinzu kommt, dass jede Art anders auf einen Futtermittelwechsel reagiert und pauschale Aussagen über die Substitutionsmöglichkeiten nicht möglich sind (Valverde et al. 2013).

In diesem Zusammenhang sollte auch die Verträglichkeit pflanzlicher Rohstoffe oder anderer Substitute in Langzeittests untersucht werden. Über Sojamehl als Ersatz für Fischmehl wurde beispielsweise berichtet, dass es subakute Enteritis (vgl. Abschnitt 4.2.1) hervorrufen kann. Die bisher durchgeführten Studien liefen jedoch nur über 34 Tage, und es besteht die Möglichkeit, dass über einen längeren Zeitraum die beobachteten Effekte wieder abklingen und es zu einer

„Einpendelung“ der Fischgesundheit kommen kann (Bansemer et al. 2015). Daher sind Langzeitexperimente auf diesem Gebiet unbedingt erforderlich.

Auf der Grundlage der zuvor genannten Einzelparameter sollten schließlich die Futtermittelgaben artspezifisch bestimmt bzw. aktualisiert werden, um auf diese Weise ggf. vorhandene Verluste bei den Futtermitteln zu vermeiden, Wasserverschmutzungen zu reduzieren und die zugehörigen Kosten zu senken (Niu et al. 2015). Dabei sollte eine artspezifische Futtermitteloptimierung unter Umweltgesichtspunkten angestrebt werden, d.h. Ziel sollte eine aus Systemsicht optimale Spezifizierung der verschiedenen Parameter sein, um die gesamten Umweltbelastungen entlang des gesamten Lebenszyklus zu minimieren.

4.4.2. Erhöhung des Anteils aus Fischsilage bereitgestellten Futtermittels

Untersuchungen an Tilapien haben gezeigt, dass der Anteil silierter Futtermittelbestandteile bis zu einem bestimmten Silageanteil gesteigert werden kann und sich erst oberhalb eines Schwellenwertes negative Effekte, z.B. in Form von geringeren Gewichtszunahmen, bei der Zucht einstellen. Bei Tilapien wird davon ausgegangen, dass bis zu 50% Fischsilage verwendet werden kann, sofern dem Futtermittel zusätzlich auch Reiskleie zugesetzt wird (Madagea et al. 2015).

Angesichts dieser Untersuchungen besteht zunächst die Notwendigkeit, für die verschiedenen in Aquakultur gezüchteten Fischarten die maximal möglichen Silageanteile im Futter zu ermitteln. Auf der Grundlage dieser Rahmenbedingungen besteht der prioritäre Bedarf auf dem Gebiet der anwendungsbezogenen Forschung und Entwicklung darin, eine möglichst flächendeckende Nutzung von Fischnebenprodukten sicherzustellen. Wie durch bereits abgeschlossene F&E-Projekte nachgewiesen werden konnte, ist eine Silierung von Schlachtabfällen aus der Fischverarbeitung technisch grundsätzlich machbar und (insbesondere in Form einer chemischen Silierung) gegenüber anderen Formen der Haltbarmachung (z.B. Tiefkühlung) mit z.T. erheblichen ökologischen Vorteilen verbunden (vgl. Abschnitt 4.2.4). Zukünftig wird es vor allem darauf ankommen, durch eine möglichst flächendeckende Einführung der Silierung die vorhandenen Potenziale zu nutzen. Dies bedeutet, dass die Siliertechnik gerade in den zahlreichen kleineren und mittleren Betrieben verfügbar gemacht werden sollte, um bisher nicht genutzte Fischnebenprodukte zu erfassen und für die Futtermittelbereitstellung verfügbar zu machen. Dies gilt sowohl für Fischzuchteinrichtungen bzw. fischverarbeitende Betriebe in Deutschland und Europa, aber insbesondere auch im weltweiten Maßstab (vgl. Abschnitt 4.3.3). Wichtige Ziele im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Siliertechnik sollten die Entwicklung und Bereitstellung mobiler Aggregate zur Silierung sein, um die entsprechenden Kosten für die einzelnen Betriebe so gering wie möglich zu halten. Ein weltweiter Technologietransfer der entwickelten Lösungen sollte angestrebt werden.

4.4.3. Effizienzsteigerung bei der Mikroalgenproduktion

Im Zusammenhang mit einer möglichst weitreichenden Substitution von Fischmehl durch silierte Fischnebenprodukte und dem verstärkten Einsatz pflanzlicher Proteine kommt der Bereitstellung von marinen phototrophen Mikroalgen mit hohem PUFA-Gehalt eine wichtige Bedeutung zu: Mikroalgen werden große Potenziale zugeschrieben, um besonders hochwertige Futtermittelbestandteile (wie beispielsweise EPA und DHA) substituieren zu können, die derzeit v.a. durch Fischmehl und Fischöl aus Wildfischbeständen bereitgestellt werden.

Um Mikroalgen jenseits der bislang schon bedienten Marktnischen für den Massenmarkt ökonomisch attraktiv zu machen, muss insbesondere die Effizienz der Mikroalgenproduktion gesteigert werden. Der Hauptansatzpunkt wird darin gesehen, die Lichtaufnahme und die Biosynthese zu

verbessern. Um die Biomasseproduktion bzw. die Fetterträge zu steigern, ist eine optimale Auswahl der verwendeten Arten, eine selektive Züchtung sowie ggf. genetische Modifizierung der in Frage kommenden Mikroalgen erforderlich. Daneben ist auch eine Weiterentwicklung der Produktionseinrichtungen für Mikroalgen erforderlich; zu nennen ist hier insbesondere eine Steigerung der Energieeffizienz der zum Einsatz kommenden Bioreaktoren und Kreislaufsysteme (Chauton et al. 2015).

4.4.4. Optimierung und Ausweitung der Zucht von Friedfischen

Wie bereits gezeigt wurde, stellt der Konsum von Friedfischen einen wichtigen mittelbaren Ansatzpunkt dar, um den Bedarf an Fischmehl und Fischöl in der Aquakultur zu reduzieren (vgl. Abschnitt 4.3.5). Allerdings werden die im derzeitigen Angebot verfügbaren Friedfische von zahlreichen Verbraucherinnen und Verbrauchern aufgrund ihres Geschmacks bzw. anderer Gründe (z.B. hohe Anzahl von Gräten) nicht geschätzt. Außerdem ist zu beachten, dass fast alle Friedfische aufgrund der vegetarischen Ernährung langsamer als Raubfische wachsen und somit längere Zuchtzeiten erforderlich machen.

Um die ökologischen Vorteile der Zucht von Friedfischen weiter auszubauen, sollten Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Bereich der Futtermittel v.a. darauf zielen, die benötigten Futtermittel in besonders umweltfreundlicher Qualität und gleichzeitig zu kostengünstigen Preisen anzubieten. Beispielsweise werden in Deutschland derzeit nur ca. 1% Karpfen in Bioqualität gezüchtet, da Futtermittel in Bioqualität vergleichsweise teuer sind (Schulz et al.). Die Beforschung von preiswerteren Futtermitteln für Karpfen in Bioqualität hat bereits begonnen (vgl. (Schulz et al.) und sollte konsequent fortgesetzt sowie auf weitere Friedfischarten ausgeweitet werden. In diesem Zusammenhang sollten auch futterbasierte Möglichkeiten zur Verbesserung des Geschmacks berücksichtigt werden.

Schließlich ist auch zu prüfen, ob weitere Arten von Friedfischen für eine nachhaltige Aquakultur erschlossen werden können. Die zugehörigen Maßnahmen sollten allerdings auf konventionelle Techniken wie Kreuzungen beschränkt sein. Gentechnische Verfahren, wie beispielsweise die Zucht schnellwachsender Karpfen mit Forellengenen (vgl. BUND 2013) werden nicht empfohlen, da diese von den Verbraucherinnen und Verbraucher aufgrund der allgemeinen Ablehnung von gentechnisch veränderten Lebensmitteln voraussichtlich nicht akzeptiert werden.

4.4.5. Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Futtermittelbereitstellung zeitlich eingeordnet und in Hinblick auf ihre Relevanz für ein mögliches Engagement seitens der DBU evaluiert. Daraus ergibt sich ein möglicher Fahrplan („Roadmap“) für die **strategische Weiterentwicklung der Futtermittelforschung** unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten (siehe Tabelle 4-2):

Tabelle 4-2: Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Futtermittelbereitstellung

Zeithorizont	Forschungs- und Entwicklungsansatz	Relevanz für ein Engagement der DBU
Kurzfristig (1-3 Jahre)	Identifizierung der unter Umweltgesichtspunkten optimalen futtermittelbezogenen Prozessparameter für die verschiedenen in Aquakultur gezüchteten Spezies	
	Erhöhung des Anteils aus Fischsilage bereitgestellten Futtermittels	X
Mittelfristig (3-5 Jahre)	Effizienzsteigerung bei der Mikroalgenproduktion	X
Langfristig (5-10 Jahre)	Optimierung und Ausweitung der Zucht von Friedfischen	X

Quelle: Eigene Darstellung

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Optimierung der futtermittelbezogenen Prozessparameter sowie zur Erhöhung des Silageanteils im Futtermittel bereits mit einem kurzfristigen Zeithorizont angegangen und erfolgreich abgeschlossen werden können. Während es sich bei der Optimierung der futtermittelbezogenen Prozessparameter eher um grundlegende Forschungsarbeiten handelt, wird bei Erhöhung des Silageanteils ein höherer Praxisbezug sowie eine höhere Relevanz für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) erwartet. Daher wird dieser F&E-Bedarf als relevant für ein mögliches Engagement der DBU eingeschätzt. Gleiches gilt für die erforderlichen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Mikroalgenproduktion, die jedoch aufgrund der Komplexität und der noch zu überwindenden Schwierigkeiten voraussichtlich erst nach drei bis fünf Jahren zu verwertbaren Ergebnissen führen werden. Einen eher langfristigen F&E-Ansatz stellt die Optimierung und Ausweitung der Zucht von Friedfischen dar, die ebenfalls aufgrund der hohen Relevanz für KMUs sowie der hohen systemischen Bedeutung als ein geeignetes Engagement für die DBU eingestuft wird.

5. Integrierte Produktion

Die sogenannte integrierte Produktion, d.h. die gemeinsame Zucht von Fischen und Pflanzen, erfolgt in einem System mit weitgehend geschlossenem Nährstoff- und Wasserkreislauf. Dabei steht die Elimination von Nährstoffen aus der Fischzucht im Vordergrund. In konventionellen Anlagen besteht eine wesentliche Herausforderung darin, unerwünschte Stoffeinträge in die Umwelt zu vermeiden. Genau an dieser Stelle setzt die integrierte Produktion an: Durch konsequentes Stoffstrommanagement sollen effektive Stoff- und Energiekreisläufe aufgebaut werden. Dabei soll nicht nur der unerwünschte Austrag von Nährstoffen mit dem Abwasser aus der Fischzucht vermieden werden; in der integrierten Produktion besteht die Zielsetzung vielmehr darin, die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe zu separieren und diese als Wertstoffe für den Fluid-Kreislauf in geschlossenen Aquakulturreislaufanlagen zurückzugewinnen. Letztlich werden die gewonnenen Nährstoffe zum Aufbau hochwertiger Biomasse in Form von Sekundärorganismen eingesetzt. Als Sekundärorganismen kommen hier sowohl verschiedene Algenarten als auch die Biomasseproduktion durch grüne Landpflanzen in Betracht. Zusätzlich wird das zuvor ungenutzte Abwasser für den Prozesswasserkreislauf zurückgewonnen, was sich positiv auf die tägliche Wasserbedarfsrate und die damit verbundenen umwelt- und wirtschaftlichkeitsrelevanten Aufwendungen der Aquakultur-Anlagen auswirkt. Durch den Einsatz von Aquaponik-Systemen können zusätzlich zum Nährstoffrecycling auch erhebliche Mengen an Wasser eingespart werden, da lediglich der geringe Anteil an Prozesswasser kompensiert werden muss, der durch Evaporation verloren geht. Die im Zuge der Nährstoffelimination zusätzlich gewonnene Biomasse kann entweder direkt in den trophischen Kreislauf des Systems rückgeführt oder alternativ als Sekundärprodukt weiter vermarktet werden.

5.1. Bestandsaufnahme aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Im diesem Kapitel erfolgt eine Bestandsaufnahme zu aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der integrierten Produktion von Pflanzen und Fischen innerhalb eines geschlossenen Nährstoffkreislaufsystems. Nachdem in Abschnitt 5.1.1 hierzu zunächst ein technologischer Überblick gegeben wird, folgt in Abschnitt 5.1.2 eine Einschätzung zum aktuellen Stand der technischen Implementierung von Anlagen zur integrierten Produktion von Fisch und Pflanzen. Darauf aufbauend werden die Beiträge, die durch die von der DBU im Rahmen ihrer Initiative Nachhaltige Aquakultur geförderten Projekte vorgestellt und eingeordnet (Kapitel 0 und 5.1.4).

5.1.1. Technologischer Überblick

Die Kontrolle der Fischzucht und insbesondere die Kontrolle der Fischzucht in Kreislaufanlagen stellt einen vergleichsweise komplexen Prozess innerhalb des Lebensmittelsektors dar. Die mit der gekoppelten Pflanzenproduktion verbundene Integration eines weiteren Produktionssystems stellt hier zunächst eine Steigerung der Komplexität des Gesamtprozesses dar. Der daraus resultierende Mehraufwand an Steuer- und Regelungstechnik, der Bedarf an zusätzlichem Know-how und die Inkaufnahme eines größeren Risikos von Produktionsausfällen müssen durch den potenziellen Mehrwert, den die integrierte Produktion verspricht, in der Realität des Produktionsalltags aufgewogen werden.

Bei der integrierten Produktion nehmen die Pflanzen die im Wasser gelösten Stoffwechselprodukte der Fische sowie mikrobielle Abbauprodukte auf. Die Pflanze kann in diesem Sinne somit als Filter für diese Substanzen bezeichnet werden (Tokunaga et al. 2015). Gegenüber der Fischzucht in

konventionellen Kreislaufanlagen, in denen die Akkumulation von Nährstoffen ein großes Problem darstellt, verbessert die integrierte Produktion allerdings nicht nur die Wasserqualität für die Fischzucht, sondern erlaubt zusätzlich, diese für den Pflanzenwachstum zu nutzen (Love et al. 2014). Dennoch bleiben zusätzliche technische Maßnahmen, zum Beispiel eine Vorrichtung zur Separation von Feststoffen, erforderlich, um die Gesundheit der Fische und Pflanzen zu erhalten und einer Verschlechterung der Wasserqualitätsparameter vorzubeugen (Danaher et al. 2013). Bezüglich der technischen Umsetzung der Feststoffseparation wird der Einsatz von Absetzbecken oder Wirbelabscheidern jeweils unterschiedlicher Bauart diskutiert. Während der Vorteil von Absetzbecken in einem geringeren Energiebedarf und deshalb auch geringeren Betriebskosten besteht, liegen die Nachteile in der erforderlichen Beckengröße, dem damit verbundenen Platzbedarf und nicht zuletzt in dem Aufwand zur Installation. Eine weitere Limitierung ergibt sich aus der vergleichsweise niedrigen Umschlagsrate. So dauert es etwa 20 bis 30 Minuten, bis die Feststoffe am Grund des Absetzbeckens sedimentiert sind. Eine Alternative zum Absetzbecken stellt der Einsatz eines sogenannten Wirbelabscheiders dar, dessen Betrieb mit einem tendenziell höheren Energiebedarf verbunden ist. Vorteile des Einsatzes eines Wirbelabscheiders sind der vergleichsweise geringe Platzbedarf und der geringere Aufwand zur Installation. Zudem erlaubt die Wirbelabscheidertechnik die Entfernung von Feststoffen in höheren Flussraten, was letztlich bedeutet, dass in der gleichen Zeit bis zu vier Mal mehr Feststoffe separiert werden können (Danaher et al. 2013).

Die integrierte Produktion von Pflanzen und Fisch kann grundsätzlich aus zwei Richtungen heraus konzipiert werden. Zum einen ist dies die bereits weiter oben beschriebene Perspektive aus der Fischzucht heraus, bei der für anfallende Nährstofffrachten sinnvolle Sekundärverwendungsoptionen gesucht werden. Zum zweiten besteht aber auch die Möglichkeit die integrierte Produktion aus der Perspektive der Pflanzenzucht heraus zu betrachten. So können die Pflanzen das von den Fischen ausgeschiedene CO_2 zum Aufbau von Biomasse nutzen. Durch die Beaufschlagung mit den Nährstoffen aus der Fischzucht erhalten die Pflanzen zudem einen Großteil der für das Wachstum entscheidenden Nährstoffe. Ein weitgehender, bisweilen sogar vollständiger Verzicht auf die Zugabe von Nährstoffen für die Pflanzenproduktion ist daher möglich.

Bei der integrierten Produktion ist sowohl eine Anzucht der Pflanzen auf festem Substrat in sogenannten Lysimetern als auch eine Produktion in Hydrokultur möglich, bei der die Wurzeln der Pflanzen die Nährstoffe direkt aus dem sie umfließenden Wasser aufnehmen. Dieses Produktionsverfahren wird auch als Hydroponik bezeichnet. Wird im Zuge der integrierten Produktion die Aquakultur mit einem hydroponischen System gekoppelt, so spricht man auch von Aquaponik. Das folgende Kapitel wird sich vorrangig mit dieser Form der integrierten Produktion beschäftigen. Gleichwohl ist darauf hinzuweisen, dass es unter den Expertinnen und Experten unterschiedliche Positionen dazu gibt, welchem Verfahren zur Pflanzenproduktion der Vorzug zu geben ist. Das Problem hierbei ist, dass es zwar Beschreibungen der jeweiligen Vorteile, jedoch kaum vergleichende Analysen gibt (siehe hierzu auch die entsprechenden Ausführungen in Kapitel 5.3.3). Eine zusammenfassende Auflistung der gegenwärtig in Aquaponiksystemen eingesetzten Techniken findet sich, inklusive Angabe zum jeweiligen Marktanteil, bei Love et al. (2015).

Als ein wesentlicher Vorteil der Aquaponik wird häufig angeführt, dass diese erlaubt, Lebensmittel näher an bzw. sogar in urbanen Gebieten produzieren zu können. So ist zum Beispiel denkbar, die Produktionseinrichtung direkt auf dem Dach von Supermärkten zu installieren, in denen die Produkte schließlich verkauft werden sollen. Entsprechende Beispiele hierfür lassen sich in den USA, der Schweiz und seit einiger Zeit auch in Deutschland (Berlin) finden. Als ein weiterer Vorteil wird angeführt, dass der Systemaufbau mit wenig Aufwand modifiziert werden kann, abhängig vom Standort der Farm und der Verfügbarkeit technischer Installationen. Dies soll die Produktions-

bedingungen verbessern und zugleich eine Optimierung der Betriebskosten ermöglichen (Tokunaga et al. 2015).

Zudem wird angeführt, dass Fische in aquaponischen Systemen in hoher Dichte gehalten werden können. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit wird auch auf den minimierten Wasseraustausch und die gleichzeitige Erzeugung vermarktungsfähiger pflanzlicher Lebensmittel hingewiesen (Danaher et al. 2013). Gleichwohl gilt es diesbezüglich kritisch zu prüfen, inwiefern sich höhere Besatzdichten in der Fischzuchtanlage unter Tierschutzaspekten negativ auswirken. So kann es bei entsprechend hohen Besatzdichten zu einem Anstieg der Stresshormonkonzentration bei den Fischen kommen, die sowohl im Fisch selbst als auch im Kreislaufwasser nachzuweisen ist (vgl. hierzu auch die Ausführungen zu Aspekten des Tierschutzes in Abschnitt 3.1.5). Bezüglich des wechselseitigen Verhältnisses aus durch Aquaponik verbesserter Wasserqualität und der dadurch möglichen Erhöhung von Besatzdichten zur Steigerung der ökonomischen Profitabilität der Anlage andererseits gilt es sicherzustellen, dass die Belange des Tierschutzes in angemessener Form berücksichtigt werden.

Ein weiteres Merkmal der Aquaponikanlagen besteht darin, dass diese bei den jeweiligen Betreibern als eine nachhaltigere Methode der Lebensmittelproduktion angesehen werden. Die Entscheidung für die Inbetriebnahme eines Aquaponiksystems ist daher vielfach auch eng mit dem Wunsch zur eigenständigen Produktion der Lebensmittel verbunden (Love et al. 2014). Die Motivation zur Errichtung eines Aquaponiksystems ist daher nicht selten mit dem Gedanken der Subsistenzwirtschaft verbunden. Dies gilt es zu berücksichtigen, wenn in den folgenden Kapiteln der Stand der technischen Implementierung und die Wirtschaftlichkeit aquaponischer Systeme behandelt wird. Im Zuge einer Erhebung bei mehr als 800 Aquakulturproduzenten gaben die meisten der Produzenten als Grund für die Aufnahme der Aquaponik an, ihre eigenen Lebensmittel produzieren zu wollen und dabei auf Umwelt- und Nachhaltigkeits- sowie Gesundheitsaspekte besonderen Wert zu legen (Love et al. 2014).

5.1.2. Stand der technischen Implementierung

Die Idee einer technischen Realisierung von Aquaponiksystemen kam bereits in den 1970er Jahren auf und wurde seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Heute werden Aquaponiksysteme vorzugsweise in Gewächshäusern betrieben (ca. 66% aller Aquaponikanlagen). Bei entsprechenden klimatischen Bedingungen können sie jedoch auch als nicht überdachte Außenanlagen betrieben werden. Charakteristisch ist, dass jeweils die Methoden und Ausrüstungsbestandteile aus der Aquakultur und der Hydroponik verwendet werden. Kommerziell betriebene Anlagen zur integrierten Produktion von Fisch und Pflanzen existieren erst seit vergleichsweise kurzer Zeit. Auch aus diesem Grund wird angemerkt, dass bislang nur sehr begrenzt Informationen zu den eingesetzten Methoden, erzielten Erträgen und letztlich der Wirtschaftlichkeit der Anlagen verfügbar sind (Love et al. 2015). Love und Kollegen haben im Zuge eines internationalen Vergleichs umfangreiche Erhebungen zur aktuellen technischen Ausgestaltung der derzeit installierten Anlagen durchgeführt. Dabei wurden zentrale Produktionskennzahlen, wesentliche prozessspezifische Parameter und nicht zuletzt die Motivationsgründe für die Inbetriebnahme der Anlagen bei den Betreibern erhoben. Bemerkenswert ist, dass ein Großteil der Betreiber ihre Aquaponiksysteme weitgehend selbst geplant und konstruiert haben. Erst im Zuge einer zunehmenden Kommerzialisierung der Lebensmittelproduktion in Aquaponiksystemen wird auch der verstärkte Einbezug von Ingenieuren, spezialisierten Anlagenbauern und Aquakultur-Beratern erwartet (Love et al. 2015). Bei der großen Mehrheit der kommerziellen Aquaponikbetriebe handelt es sich um eher kleine bis sehr kleine Systeme. Für die durchschnittliche Größe kommerzieller Aquaponikanlagen in den USA wurde das Jahr 2013 ein Wert von 10.300 L produktivem

Wasservolumen und ein Zuchtertrag an Fisch von lediglich 23 bis 45 kg pro Jahr ermittelt. Entsprechend gering sind die jährlichen Umsatzzahlen, und die Produkte aus der Aquaponikanlage werden häufig durch den Verkauf weiterer landwirtschaftlich erzeugter Produkte ergänzt. Die Produzenten verkaufen ihre Erzeugnisse entweder auf dem eigenen Hof oder auf regionalen Märkten. Es handelt sich dabei um Nischenmärkte, auf denen in aller Regel höhere Preise für die Aquaponikprodukte erzielt werden können (Love et al. 2015).

Für lediglich ein Drittel befragten Aquaponikproduzenten stellen die Erträge aus der Aquaponikanlage auch die Haupteinkommensquelle dar. Etwa die Hälfte der Betreiber gab bei der Befragung an, dass ihr Betrieb in den letzten 12 Monaten profitabel war. Ähnlich hoch ist der Anteil derer, die davon ausgehen, im folgenden Jahr profitabel wirtschaften zu können (Love et al. 2015).

Einen Überblick über die am häufigsten in Aquaponiksystemen eingesetzten eingesetzte Fisch- und Pflanzenarten gibt Tabelle 5-1 (Love et al. 2015).

Tabelle 5-1: In Aquaponiksystemen vorzugsweise eingesetzte Fisch- und Pflanzenarten

Fischarten	Pflanzenarten
Tilapien	Salat, Kopfsalat
Katzenfische	Tomaten
Shrimps, Garnelen	Grünkohl
weitere Arten (Barsche, Forellen, Seebarsche)	Basilikum, und weitere Gewürzpflanzen
Zierfische	Mangold
	Paprika
	Gurken

Quelle: Love et al. (2015)

Im Folgenden sollen nun ausgewählte F&E-Projekte vorgestellt werden, die im Rahmen der DBU-Initiative „Nachhaltige Aquakultur“ gefördert wurden und zugleich einen direkten Bezug zu den im Überblick aktueller Arbeiten bereits aufgeführten Ansatzpunkte für eine nachhaltigere Fischzucht in Aquaponikanlagen aufweisen.

5.1.3. Biologische Abwasserreinigung in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch integrierte Kultur von Halophyten

Gegenstand des Projektes „Biologische Abwasserreinigung in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch integrierte Kultur von Halophyten“ (AZ 27708-23, Kurztitel „Halophyten“) war es, die zuvor ungenutzten, gelösten Nährstoffe aus dem Prozesswasser einer geschlossenen Salzwasser-Kreislaufanlage zum Aufbau hochwertiger Biomasse einzusetzen und sie damit einer sinnvollen Nutzung zuzuführen. Gleichzeitig soll damit der unerwünschte Eintrag von Nährstoffen in die Umwelt verhindert werden. Um Verunreinigung des Prozesswassers zu ermöglichen, wurden die Pflanzen hydroponisch, also mit den Wurzeln direkt im Prozesswasser, kultiviert. Durch den Einsatz salztoleranter Pflanzen (Halophyten) sind keine aufwändigen Prozesse zur Entsalzung des Wassers erforderlich. Die Halophyten stellen im Kreislaufprozess ein Sekundärprodukt dar, das die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems erhöhen soll. Das Projekt wurde vom Forschungsbereich Aquakultur der HTW Saar durchgeführt.

Im Zuge eines Vergleichs des Aquaponiksystems mit der Fischzucht in einem umweltoffenen Netzkäfig wurde jeweils der Eintrag von Nitrat-Stickstoff betrachtet, der über das Fischfutter in die jeweiligen Systeme eingebracht wird. Da der Stickstoff im geschlossenen Kreislauf als Nährstofflieferant und damit als Dünger für das Wachstum der Pflanzen wirkt, weist das Aquaponik-System einen Zusatznutzen auf. Um die Nutzengleichheit beider Systeme als Basis eines fairen Vergleichs sicherzustellen, wurde bei der Fischzucht im Netzkäfig zusätzlich noch die Bereitstellung der äquivalenten Menge an künstlich produziertem Dünger berücksichtigt.

Die Ergebnisse der vom Öko-Institut durchgeführten ökobilanziellen Untersuchung zeigen einen höheren spezifischen Primärenergiebedarf der Fischzucht in einer geschlossenen Kreislaufanlage. Dies schlägt sich auch in Form eines höheren Treibhausgaspotenzials nieder. Die integrierte Produktion liegt hier etwa 60% über den Werten, die sich für die Fischzucht im Netzkäfig inklusive der Herstellung des künstlichen Stickstoffdüngers ergeben. Demgegenüber steht ein umgekehrtes Ergebnis für den unerwünschten Eintrag von Nährstoffen in aquatische Ökosysteme: In Hinblick auf das Eutrophierungspotenzial weist das Aquaponiksystem eine im Vergleich zum Referenzsystem rund 80% geringere Umweltbelastung auf.

Im Rahmen der ökobilanziellen Analyse konnte zudem gezeigt werden, dass die Futtermittelverwertung, ausgedrückt als Futtermittelverwertungskoeffizient (engl. Food Conversion Ratio, FCR) bei gegenüber der Umwelt geschlossenen Aquakultursystemen deutlich besser abschneidet. So konnte gezeigt werden, dass bei Annahme einer schlechteren Futtermittelverwertung (5 kg anstatt 2,5 kg Futter pro kg Fisch) im Netzkäfig ein vergleichbarer Primärenergieaufwand und ein ähnliches Treibhausgaspotenzial wie bei der Aquaponikkultur besteht.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass eine integrierte Produktion im Vergleich zu umweltoffenen Netzkäfigsystemen weitere, im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung jedoch nur schwer zu quantifizierende Nutzenaspekte von Bedeutung sein können. So bedeutet zum Beispiel die bei einer integrierten Produktion erzielbare Vermeidung von Flucht von Fischen, die bei Netzgehegen beobachtet werden kann, nicht nur die Vermeidung von Zuchtverlusten, sondern auch Verringerung eines möglicherweise negativen Einflusses auf die umgebenden, z.T. sensiblen marinen Ökosysteme (Möller et al. 2015).

5.1.4. Nährstoff-Recycling in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch die integrierte Produktion von Algenbiomasse

Gegenstand des F&E-Projektes mit dem Titel „Nährstoff-Recycling in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch die integrierte Produktion von Algenbiomasse“ (AZ 28173-23; Kurztitel „Algenbiomasse“) war die Integration photoautotropher Verfahren (durch die Kultur von Algen in Photobioreaktoren) in Aquakulturkanalanlagen zur Fischzucht, um im Wasser gelöste Nährstoffe gezielt einem Recycling zurückzuführen. Die gezüchteten Algen sollen auch auf ihre Eignung als Futtermittel geprüft werden. Die Beantragung dieses Vorhabens wurde durch die Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTW Saarland) vorgenommen; als Partner waren IGV (Nutheta), Subitec (Stuttgart) und Erwin Sander Elektroapparatebau (Uetze-Eltze) beteiligt.

Mögliche Vorteile der Neuentwicklung waren die Schließung von Stoffkreisläufen sowie die Entfernung von im Wasser gelösten Nährstoffen, v.a. in Hinblick auf Phosphat- und Stickstoffbelastung von Aquakulturen durch Algen (Möller et al. 2015). Auf Basis der ersten Projektphase (Laborphase) standen keine belastbaren Daten zur Evaluation des Nachhaltigkeitspotenzials durch das Öko-Institut zur Verfügung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich auch auf dem Forschungsfeld des Nährstoffrecyclings durch integrierte Produktion photoautotropher Mikroalgen für die

Zukunft neue Erkenntnisse ergeben, auf deren Basis zu gegebener Zeit eine Nachhaltigkeitsbewertung des Forschungsansatzes möglich ist.

5.2. Ansatzpunkte für eine integrierte Nutzung von Energie und Abwärme in Aquakulturanlagen

Die Fischzucht in Kreislaufanlagen mit integrierter Pflanzenproduktion weist einen vergleichsweise hohen spezifischen Energiebedarf im Vergleich zu anderen Aquakultursystemen aus. Insbesondere der für die Prozesstechnik und die Aufrechterhaltung des Wasserkreislaufs benötigte Strom ist hierbei von wesentlicher Bedeutung. Für die Bereitstellung des benötigten Stroms wird in der Regel gewöhnliche Netzenergie verwendet. Im Zuge der vom Öko-Institut durchgeführten ökobilanziellen Analysen wurde diese Netzenergie entsprechend der gängigen ökobilanziellen Praxis mit dem durchschnittlichen Emissionsprofil des deutschen Strommix bilanziert. Hier besteht, neben den Gewinnen in Bezug auf die technologische Effizienz, in doppelter Hinsicht Grund zur Annahme, dass die mit dem Energiebedarf der Anlagen verbundenen Umweltauswirkungen zukünftig zurückgehen werden. Durch den wachsenden Anteil erneuerbarer Energieträger am Strommix werden künftig auch die aus mit dem Strombedarf verbundenen Umweltbelastungen je Kilowattstunde zurückgehen. Darüber hinaus ist es möglich, den Strombedarf von Aquakulturanlagen direkt durch Strom aus vor Ort installierten Photovoltaikanlagen zu decken. Als Beispiel ist hier die Anlage der Meeresfischzucht Völklingen zu nennen, die laut Aussage der Verantwortlichen des F&E-Projekts „Biologische Abwasserreinigung in landbasierten marinen Kreislaufanlagen durch integrierte Kultur von Halophyten“ Strom aus einer solchen Anlage bezog. Die Frage des zur Deckung des Strombedarfs eingesetzten Energieträgers kann eine erhebliche Auswirkung auf die spezifische Umweltbilanz einer Aquakulturanlage haben. Im Zuge einer überschlägigen Rechnung durch das Öko-Institut konnte gezeigt werden, dass sich das mit der Fischzucht in der entsprechenden Anlage verbundene Treibhausgaspotenzial um bis zu 30% verringert, wenn man einen Strommix mit 50% Photovoltaikanteil ansetzt (Möller et al. 2015).

Bei der Zucht von aus den Tropen stammenden Warmwasserfischen kommt der zusätzliche Aufwand zur Bereitstellung für die Fische ausreichender Wassertemperaturen hinzu. Zur konventionellen Beheizung der Becken kommen je nach Heizungstyp Heizöl, Erdgas oder aber auch erneuerbare Energieträger wie zum Beispiel Biogas zum Einsatz. Auch hierzu liegt eine überschlägige Berechnung des Öko-Instituts der zur bauseitigen Erwärmung von Frischwasser erforderlichen Energie vor. Auf Basis eines Energieträgermixes von 50% Erdgas und 50% Heizöl wurde für die erforderliche Erwärmung des Wassers von 10° auf 24°C ein Energiebedarf von ca. 84 MJ / 1.000 L berechnet (Möller et al. 2015). Nicht zuletzt aufgrund der mit der Bereitstellung der Wärmeenergie verbundenen Kosten werden bereits häufig erneuerbare Energien eingesetzt, um zumindest einen Teil des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen decken zu können. Beispiel hierfür ist die im Projekt „Hormonfreie Tilapiaproduktion sichert nachhaltige Fischproduktion in Deutschland“ (AZ-28177; Kurztitel „Hormonfreie Tilapiaproduktion“) zur Erwärmung des Wassers eingesetzte Solarheizung (Möller et al. 2015). Bezüglich der Bereitstellung der erforderlichen Wärmeenergie wird aktuell noch mit vielen verschiedenen technologischen Ansätzen experimentiert. Bemerkenswert ist jedoch, dass insbesondere im Bereich der eher kleinen Aquaponikbetriebe heute bereits in mehr als 50% der Fälle zumindest ein Teil der erforderlichen Energie in Form erneuerbarer Energien bereitgestellt wird (Love et al. 2014).

Ein aus ökologischer Sicht ebenfalls sehr vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von zuvor ungenutzter Prozessabwärme aus z.B. Biogasanlagen zur Erwärmung des Prozesswassers.

Bei der integrierten Produktion von Fisch und Pflanzen können auch in Hinblick auf den Gasaustausch zwischen den beiden Produktionssystemen synergetische Effekte genutzt werden. Bei in

Gewächshäusern installierten Hydroponikanlagen erfolgt zuweilen ein künstlicher Eintrag von Kohlendioxid zur Steigerung des Biomassezuwachses. In einer Aquaponikanlage hingegen können die Pflanzen das Kohlendioxid, das im Zuge des Stoffwechsels von den Fischen abgegeben wird, aufnehmen und in Form eines Biomassezuwachses verwerten. Auf eine zusätzliche Begasung des Gewächshauses mit Kohlendioxid kann in diesem Fall zumindest teilweise oder sogar ganz verzichtet werden, ohne dabei Einbußen beim Biomassezuwachs in Kauf nehmen zu müssen.

Darüber hinaus sind zweifellos weitere Ansätze denkbar. So könnte ein Ansatz künftiger F&E-Aktivitäten evaluieren, ob zur Beschattung von Aquaponikanlagen in einem Gewächshaus ggf. flexible Rollos mit eingearbeiteten organischen PV-Zellen eingesetzt werden können. So könnte ein smarter und optimal auf die jeweiligen Umgebungsbedingungen adaptierbarer Regelkreis geschaffen werden.

5.3. Ableitung des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Auf Basis der bisher genannten Herausforderungen und Ansatzpunkte werden in den folgenden Kapiteln prioritäre Forschungs- und Entwicklungsbedarfe abgeleitet. Dabei erfolgt aus übersichtlichkeitsgründen eine Aufgliederung in die Schwerpunktfelder Wirtschaftlichkeit (Abschnitt 5.3.1), Wahl der einzusetzenden Fische und Pflanzen (Abschnitt 5.3.2), Optimierung der Prozessintegration (Abschnitt 5.3.3) und die Handhabung von Krankheitserregern, sowohl bei den Fischen als auch bei den Pflanzen (Abschnitt 5.3.4). Abschließend wird in Form einer Roadmap ein mögliches Entwicklungsszenario aufgezeigt und die Relevanz für ein potenzielles Förderengagement der DBU eingeschätzt (Abschnitt 5.3.5).

5.3.1. Optimierungsansätze zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Lebensmittelproduktion in integrierten Systemen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt in vielen Fällen noch nicht gegeben. Dies gilt insbesondere dann, wenn mit der Aquaponik Ziele verfolgt werden, die über eine reine Subsistenzwirtschaft hinausgehen. Weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden als notwendig erachtet, um letztlich bestimmen zu können, ob die Aquaponik eine wirtschaftlich tragfähige Methode zur Bereitstellung von Lebensmitteln werden kann (Love et al. 2015).

Wie bereits bei den Ausführungen zum Einsatz erneuerbarer Energieträger erwähnt, experimentieren zahlreiche Betreiber mit einer Vielzahl unterschiedlicher Prozesstechnologien. Die Systeme werden häufig als Reaktion auf prozesstechnische Herausforderungen hin angepasst und weiterentwickelt (Love et al. 2014). Ein besonderer Bedarf, zugleich aber auch ein bedeutendes Potenzial für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten besteht explizit für solche Aquaponikanlagen, die als Best-Practice-Ansätze bezeichnet werden können und deren möglichst große Verbreitung eine erhebliche Multiplikationswirkung unter den experimentierfreudigen Betreibern von Aquaponiksystemen entfalten kann.

Ähnlich wie bereits bei der Bestimmung von zentralen Leistungsindikatoren der Aquakultur-Kreislaufanlagen müssen im Rahmen solcher Best-Practice-Beispiele wesentliche, die Leistung der Anlage charakterisierende Kenngrößen ermittelt werden. Bei der integrierten Produktion in Aquaponiksystemen wird es neben der Bestimmung von fischartenspezifischen Leistungsindikatoren im Zuge künftiger F&E-Aktivitäten auch um die Definition entsprechender pflanzen-spezifischer Leistungsindikatoren gehen müssen. Hierzu werden pflanzenartspezifische Angaben zu optimalen Durchflussraten, der Beaufschlagungen mit Nährstoffen, der Wahl des je nach Pflanze am besten geeigneten Substrats oder aber auch dem Bedarf einer künstlichen

Beleuchtung zu bestimmen sein. Diese Daten können perspektivisch ebenfalls dazu genutzt werden, die jeweils besten verfügbaren Technologien (BVT) zu bestimmen und in einem darauf aufbauenden Schritt auch unterschiedliche Anlagen einem Leistungsvergleich (Benchmarking) unterziehen zu können. Bei der Kommunikation von Beispielen erfolgreicher technischer Umsetzung der Kreislaufschließung müsste auch darauf verwiesen werden, wie im spezifischen Einzelfall den verschiedenen Ansprüchen an die Prozesstechnik (z.B. ausreichende Balance des Stickstoffkreislaufs, energetische Optimierung) Rechnung getragen wurde. Außerdem sollte kommuniziert werden, inwiefern der Sicherstellung möglichst weitgehend optimierter Haltungsbedingungen für die Besatzfische bei gleichzeitiger Wahrung der Gesamteffizienz des Zuchtprozesses Rechnung getragen wurde. Erste Anhaltspunkte finden sich dazu bereits in der einschlägigen Literatur. Demnach wird postuliert, dass die Größe des Aquaponik-Systems in Zusammenhang zur erzielbaren Rendite steht (Love et al. 2015; Bailey et al. 1997). Rupasinghe & Kennedy haben die Wirtschaftlichkeit der separaten Produktion von Gemüse und Fisch mit der Produktion derselben Lebensmittel in einem Aquaponiksystem verglichen und konnten zeigen, dass das Aquaponiksystem eine höhere Rendite ermöglichen kann (Rupasinghe & Kennedy 2010).

Erste Berechnungen zu Wirtschaftlichkeitsschwellen (Break-Even-Preise) liegen sowohl für die in Aquaponik gezüchteten Fische als auch für die pflanzlichen Produkte vor (Tokunaga et al. 2015). Da diesen Studien jedoch für spezifische geografische Bezugsräume gelten und die Parameter weitgehend auf der Basis von experimentellen Daten oder Annahmen zu hypothetischen Farmen aufbauen, werden mögliche Hochskalierungseffekte und in der Realität zusätzlich existierende Herausforderungen wie Logistikprobleme in der Lieferkette oder suboptimale Produktionsleistungen derzeit nicht berücksichtigt (Tokunaga et al. 2015). Entsprechende Analysen sollten bei marktnahen Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit Bezug zur Aquaponik unbedingt mit erhoben werden.

Mittel- bis langfristig wird es entscheidend sein, über eine entsprechende Vielzahl von Fallbeispielen das bestehende Wissen um die notwendigen Bedingungen zum dauerhaft wirtschaftlichen Betrieb von Aquaponiksystemen zu erweitern. Einen interessanten Vorschlag liefern hierzu Love und Kollegen mit ihrem Versuch, in einer Formel darzustellen, von welchen Variablen die Wirtschaftlichkeit der Aquaponik abhängt. In ihre Überlegungen beziehen sie dabei unter anderem das Vorwissen der Betreiber, die Zusammensetzung des Haushaltseinkommens der Betreiber, die Art der Verkäufe und die verkaufserlöse sowie die jeweilige Klimazone mit ein. Zudem stellen sie fest, dass die wirtschaftlichste Gruppe aus kommerziellen Produzenten mit vergleichsweise großen Anlagen besteht, die auch Aquaponikmaterialien und beratende Dienstleistungen anbieten (Love et al. 2015).

In Bezug auf die zukünftige Wirtschaftlichkeit der Lebensmittelproduktion in Aquaponiksystemen spielt auch die Preisentwicklung bei Gemüse und Fisch eine wesentliche Rolle. Aufgrund des vergleichsweise hohen spezifischen Primärenergiebedarfs der Aquaponik werden entsprechende Produkte in der Herstellung vermutlich auf absehbare Zeit teurer sein, als dies zum Beispiel Fisch aus mariner Fangfischerei ist. Entscheidend wird hierbei sein, inwiefern sich auch angesichts eines vermutlich wachsenden Angebots an Produkten aus Aquaponik höhere Preise realisieren lassen, da die Verbraucherinnen und Verbraucher ggf. ein höhere Zahlungsbereitschaft für regional und umweltfreundlich erzeugte Lebensmittel entwickeln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass neben den Erlösen aus dem Fischabsatz selbstverständlich auch die Erlöse der produzierten Pflanzen bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit mit berücksichtigt werden müssen.

5.3.2. Optimierung der Fisch- und Pflanzenwahl in Abhängigkeit des geographischen Bezugsrahmens

Es besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Hinblick auf die Optimierung der Fisch- und Pflanzenauswahl, wobei der Wahl des geografischen Bezugsrahmens eine besondere Bedeutung zukommt. Dies gilt insbesondere für die in globalem Maßstab relevante Aquakultur in tropischen und subtropischen Klimazonen, da hier bislang kaum zu Aquaponik geforscht wurde (Trang & Brix 2014). Auf die spezifische Situation der integrierten Produktion auf Inseln des asiatischen bzw. ozeanischen Raums ist hier hinzuweisen. Aus ernährungsphysiologischer Sicht sieht sich in dieser Region insbesondere die Bevölkerung von Inseln mit einer besonderen Situation konfrontiert, da sie vom Festland und den dort angebauten landwirtschaftlichen vitaminreichen Produkten weitgehend abgeschnitten bzw. nur mit vergleichsweise großem Aufwand zu versorgen sind. Stellvertretend für andere Produktionsgebiete in Insellage sei hier auf das Beispiel von Hawaii hingewiesen, dass seine Versorgung beispielsweise mit Salat zu 89% aus Importen decken muss. Ein entsprechend großes Potenzial wird daher darin gesehen, über Hydroponik bzw. Aquaponik vor Ort produzierten Salat auf den Markt zu bringen (Tokunaga et al. 2015). Der integrierten Produktion von vitaminreichem Gemüse in Aquaponiksystemen kann daher ein wesentliches Potenzial zugeschrieben werden, die bestehenden Beschränkungen einer ausgewogenen und gesundheitsfördernden Ernährung zu mildern. Anders als zum Beispiel in Europa und den USA könnte in Asien bzw. Ozeanien die Produktion ernährungsphysiologisch wertvoller Pflanzen durch den Einsatz aquaponischer Systeme im Vordergrund stehen.

Obwohl bislang stärker beforscht, besteht auch in Europa hinsichtlich der Wahl geeigneter Fische und Pflanzen für den Einsatz in Aquaponiksystemen Forschungsbedarf. So ist beispielsweise im Zuge zukünftiger F&E-Aktivitäten zu evaluieren, für welche Pflanzenprodukte (z.B. Halophyten) auch jeweils ein in wirtschaftlicher Hinsicht attraktiver Markt mit entsprechender Nachfrage durch Verbraucherinnen und Verbraucher besteht. Verstärkt wird dabei auch die Frage in den Fokus rücken, welche Lösungen am besten geeignet sind, um z.B. auch eine kontinuierliche Produktion in integrierten Systemen über das ganze Jahr hinweg sicherzustellen. Je nach Standort der Anlage wird es dabei um die Bewältigung unterschiedlicher Herausforderungen gehen. So ist zum Beispiel an Standorten in Nordeuropa (z.B. Norwegen oder Island) die Bereitstellung eines ausreichenden Angebots an Wärme und Licht für das Pflanzenwachstum sicher zu stellen. Im Gegenzug gilt es, im Zuge weiterer F&E-Aktivitäten zu untersuchen, wie an Standorten in Südeuropa angesichts der hohen Temperaturen insbesondere in den Sommermonaten eine kontinuierliche Fischzucht möglich ist.

Aus Sicht der Betreiberinnen und Betreiber von Aquaponikanlagen wird es auch darum gehen, möglichst rasch auf spezifische Kundenwünsche und Veränderungen bei der Nachfrage am jeweiligen Markt reagieren zu können. Diesbezüglich ist auch zu erwarten, dass Untersuchungen zum Pflanzsubstrat und anderen Anlagenkomponenten (z.B. Schwimmern) ein bedeutender Gegenstand künftiger F&E-Aktivitäten sein wird, um langfristig hohe Erträge sicherzustellen zu können (Hussain et al. 2015).

5.3.3. Optimierung der Systemintegration

Auch in Bezug auf die möglichst optimale Integration der verschiedenen in einer Aquaponikanlage gekoppelten Systeme besteht weiterer Forschungsbedarf. So wird darauf hingewiesen, dass bei nicht ausreichender Abstimmung der jeweiligen Produktionskapazitäten die Nährstoffe aus der Fischzuchtanlage teilweise nicht ausreichen, um den Bedarf an Nährstoffen für das Pflanzenwachstum vollständig zu decken (vgl. z.B. Waller et al. 2015). Ist die Hydroponikanlage zu groß dimensioniert, kann dies zwar zu einer sehr guten Wasserqualität innerhalb des Kreislaufs,

zugleich aber auch zu einem langsameren Pflanzenwachstum und insgesamt niedrigeren Erträgen führen (Buzby & Lin 2014). Im umgekehrten Fall kann es bei in zu klein dimensionierten Anlagen für die Pflanzenproduktion zur Akkumulation von Nährstoffen in der Kreislaufanlage kommen, die wiederum technologische Maßnahmen zur Reduktion der Nährstofffracht erforderlich machen. Bei sogenannten Durchflusssystemen kann es in diesem Fall zu einer übermäßigen Freisetzung von Nährstoffen kommen.

Eine ebenfalls im Zuge der verbesserten Integration zu behandelnde Frage ist der Umgang mit essenziellen Stoffen, deren Vorhandensein zwar für das eine Produktionssystem erforderlich ist, für das andere jedoch keine Vorteile und gegebenenfalls sogar Beeinträchtigungen bedeuten kann. Ein in diesem Zusammenhang zu nennendes Beispiel ist Kalium: Während Fische kein Kalium benötigen, ist für eine erfolgreiche Kultivierung bestimmter Pflanzen wie beispielsweise Tomaten eine ausreichende Versorgung mit Kalium erforderlich. Ein Mangel an Kalium kann daher zu einer Verschlechterung der Produktqualität führen (Graber & Junge 2009).

5.3.4. Behandlung von Krankheitserregern

Das Management von pathogenen Organismen Keimen innerhalb einer geschlossenen Kreislaufanlage stellt an sich schon einen anspruchsvollen Prozess dar (siehe auch Abschnitt 3.1.2). In einer Aquaponikanlage kommen hier noch die erforderliche Kontrolle von Pflanzenschädlingen und die Behandlung von Krankheiten hinzu. Über den Wasserkreislauf stehen beide Zuchtsysteme zudem in direkter Verbindung miteinander. Während es daher in einer reinen Hydroponikanlage möglich ist, eventuelle Rückstände von Pflanzenschutzmitteln aus dem Kreislauf zu entfernen, muss bei einem aquaponischen System sichergestellt werden, dass die Fische durch die Schädlingsbehandlung der Pflanzen nicht beeinträchtigt werden. Entsprechend wird es im Zuge des Ausbaus der integrierten Produktion in Aquaponiksystemen auch darauf ankommen, geeignete Pflanzenschutzmaßnahmen zu identifizieren, bei denen sichergestellt ist, dass diese die Fischgesundheit nicht nachteilig beeinflussen.

Als vorbeugende Maßnahme zum Pflanzenschutz wird daher auch gefordert, dass Aquaponiksysteme über eine physische Barriere gegenüber Insekten vor Krankheiten verfügen sollten. Außerdem sollte bereits bei der Planung und vor der Inbetriebnahme der Systeme ausreichend Raum für spezielle sanitäre Einrichtungen wie u.a. Hand- und Fußwaschbecken eingeplant werden. Als besonders wichtig wird eine frühzeitige, schnelle und korrekte Identifizierung der Schädlinge oder der Krankheit angesehen (Pilinszky et al. 2015).

5.3.5. Roadmap und Relevanz für ein Engagement der DBU

Tabelle 5-2: Roadmap des prioritären Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Hinblick auf die Futtermittelbereitstellung

Zeithorizont	Forschungs- und Entwicklungsansatz	Relevanz für ein Engagement der DBU
Kurzfristig (1-3 Jahre)	Optimierungsansätze zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Produktionsmaßstab	X
	Optimierung der Systemintegration unter Beachtung von Tierschutzaspekten	X
Mittelfristig (3-5 Jahre)	Systematische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquaponiksysteme, inklusive der Ableitung von zentralen, technologiespezifischen Leistungsindikatoren	X
Langfristig (5-10 Jahre)	Unterschiedliche, kommerziell betriebene Aquakultursysteme innerhalb Deutschlands können auf systematischer Basis unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten vergleichend geprüft und bewertet werden	X

Quelle: Eigene Darstellung

Aus Tabelle 5-2 geht hervor, dass die Optimierungsansätze zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit einer integrierten Produktion im Produktionsmaßstab sowie die Optimierung der Systemintegration unter Beachtung von Tierschutzaspekten bereits kurzfristig angegangen werden können. Die zugehörigen methodischen bzw. technischen Grundlagen liegen aus bereits abgeschlossenen F&E-Projekten bereits vor und bedürfen nun einer Evaluation im Zuge der Hochskalierung der Ergebnisse auf Anlagen im Produktionsmaßstab. Die beiden genannten F&E-Ansätze werden aufgrund des bereits starken Praxisbezugs und der wachsenden Relevanz für kleine und mittelständische Unternehmen als relevant für ein mögliches Engagement der DBU eingeschätzt. Darüber hinaus besteht der mittelfristige Ansatz, innerhalb der nächsten drei bis fünf Jahre die systematische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquaponiksysteme durchzuführen. Dieser wird in Hinblick auf die Auswahl künftig zu priorisierender Einzelvorhaben im Bereich der integrierten Produktion als besonders relevant erachtet und sollte daher ebenfalls bei künftigen Förderschwerpunkten der DBU berücksichtigt werden. Der systematische Vergleich unterschiedlicher kommerziell betriebener Aquaponiksysteme stellt schließlich einen langfristig orientierten F&E-Ansatz dar, für den erst in 5 bis 10 Jahren mit Ergebnissen zu rechnen ist. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass hierfür zunächst ein weiterer Ausbau von Anlagen zur integrierten Produktion von Fischen und Pflanzen erforderlich ist. Auch bei diesem F&E-Ansatz wird von einer hohen Relevanz für KMU ausgegangen und folglich wird ein Engagement seitens der DBU empfohlen.

6. Zusammenfassung und übergreifende Erkenntnisse

Ziel der vorliegenden Studie war es, auf der Grundlage der Datenbestände und Resultate des vom Öko-Institut e.V. durchgeführten „Bewertungsprojekts“ (Möller et al. 2015) auf übergeordneter Ebene konkrete Empfehlungen in Hinblick auf den zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für eine möglichst nachhaltige Aquakultur abzuleiten. Mittels einer synoptischen Darstellung wurden dabei die Ergebnisse aus den Nachhaltigkeitsbewertungen der einzelnen F&E-Projekte einer übergreifenden Auswertung unterzogen, in eine Bestandsaufnahme der sonstigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum Thema eingebettet und entsprechende Rückschlüsse gezogen.

Ausgangspunkt dieser übergreifenden Auswertung stellt die Erkenntnis dar, dass es angesichts des für den Aquakultursektor prognostizierten Wachstums zukünftig in erster Linie darauf ankommen wird,

- die Energie- und Ressourcenproduktivität der zugehörigen Prozesskette deutlich zu steigern,
- Futtermittelquellen jenseits von Fischmehl und Fischöl aus der Wildfischerei zu erschließen sowie
- Vorhandene Nährstoff- und Schadstoffeinträge in Gewässer weiter zu minimieren.

Folglich fokussieren sich die Empfehlungen der vorliegenden Studie in erster Linie auf die folgenden Ansatzpunkte für eine nachhaltigere Aquakultur, mit denen die zuvor genannten Herausforderungen adressiert werden können:

- Prozessoptimierungen bei geschlossenen Aquakultur-Kreislaufanlagen (RAS);
- nachhaltige Bereitstellung von Futtermitteln;
- Ausbau und Optimierung einer integrierten Produktion.

In Hinblick auf die **Prozessoptimierung bei geschlossenen Aquakultur-Kreislaufanlagen** bildet die effiziente Entkeimung und Aufbereitung des Kreislaufwassers ein wichtiges Element des kurzfristigen F&E-Bedarfs, wobei insbesondere eine Hochskalierung der auf dem Labor- bzw. Technikumsmaßstab erzielten Prozessverbesserungen auf die Ebene kommerzieller Anlagen erforderlich ist. Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt für eine nachhaltigere Aquakultur stellt auch das Monitoring und bessere Management wesentlicher tierschutzbezogener Prozessparameter in geschlossenen Aquakultur-Kreislaufanlagen dar und sollte ebenfalls kurzfristig angegangen werden. Die Ableitung von Technologieoptionen, die unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten für Kreislaufanlagen zu favorisieren sind, stellt ein weiteres prioritäres, allerdings erst mittelfristig zu verwirklichendes Ziel künftiger F&E-Arbeiten dar. Die zugehörigen Analysen sollten grundsätzlich mit einer systemischen Sichtweise erfolgen: Um dem Lebenszyklusgedanken vollständig Rechnung zu tragen, ist es erforderlich, auch die der Fischzucht nachgelagerten Prozesse der Fischverarbeitung, des Handels (z.B. Transport und Lagerung) sowie die bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern verorteten Prozesse zu berücksichtigen. Mittelfristig sollte es ferner das Ziel weiterer Forschungsaktivitäten sein, ein umfassendes Stoffstrommodell der Bereitstellung, Prozessierung und Nachfrage von Fisch und Fischprodukten zu entwickeln. Zudem wird zunehmend der Bedarf bestehen, die Nachhaltigkeitsaspekte und deren Optimierung mittels genau definierter Leistungsindikatoren zu messen, welche sich beispielsweise auf den Energiebedarf der Anlage, den Bedarf an Frischwasser oder die Futtermittelverwertung beziehen können. Auf dieser Grundlage können dann jeweils die besten verfügbaren Technologieoptionen

für die einzelnen Komponenten von Aquakultur-Kreislaufanlagen ermittelt und in einem weiteren Schritt schließlich einem Leistungsvergleich (Benchmarking) unterzogen werden.

Um eine **nachhaltige Bereitstellung von Futtermitteln** zu befördern, sollte das übergeordnete Ziel darin bestehen, Fischmehl und Fischöl sparsamer zu nutzen sowie nach und nach durch Erschließung alternativer Rohstoffquellen so weit wie möglich zu substituieren. In diesem Zusammenhang ist Forschung und Entwicklung zunächst in Hinblick auf die Optimierung der futtermittelbezogenen Prozessparameter erforderlich, um den Futtermittelbedarf so weit wie möglich zu reduzieren. Dies kann, ausgehend von den bereits vorliegenden F&E-Ergebnissen, kurzfristig angegangen und abgeschlossen werden. Gleiches gilt auch für den F&E-Ansatz zur Erhöhung des Anteils siliierter Fischnebenprodukte im Futtermittel, wodurch ein wesentlicher Beitrag durch die Verringerung des Bedarfs an Fischmehl und Fischöl aus Wildfischbeständen geleistet werden kann. Hier wird es insbesondere darauf ankommen, die bereits verfügbaren Siliertechniken einem möglichst großen Kreis von Akteuren, also vor allem auch kleinen und mittelständischen Fischverarbeitungsbetrieben, zur Verfügung zu stellen. Einen weiteren wichtigen Ansatzpunkt zur Substitution von Fischmehl und insbesondere Fischöl stellt die Ausweitung der Produktion von Mikroalgen dar, wobei in erster Linie die Energieeffizienz des Produktionsprozesses und die Ausbeute bei den hochwertigen Omega-3-Fettsäuren gesteigert werden muss. Dieser Ansatz wird jedoch aufgrund der Komplexität und der noch zu überwindenden Schwierigkeiten voraussichtlich erst nach drei bis fünf Jahren zu verwertbaren Ergebnissen führen. Einen eher langfristigen F&E-Ansatz stellt schließlich die Optimierung und Ausweitung der Zucht von Friedfischen dar, wodurch aufgrund der Lebensweise dieser Fische mittelbar ein wesentlicher Beitrag zur Senkung des spezifischen Bedarfs an Fischmehl und Fischöl erzielt werden kann.

Bei der **integrierten Produktion** besteht prioritärer F&E-Bedarf v.a. in Hinblick auf Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, um diese Art der Aquakultur-Prozessführung im Produktionsmaßstab konkurrenzfähig zu machen. Dies sollte auch Lösungsansätze umfassen für eine kontinuierliche Produktion unter verschiedenen geografischen und klimatischen Gegebenheiten, d.h. sowohl in kühlen, aber auch in subtropischen Klimazonen. Die zugehörigen Forschungsaktivitäten sollten kurzfristig angegangen und von einer Optimierung der Fisch- und Pflanzenwahl in Abhängigkeit des geografischen Bezugsrahmens sowie einer Klärung offener Fragen zur Systemintegration (z.B. optimale Dimensionierung der einzelnen Anlagenkomponenten) flankiert werden, wobei explizit auch Tierschutzaspekte mitzuberücksichtigen sind. Darüber hinaus besteht mittelfristig der Bedarf, eine systemische Evaluation der Nachhaltigkeitspotenziale verschiedener Aquaponiksysteme durchzuführen. Wie auch schon in Hinblick auf geschlossene Aquakultur-Kreislaufanlagen empfohlen, sollten auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen spezifische Leistungsindikatoren für integrierte Anlagen bzw. deren wichtigsten Komponenten definiert werden, um jeweils die besten verfügbaren Technologieoptionen zu identifizieren und schließlich ein Benchmarking zur kontinuierlichen Verbesserung der Anlagentechnik zu ermöglichen. Der systematische Vergleich unterschiedlicher, *kommerziell* betriebener Aquaponiksysteme stellt schließlich einen langfristig orientierten F&E-Ansatz dar, für den erst in fünf bis zehn Jahren mit Ergebnissen zu rechnen ist. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass hierfür zunächst ein weiterer Ausbau von Anlagen zur integrierten Produktion von Fischen und Pflanzen erforderlich ist.

Jenseits der zuvor beschriebenen technologie- und produktbezogenen Ergebnisse konnten im Zuge der vorliegenden Studie auch eine Reihe von **übergeordneten, vorrangig auf der Management- und Methodenebene angesiedelte Erkenntnisse und Empfehlungen** herausgearbeitet werden:

- Sowohl bei den geschlossenen Aquakultur-Kreislaufanlagen als auch bei der integrierten Produktion zeigte sich, dass eine Nachhaltigkeitsbewertung auf **systemischer Ebene**, d.h. unter Berücksichtigung aller relevanten Prozesse und Akteure entlang des gesamten Lebenszyklus (von der Fischzucht- und Verarbeitung über den Handel bis hin zu den Verbraucher/innen), die Grundlage für eine nachhaltigere Ausgestaltung der Aquakultur bildet. Eine systemische Betrachtung wird als unabdingbar betrachtet, um die wesentlichen „Stellschrauben“ für Optimierungen identifizieren und richtungssichere Ergebnisse generieren zu können. Als grundlegender methodischer Ansatz hierfür können Ökobilanzen auf der Grundlage der internationalen Normen DIN EN ISO 14040 / 14044 verwendet werden, die jedoch, je nach Untersuchungsgegenstand und Fragestellung, ggf. um weitere Parameter (z.B. Exposition von Stoffen auf lokaler Ebene, Tierschutzaspekte) ergänzt werden müssen.
- In Ergänzung zu diesen umfassenden Analysen werden – ebenfalls auf systemischer Ebene –im Zuge der (Weiter-) Entwicklung von Forschungsprogrammen und Nachhaltigkeitsstrategien im Aquakultursektor (z.B. DAFA-Strategie) orientierende Bilanzen im Vorfeld (**ex-ante Analysen**) empfohlen, um die wichtigsten Ansatzpunkte bzw. geeignete Schwerpunktsetzungen identifizieren zu können.
- Spiegelbildlich zu diesen orientierenden Untersuchungen sind im Rahmen eines iterativen Ansatzes zur Evaluierung der Wirksamkeit von Forschungsprogrammen und Nachhaltigkeitsstrategien auch Untersuchungen während der Laufzeit der Programme bzw. nach Abschluss von wichtigen Einzelprojekten (**ex-post Analysen**) erforderlich, um beispielsweise ein Monitoring der tatsächlich erzielten Umweltentlastungen nach erfolgreichem Hochskalieren vom Labor-/Technikumsmaßstab auf eine großtechnische Produktion quantifizieren zu können.
- Ferner besteht die Notwendigkeit **frühzeitiger, entwicklungsbegleitender Nachhaltigkeitsanalysen** während der Durchführung von F&E-Projekten, und zwar zu solchen Zeitpunkten während des F&E-Prozesses, bei denen grundlegende Entscheidungen in Hinblick auf die Auswahl von Materialien, Prozessen und Technologien getroffen werden müssen. Der Vorteil der frühzeitigen Evaluierung verschiedener Entwicklungsoptionen bereits während des Entwicklungsprozesses besteht darin, dass zu diesem Zeitpunkt die Einflussmöglichkeiten in Hinblick auf eine besonders nachhaltige Ausgestaltung besonders groß sind.
- Als methodische Basis für alle zuvor genannten Untersuchungen wäre es zudem erforderlich, eine Verständigung über grundlegende Modellierungsanforderungen für ökobilanzielle Analysen im Aquakultursektor herbeizuführen. Für andere Produktgruppen (z.B. Getränkekartons, Geflügelfleisch) liegen solche **Produktkategorie-Regeln** (engl. „Product Category Rules“, PCRs) bereits vor bzw. werden gegenwärtig erarbeitet und bilden in diesen Produktgruppen die Voraussetzung für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Studien. Für den Aquakultursektor wären für alle drei im Rahmen dieser Studie betrachteten Schwerpunkte (geschlossene Aquakultur-Kreislaufanlagen, Futtermittel sowie integrierte Produktion) entsprechende PCRs sinnvoll¹³. Falls ein Benchmarking mit Leistungsindikatoren angestrebt wird, wie in Kapiteln 3.4.2 und 5.3.1 beschrieben, wären Produktkategorie-Regeln sogar eine unabdingbare Voraussetzung für einen fairen und belastbaren Vergleich.

Für die Umsetzung der skizzierten Ansatzpunkte erweist sich als vorteilhaft, dass in Europa und insbesondere in Deutschland auf umfangreiche Expertise und Erfahrungen aus F&E-Projekten aufgebaut werden kann, die u.a. auf die Optimierung einer energie- und ressourcenschonenden

¹³ In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass für die Produktgruppe „Fisch“ im Rahmen des Product Environmental Footprint (PEF)-Prozesses der EU bereits auch ein Pilotprojekt für die Produktgruppe „Fisch“ gestartet ist, welches ebenfalls zu einer Definition von PCF führen könnte, siehe: http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pef_pilots.htm

Kreislauftechnologie, optimierte Futtermittelkonzepte sowie Ansätze zur integrierten Produktion ausgerichtet sind. Vor diesem Hintergrund wird es zukünftig v.a. darauf ankommen,

- ein „**Stärken der vorhandenen Stärken**“ zu erreichen, d.h. die im internationalen Vergleich in Deutschland erzielten komparativen Wettbewerbsvorteile auf technologischem Gebiet (z.B. besonders effiziente Prozesse, weitgehende Vermeidung von Emissionen) weiter auszubauen;
- auf dieser Grundlage verstärkt **Technologietransfer** zu betreiben und die Optimierung der Aquakultur-Prozesskette auch in Schwellen- und Entwicklungsländern aktiv zu befördern; nicht zuletzt vor dem Hintergrund, dass der weitaus überwiegende Teil des inländischen Bedarfs in diesen Ländern bereitgestellt wird;
- die **stärkere Vernetzung** der Einzelaktivitäten im Forschungs- und Entwicklungsbereich herbeizuführen und diese stärker auf eine Systemoptimierung der gesamten Aquakultur-Prozesskette auszurichten, was institutionell u.a. durch die Einrichtung eines nationalen Kompetenzzentrums (siehe hierzu auch die DAFA-Strategie) unterstützt werden kann, sowie
- eine **zielgruppengerechte Information** der Konsumentinnen und Konsumenten über die Nachhaltigkeitsaspekte der Aquakultur zu intensivieren, z.B. mittels vorhandener Aquakultur-Labels (z.B. ASC, Naturland), deren Kriterien ggf. um Anforderungskriterien zu erweitern sind, die sich auf der Basis systemischer Nachhaltigkeitsanalysen als besonders relevant herausgestellt haben.

Falls es gelingen sollte, wesentliche Elemente der zuvor beschriebenen Roadmap zu realisieren, bestehen beste Voraussetzungen, um mittels Aquakultur tatsächlich einen bedeutsamen und gleichsam nachhaltigen Beitrag zur Versorgung der Menschheit mit hochwertigen Proteinen leisten zu können.

Literaturverzeichnis

- Amirkolaie, A. K.; Shahkolaie, M. D.; Karimzadeh, S. & Khalesi, M. K. (2014). The potential of soya oil industry products as oil alternatives in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diet. *Aquaculture International* 22 (3), S. 1093–1103.
- ASC - Aquaculture Stewardship Council (2013). ASC Freshwater Trout Standard - Version 1.0, February 2013. Verfügbar unter http://www.asc-aqua.org/upload/ASC%20Freshwater%20Trout%20Standard_v1.0.pdf, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Attramadal, K. J.; Øie, G.; Størseth, T. R.; Alver, M. O.; Vadstein, O. & Olsen, Y. (2012). The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae. *Aquaculture* 330-333, S. 121–129.
- Avnimelech, Y. (2014). *Biofloc Technology - A Practical Guidebook* (3rd Edition). Louisiana, USA: The World Aquaculture Society.
- Bailey, D. S.; Rakocy, J. E.; Cole, W. M. & Shultz, K. (1997). *Economic Analysis Of A Commercial-Scale Aquaponic System for the Production of Tilapia and Lettuce*. University of the Virgin Islands, Agriculture Experiment Station.
- Ballagh, D. A.; Pankhurst, P. M. & Fielder, D. S. (2011). Embryonic development of mullet, *Argyrosomus japonicus*, and egg surface disinfection using ozone. *Aquaculture* 318 (3-4), S. 475–478.
- Bansemmer, M. S.; Forder, R.; Howarth, G. S.; Sutor, G. M.; Bowyer, J. & Stone, D. (2015). The effect of dietary soybean meal and soy protein concentrate on the intestinal mucus layer and development of subacute enteritis in Yellowtail Kingfish (*Seriola lalandi*) at suboptimal water temperature. *Aquaculture Nutrition* 21 (3), S. 300–310.
- Betancor, M. B.; Sprague, M.; Sayanova, O.; Usher, S.; Campbell, P. J.; Napier, J. A.; Caballero, M. J. & Tocher, D. R. (2015). Evaluation of a high-EPA oil from transgenic *Camelina sativa* in feeds for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): Effects on tissue fatty acid composition, histology and gene expression. *Aquaculture* 444, S. 1–12.
- Bowyer, J. N.; Qin, J. G.; Smullen, R. P. & Stone, D. (2012). Replacement of fish oil by poultry oil and canola oil in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) at optimal and suboptimal temperatures. *Aquaculture* 356-357, S. 211–222.
- BUND (2013). Broschüre "Aquakultur - Fisch für alle?" (BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Hrsg.). Verfügbar unter http://www.bund-sh.de/fileadmin/bundgruppen/bcmlsvsh/downloads/meeresschutz/flyer_aquakultur_web.pdf, zuletzt abgerufen am 15.09.2015.
- Buzby, K. M. & Lin, L.-S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering* 63, S. 39–44.
- Chambel, J.; Costa, R.; Gomes, M.; Mendes, S.; Baptista, T. & Pedrosa, R. (2014). Hydrogen peroxide, iodine solution and methylene solution highly enhance the hatching rate of freshwater ornamental fish species. *Aquaculture International* 22 (6), S. 1743–1751.
- Chauton, M. S.; Reitan, K. I.; Norsker, N. H.; Tveterås, R. & Kleivdal, H. T. (2015). A techno-economic analysis of industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA-rich raw material for aquafeed: Research challenges and possibilities. *Aquaculture* 436, S. 95–103.
- Crab, R.; Defoirdt, T.; Bossier, P. & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture* 356-357, S. 351–356.

- Danaher, J. J.; Shultz, R. C.; Rakocy, J. E. & Bailey, D. S. (2013). Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems. *Journal of the World Aquaculture Society* 44 (3), S. 374–383.
- Destatis - Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2014). Erzeugung in Aquakulturbetrieben (Land und Forstwirtschaft, Fischerei, Reihe 4.6, Fachserie 3). Verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Fischerei/Aquakulturbetriebe2030460137004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 04.09.2015.
- fair-fish (2014). Fischzucht: Problem oder Lösung? fish-facts_19. Verfügbar unter http://www.fair-fish.ch/files/pdf/wissen/fish-facts_19_web.pdf, zuletzt abgerufen am 22.09.2015.
- fair-fish (2015). Richtlinien fair-fish für die Fischzucht. Verfügbar unter <http://www.fair-fish.ch/files/pdf/wissen/fischzuchtrichtlinien-2015.pdf>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2009). Fish as feed inputs for aquaculture. Practices, sustainability and implications. Fisheries and Aquaculture Technical Paper (518). Verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i1140e.pdf>, zuletzt abgerufen am 16.09.2015.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014). The State of World Fisheries and Aquaculture 2014. Opportunities and challenges. Verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i3720e.pdf>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Globefish (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Hrsg.) (2015). Fishmeal and Fish Oil - March 2015. Verfügbar unter <http://www.globefish.org/ffff.html>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Good, C.; Davidson, J.; Welsh, C.; Snekvik, K. & Summerfelt, S. (2011). The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 44 (3), S. 97–102.
- Graber, A. & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246 (1-3), S. 147–156.
- Hagiwara, A.; Wullur, S.; Marcial, H. S.; Hirai, N. & Sakakura, Y. (2014). Euryhaline rotifer *Proales similis* as initial live food for rearing fish with small mouth. *Aquaculture* 432, S. 470–474.
- Hamlin, H. J.; Michaels, J. T.; Beaulaton, C. M.; Graham, W. F.; Dutt, W.; Steinbach, P.; Losordo, T. M.; Schrader, K. K. & Main, K. L. (2008). Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 38 (2), S. 79–92.
- Hawkyard, M.; Stuart, K.; Langdon, C. & Drawbridge, M. (2015). The enrichment of rotifers (*Brachionus plicatilis*) and *Artemia franciscana* with taurine liposomes and their subsequent effects on the larval development of California yellowtail (*Seriola lalandi*). *Aquaculture Nutrition*, S. n/a.
- Hussain, T.; Verma, A. K.; Tiwari, V. K.; Prakash, C.; Rathore, G.; Shete, A. P. & Saharan, N. (2015). Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. *Aquaculture International* 23 (1), S. 369–384.
- IFFO - The Marine Ingredients Organisation (2013). Is aquaculture growth putting pressure on feed fish stocks? And is the growth of aquaculture being restricted by finite supplies of fishmeal and fish? IFFO Positional Statement. Verfügbar unter http://www.iffonet/system/files/Is%20aquaculture%20growth%20putting%20pressure%20on%20feed%20fish%20stocks%20FINAL%20Feb%202013%20formatted_1.pdf, zuletzt abgerufen am 14.09.2015.

- IGB, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.) (o.J.a). Fischernahrung - Tomatenfisch. Verfügbar unter <http://www.tomatenfisch.igb-berlin.de/fischernaehrung.html>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- IGB, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.) (o.J.b). Fischmehl. Verfügbar unter <http://www.aquakulturinfo.de/index.php/fischoel.html>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- IGB, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.) (o.J.c). Peruanische Sardelle (*Engraulis rinens*). Verfügbar unter <http://www.aquakulturinfo.de/index.php/fischoel.html>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Johari, S. A.; Kalbassi, M. R.; Soltani, M. & Yu, I. J. (2015). Application of nanosilver-coated zeolite as water filter media for fungal disinfection of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) eggs. *Aquaculture International*.
- Lahnsteiner, F. & Kletzl, M. (2015). Iodophor disinfection of non-hardened *Lota lota*, *Salmo trutta*, and *Thymallus thymallus* eggs: Tolerance levels and iodine permeability. *Aquaculture* 436, S. 167–171.
- Love, D. C.; Fry, J. P.; Genello, L.; Hill, E. S.; Frederick, J. A.; Li, X.; Semmens, K. & Wang, H. (2014). An International Survey of Aquaponics Practitioners. *PLoS ONE* 9 (7), S. e102662.
- Love, D. C.; Fry, J. P.; Li, X.; Hill, E. S.; Genello, L.; Semmens, K. & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435, S. 67–74.
- Madagea, S.; Medis, W. & Sultanbawa, Y. (2015). Fish Silage as Replacement of Fishmeal in Red Tilapia Feeds. *Journal of Applied Aquaculture* 27 (2).
- Möller, M.; Antony, F.; Marquardt, M.; Moch, K. & Teufel, J. Dr. (2015). Förderinitiative Aquakultur: Wissenschaftliche Begleitung und Nachhaltigkeitsbewertung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen der DBU-Förderinitiative „Nachhaltige Aquakultur“. Freiburg: Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Naturland e.V. (2014). Naturland Richtlinien für die ökologische Aquakultur. Verfügbar unter http://www.naturland.de/fileadmin/MDB/documents/Richtlinien_deutsch/Naturland-Richtlinien_Aquakultur.pdf, zuletzt abgerufen am 16.09.2015.
- Niu, J.; Chen, X.; Zhang, Y.-Q.; Tian, L.-X.; Lin, H.-Z.; Wang, J.; Wang, Y. & Liu, Y.-J. (2015). The effect of different feeding rates on growth, feed efficiency and immunity of juvenile *Penaeus monodon*. *Aquaculture International*.
- Overturf, K.; Vallejo, R. L.; Palti, Y.; Barrows, F. T. & Parsons, J. E. (2012). Microarray analysis of differential utilization of plant-based diets by rainbow trout. *Aquaculture International* 20 (2), S. 213–232.
- Pilinszky, K.; Bittsanszky, A.; Gyulai, G. & Komives, T. (2015). Plant protection in aquaponic systems - Comment on Karthikeyan and Gopalakrishnan's (2014) "A novel report of phytopathogenic fungi *Gilbertella persicaria* infection on *Penaeus monodon*". *Aquaculture* 435, S. 275–276.
- Reiser, S.; Schroeder, J. P.; Wuertz, S.; Kloas, W. & Hanel, R. (2010). Histological and physiological alterations in juvenile turbot (*Psetta maxima*, L.) exposed to sublethal concentrations of ozone-produced oxidants in ozonated seawater. *Aquaculture* 307 (1-2), S. 157–164.
- Rupasinghe, J. W. & Kennedy, John O. S. (2010). Economic Benefits of Integrating a Hydroponic Lettuce System in to a Barramundi Fish Production System. *Aquaculture Economics & Management* 14 (2), S. 81–96.

- Schroeder, J. P.; Croot, P. L.; Dewitz, B. von; Waller, U. & Hanel, R. (2011). Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 45 (1), S. 35–41.
- Schulz, C.; Baer, A. & Bothstede, M. Einsatz von Bio-Ausputzgetreide in der Ernährung von Bio-Karpfen. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft. Christian-Albrechts-Universität, Institut für Tierzucht und Tierhaltung, D-Kiel, Fachbereich Aquakultur. Verfügbar unter <http://orgprints.org/25140/1/25140-09OE087-uni-kiel-schulz-2011-ernaehrung-biokarpfen.pdf>, zuletzt abgerufen am 15.09.2015.
- Shepherd, C. J. & Jackson, A. J. (2012). Global fishmeal and fish oil supply - inputs, outputs, and markets. Presentation at the 6th World Fisheries Congress, May 7-11, 2012, Edinburgh, UK. Verfügbar unter http://www.seafish.org/media/594329/wfc_shepherd_fishmealtrends.pdf, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.
- Statistisches Bundesamt. Erzeugung in Aquakulturbetrieben - Fachserie 2 Reihe 4.6.
- Summerfelt, S. T. (2003). Ozonation and UV irradiation—an introduction and examples of current applications. *Aquacultural Engineering* 28 (1-2), S. 21–36.
- Tokunaga, K.; Tamaru, C.; Ako, H. & Leung, P. (2015). Economics of Small-scale Commercial Aquaponics in Hawai'i. *Journal of the World Aquaculture Society* 46 (1), S. 20–32.
- Trang, Ngo Thuy Diem & Brix, H. (2014). Use of planted biofilters in integrated recirculating aquaculture-hydroponics systems in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquaculture Research* 45 (3), S. 460–469.
- Valverde, J. C.; Martínez-Llorens, S.; Vidal, A. T.; Jover, M.; Rodríguez, C.; Estefanell, J.; Gairín, J. I.; Domingues, P. M.; Rodríguez, C. J. & García, B. G. (2013). Amino acids composition and protein quality evaluation of marine species and meals for feed formulations in cephalopods. *Aquaculture International* 21 (2), S. 413–433.
- van Rijn, J.; Tal, Y. & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 34 (3), S. 364–376.
- Waller, U.; Buhmann, A. K.; Ernst, A.; Hanke, V.; Kulakowski, A.; Wecker, B.; Orellana, J. & Papenbrock, J. (2015). Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. *Aquaculture International*.
- Wedekind, H. (o. J.). Kreislauftechnologie: Was ist in Deutschland möglich? Verfügbar unter http://www.agintec.de/dateien/dokumente/Wedekind_KLA.pdf, zuletzt abgerufen am 16.09.2015.
- Wold, P.-A.; Holan, A. B.; Øie, G.; Attramadal, K.; Bakke, I.; Vadstein, O. & Leiknes, T. O. (2014). Effects of membrane filtration on bacterial number and microbial diversity in marine recirculating aquaculture system (RAS) for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) production. *Aquaculture* 422-423, S. 69–77.
- World Ocean Review (maribus gGmbH, Hrsg.) (o.J.). Umweltbewusste Aquakultur. Verfügbar unter <http://worldoceanreview.com/wor-2/aquakultur/umweltbewusste-aquakultur/>, zuletzt abgerufen am 17.09.2015.