

UNIVERSITÄT ROSTOCK



**Lokale marine Ressourcen zur Herstellung von
Alleinfuttermitteln für die Regenbogenforelle
(*Oncorhynchus mykiss*)**

Dissertationsschrift

vorgelegt von:

Gregor Thum

geboren am 06.03.1985 in Neubrandenburg

ROSTOCK 2017

UNIVERSITÄT ROSTOCK



Gutachter:

1. Prof. Dr. H. Schubert, Universität Rostock, Institut für Biowissenschaften, Aquatische Ökologie
2. Prof. Dr. P. Wolf, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Ernährungsphysiologie und Tierernährung
3. Prof. Dr. Charli Kruse, Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik

Datum der Einreichung: 02.06.2017

Datum der Verteidigung: 10.11.2017

”Fifty years ago, a single cod was large enough to feed a family of four or five. Today, it is barely enough for one.”

”Vor 50 Jahren war ein einziger Kabeljau groß genug eine vier- bis fünfköpfige Familie zu ernähren. Heutzutage ist es kaum genug für eine Person.”

Lord Perry of Walton, Mitglied des UK House of Lords (Masood, 1997)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
Zusammenfassung	3
Summary	5
1 Einleitung	7
2 Material und Methoden	15
2.1 Organismen	15
2.1.1 Die Rotalge <i>Delesseria sanguinea</i> (Hudson) J. V. Lamou- roux, 1813	15
2.1.2 Die Baltische Miesmuschel <i>Mytilus spp.</i>	15
2.1.3 Der Seeringelwurm <i>Hediste diversicolor</i> (O.F. Müller, 1776)	16
2.1.4 Der Seeringelwurm <i>Alitta virens</i> (M. Sars, 1835)	16
2.2 Probennahme und Beprobungsstandorte	16
2.3 Weender-Futtermittel-Analyse	19
2.3.1 Probenvorbereitung (Vortrocknung)	19
2.3.2 Trockensubstanz und Rohasche	19
2.3.3 Rohprotein	20
2.3.4 Rohfett	21
2.3.5 Rohfaser	22
2.3.6 Stickstofffreie Extrakte	22
2.4 Bestimmung der Aminosäuren mittels HPLC	23
2.5 Brennwerte	23
2.6 Futtermittelvorbereitung	24
2.7 Fütterungsexperiment	25
2.8 Schlachtkörperanalysen	26
2.9 Datenanalyse, statistische Methoden und Software	27
3 Ergebnisse	29
3.1 Analyse der Testorganismen im Jahresgang	29
3.1.1 Weender-Analyse	29
3.1.2 Aminosäureanalysen	30
3.2 Das Fütterungsexperiment	35
3.2.1 Abiotische Daten	35
3.2.2 Kontrolle der Testfuttermittel	36

3.2.3	Entwicklung der Versuchsfische	38
3.3	Schlachtdaten, Weender-Analyse und Aminosäuremuster der Forellen	43
3.3.1	Schlachtdaten	43
3.3.2	Gustatorische Testung	46
3.3.3	Weender- und Aminosäureanalysen	47
4	Diskussion	53
4.1	Futtermittelwertigkeit der Testorganismen	53
4.2	Testfuttermittelkontrolle	57
4.3	Auswertung des Fütterungsversuches	58
4.3.1	Entwicklung der Wasserwerte	59
4.3.2	Wachstum und Futterverwertung der Forellen	60
4.3.3	Morphologische Analysen	62
4.3.4	Gustatorische Testung	63
4.4	Zusammensetzung der Versuchsfische	64
5	Schlussfolgerung und Ausblick	68
	Literatur	70
	Abbildungsverzeichnis	80
	Tabellenverzeichnis	82
	Danksagung	84
	Selbstständigkeitserklärung	85

Abkürzungsverzeichnis

A	Algensupplementiertes Testfuttermittel
ADC	Apparent Digestibility Coefficient
AW	Algen- und Wurmsupplementiertes Testfuttermittel
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FCR	Futtermittelumsatzrate (Feed Conversion Ratio)
FIZ	Fisch-Informationzentrum e.V.
FM	Futtermittel
HPLC	Hochdruckflüssigkeitschromatografie
HSI	Hepatosomatischer Index
IFFO	Internationale Organisation für Fischöl und Fischmehl
IQA	Interquartilabstand
K	Kontrollfuttermittel
KI	Konditionsindex
LFA-MV	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
M	Muschelsupplementiertes Testfuttermittel
NH₄⁺	Ammoniumion
NH₃	Ammoniak
NfE	Stickstofffreie Extrakte
PCA	Hauptkomponentenanalyse
RA	Rohasche
RFa	Rohfaser
RF_e	Rohfett

RP	Rohprotein
TS	Trockensubstanz
W	Wurmsupplementiertes Testfuttermittel
wr	Wachstumsrate

Zusammenfassung

Die Nutzung der Meere durch den Menschen wird immer vielfältiger. Längst kann die Nachfrage nach Speisefisch und anderen Meeresfrüchten nicht mehr allein durch die traditionelle Fischerei gedeckt werden. Der Aufbau unterschiedlicher Aquakultursysteme prägt weltweit ganze Küstenregionen. Dadurch steigt auch der anthropogene Einfluss auf küstennahe, marine Ökosysteme und gefährdet diese zum Teil zunehmend. Eine landgestützte Aquakultur könnte helfen den Druck auf die Küsten zu verringern. Rezirkulierende Anlagen zur Produktion edler Speisefische, wie Forelle oder Zander, sind bereits im Betrieb. Dies ist zwar technisch aufwendig und entsprechend teurer, bietet aber die Möglichkeit zur Kontrolle und Regulation sämtlicher Produktionsbedingungen. Dies trägt zur Sicherung geregelter Produktionsintervalle sowie einer gleichbleibenden Produktqualität bei. Neben den direkten ökologischen Auswirkungen von nicht nachhaltig bewirtschafteten Aquakulturbetrieben ist die Nutzung der Ressource Fischmehl als wichtigste Proteinquelle ein weiteres Problem. Trotz erheblicher Fortschritte in der Futtermittelforschung und den guten Futtermittelverwertungseigenschaften von Fischen werden etwa 4 kg Fangfisch für die Produktion von 1 kg Kulturspeisefisch benötigt. Auf dieser Basis kann eine nachhaltige Aquakultur in Zeiten überfischter Meere nicht gründen. Daher wurde in dieser Arbeit bisher nicht genutzte Biomasse lokalen, marinen Ursprungs in Fischfuttermittel eingebracht, um zu testen, ob der Einsatz dieser Ressourcen die Nutzung von Fischmehl in der Fischfutterproduktion reduzieren kann.

Vier benthische Organismen, pflanzlichen wie tierischen Ursprungs, die in deutschen Küstengewässern weit verbreitet sind, wurden hinsichtlich ihrer Futtermittelwertigkeit untersucht (die Rotalge *Delesseria sanguinea*, die Baltische Miesmuschel *Mytilus spp.* sowie die Seeringelwurmspezies *Hediste diversicolor* und *Alitta virens*). Dabei standen der Rohproteingehalt und die Aminosäurezusammensetzung des Proteins der Organismen, sowie deren Verwertbarkeit als Futtermittelkomponente im Vordergrund, da diese in der Forellenernährung eine zentrale Rolle spielen. Zusätzlich wurden im Laufe dieser Arbeit vier Testfuttermittel auf Basis eines kommerziellen Hochleistungsfutters für Forellen hergestellt. Diese wurden so komponiert, dass die stofflichen Unterschiede der Testorganismen ausgeglichen wurden und die Futtermittel sowohl isokalorisch als auch isonitrogen waren. Dabei wurden bis zu 40 % der potentiellen neuen Ressourcen in die Testfuttermittel eingebracht. Als Versuchsfische dienten brackwasseradaptierte Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA-MV) aus Born. Die hergestellten Futtermittel wurden gleichzeitig in einer rezirkulierenden Anlage getestet, die mit Wasser aus

dem nahegelegenen Bodstedter Bodden gespeist wurde.

Das in den Testorganismen nachgewiesene Protein war zur Ernährung der Forellen geeignet. Der Proteingehalt in den Organismen schwankte leicht im Jahresverlauf, blieb aber hinsichtlich des Gehaltes wichtiger, essentieller Aminosäuren stabil. Im Fütterungsversuch mit den selbst hergestellten Testfuttermitteln zeigten alle Versuchsgruppen ein positives Wachstum. Vor allem das Wurmmehl zeigte ein hohes Potential zur qualitativen, als auch quantitativen Substitution von Fischmehl. Es könnte ohne weitere Veredelung verwendet werden. Auch Miesmuscheln konnten dem Futter ohne Leistungsdefizite hinzugefügt werden, allerdings war wegen des hohen Ascheanteils die Zugabe von Mehl aus ganzen Muscheln auf 10 % beschränkt. Ein Verfahren zur Trennung der Schale vom weichen proteinreichem Inneren könnte die Futtermittelwertigkeit der Muschel steigern. Trotz relativ hohen Proteingehaltes (etwa 20 % TS), gab es eine Leistungsminderung beim Einsatz bereits geringer Mengen von 10 % *Delesseria sanguinea* im Fischfutter. Allerdings wird angenommen, dass eine Proteinextraktion, wie sie auch bei anderen Pflanzen angewandt wird, enthalten antinutritive Stoffe ausschließt, so dass Algenprotein in der Aquakultur verwendet werden könnte. Generell konnte theoretisch, wie praktisch nachgewiesen werden, dass einige bisher weitestgehend ungenutzte marine Ressourcen zukünftig in der Futtermittelproduktion einsetzbar sind.

Summary

The use of the seas by humans is becoming more and more diverse. The development of different aquaculture systems characterizes entire coastal regions all over the world. This also increases the pressure on near-coastal marine ecosystems and endangers them in some cases. A land-based aquaculture can help to reduce the pressure on the coasts. Recirculating plants for the production of noble fish such as trout or pikeperch are already in operation. This is technically complex and correspondingly more expensive, but offers the possibility to control and regulate all production conditions. This helps to ensure controlled production intervals as well as consistent product quality. In addition to the direct ecological impact, another problem of aquaculture is the use of the resource fishmeal as most important protein source. About 4 kg of caught fish are required for the production of 1 kg of cultured fish. A sustainable aquaculture cannot be founded on this basis, especially not in times of over-exploited seas. Therefore, in this work attempts were made to add unutilized biomass of local marine origin into fish feed to reduce the dependence on fishmeal.

Hence, four organisms widely spread in German coastal waters were examined for their potential feed quality (Red Seaweed *Delesseria sanguinea*, Mussel *Mytilus spp.* as well as the ragworm species *Hediste diversicolor* and *Alitta virens*). This work was focused on the raw protein content and the amino acid composition of the protein of the tested organisms to estimate their potential as fish feed ingredient. Furthermore, four test feeds were designed and tested in comparison to a commercial high-performance feed for rainbow trout. Up to 40 % of the potential new resources were added into the test formulas. Brackish water adapted rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) of the LFA-MV (state research institute for agriculture and fishery Mecklenburg-Vorpommern) from the testing facility located at Born were chosen as testing fish. The feeds produced were tested simultaneously in a recirculating experimental installation running on water from the nearby Bodstedter Bodden.

The protein detected in the test organisms was evaluated as suitable for inclusion in trout feed. The protein content of the tested organisms fluctuated slightly within the annual cycle. In the feeding experiment all experimental groups showed positive growth. Especially the ragworm meal showed a high potential for the qualitative as well as quantitative substitution of fish meal. It could be used without further refinement. Mussels were also added to the feed without performance deficiencies. However, because of the high ash content, the addition potential was limited to 10 %. A method of separating the shell from the soft protein rich interior could in-

crease the value of the mussel as a potential fish feed ingredient. Despite a relatively high protein content (about 20 % TS), there was a reduction in the use of already small amounts of 10 % *Delesseria sanguinea* in fish feed. However, it is believed that protein extraction, as also applied for other plants, could exclude antinutritive substances and thus the algae protein could be used in aquaculture.

1 Einleitung

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch die Ressourcen der Meere, und die Eingriffe werden immer vielfältiger. Allgemein bekannt ist die Gewinnung von Bodenschätzen, wie Erdöl und Erdgas. Zukünftig wird auch der Abbau von Manganknollen in der Tiefsee angestrebt. Traditionelle Nutzungsformen wie Fischfang oder Salzgewinnung durch Verdunstung dienen bis heute der Gewinnung und Konservierung von Nahrungsmitteln. Als eine der ältesten Nutzungsformen hat sich der Fischfangsektor im letzten Jahrhundert dramatisch verändert. Eine Kombination aus wachsender Weltbevölkerung und technischem Fortschritt machte aus den kleinen Holzbooten der Fischer, mit denen sie küstennah von Hand fischten, große stählerne Fangtrawler und industrielle Verarbeitungsschiffe, die unter Umständen Wochen auf See sind. Echolot und Schleppnetze mit Öffnungen von bis zu 80×120 m sorgen dafür, dass ganze Schwärme auf einmal gefangen werden können. Darüber hinaus fangen die Langleinen mancher Hochseefischer heute auch in Tiefen von bis zu 2500 m.

Die meisten marinen Speisefischarten sind Raubfische (z.B. Kabeljau: *Gadus morhua*, Seelachs: *Pollachius virens*, Seeteufel: *Lophius piscatorius* oder Scholle: *Pleuronectes platessa*). Einer Studie zufolge wurde Biomasse der Raubfischbestände weltweit von 1910 (100 %) an bis 2010 (40 %) um etwa 60 % reduziert (Christensen *et al.*, 2014). Der größte Einbruch erfolgte zwischen 1970 (90 %) und 1990 (50 %). Seit 1970 steigt auch der betriebene Aufwand im Fischfang kontinuierlich (Anticamara *et al.*, 2011), womit den schwindenden Beständen Rechnung getragen wird. Zwar gibt es lokale Bestandserholungen (Lotze *et al.*, 2011; Worm *et al.*, 2009), aber bis heute setzt sich diese allgemeine Bestandsreduktion, global betrachtet, vermutlich fort. Die gefangenen Speisefische sind nicht selten Nahrung für Spitzenpredatoren oder zum Teil sogar selbst Spitzenpredatoren in den Nahrungsnetzen ihrer jeweiligen Biozöosen. Eine Veränderung des trophischen Gefüges ist bei zu hoher Entnahme entsprechender Spitzenräuber bzw. ihren wichtigsten Nahrungsquellen unausweichlich. Der resultierende Effekt wird in der Literatur als „fishing down marine food webs“ bezeichnet (Pauly *et al.*, 1998). Da bevorzugt möglichst große Individuen einer Zielart gefangen werden, schrumpft die durchschnittliche Größe der verbliebenen Tiere einer Population. Die verringerte Abundanz und Größe der Fische verringert zum einen den Jagderfolg ihrer Räuber, so dass diese verhungern und zum anderen sinkt der Prädationsdruck auf Beutepopulationen, so dass die Abundanz von Beutearten zunimmt (siehe Abbildung 1). Beide Effekte führen zu einer Reduzierung der Diversität und der selbstregulatorischen Eigenschaften der Systeme, was ihre Stabilität verringert. Somit ist die gegenwärtige Fischereipraxis auf

den Weltmeeren auch mit schuldig an Ereignissen, wie zum Beispiel dem massenhaften Auftreten von Quallen (Pauly *et al.*, 2008).

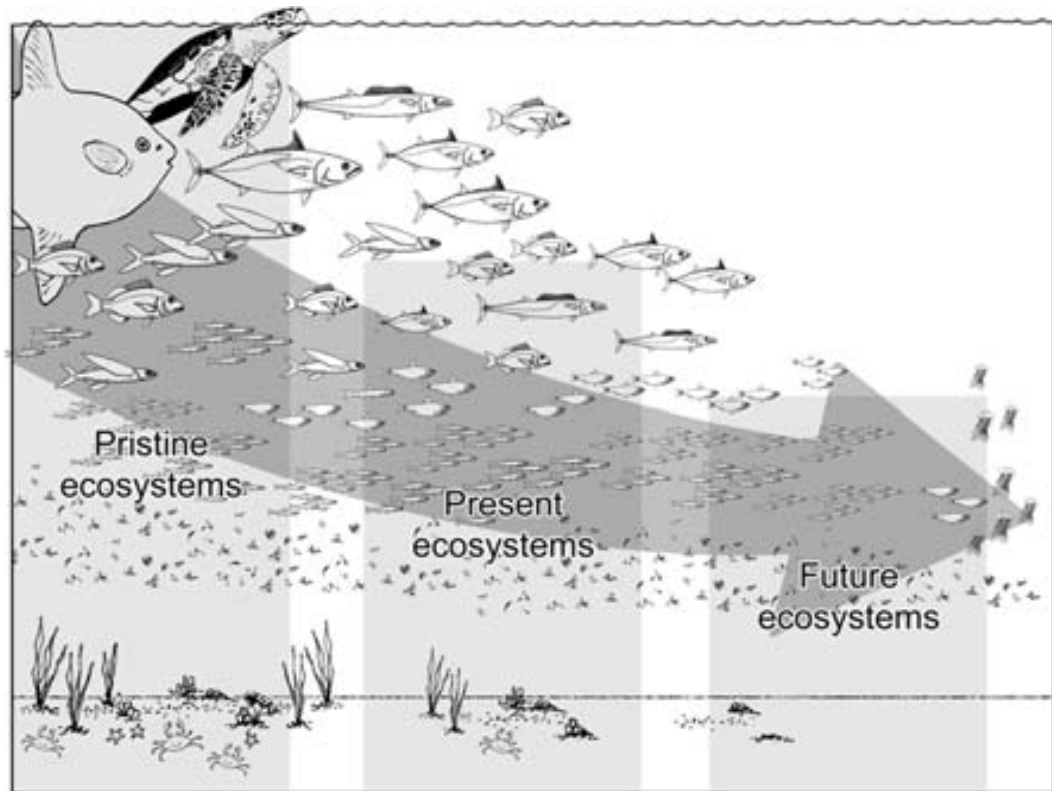


Abbildung 1: Illustration zu „fishing down marine food webs“; Entlang des Pfeiles wird die Entwicklung mariner Ökosysteme von der Vergangenheit über die Gegenwart bis hin zu einer möglichen Zukunft dargestellt.

Der gestiegene Fangaufwand, bei gleichzeitig steigender Nachfrage nach Fischprotein, führte in vielen Ländern zu einer Intensivierung der marinen Aquakultur. Am Häufigsten werden dabei zuvor erbrütete Fische in großen schwimmenden Netzkäfigen vor der Küste gemästet (z.B. Salmonidenzuchten vor den Küsten Chiles und Norwegens mit intensiven Besatzdichten von bis zu $40 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$). Ähnlich wie bei der industriellen Schweinemast steht dabei häufig nicht das Tierwohl im Vordergrund, sondern die Gewinnmaximierung des Unternehmens. Nur stehen diese Anlagen durch den Durchstrom des Wassers im direkten Kontakt zu ihrer Umwelt. Sensible Benthosgemeinschaften, wie Seegraswiesen in der Umgebung solcher Käfige, werden durch den hohen Eintrag partikulären, organischen Materials gestört (Riera *et al.*, 2015). Der prophylaktische, als auch der therapeutische Einsatz von Antibiotika begünstigt die Bildung antibiotikaresistenter Gene der Bakterien in den Eingeweiden der Fische (Muziasari *et al.*, 2017). Nach der Ausscheidung besteht somit die Gefahr, dass diese Gene durch horizontalen Gentransfer an Krankheitserreger weitergegeben werden. Landgestützte, rezirkulierende Zuchtanlagen können

helfen die ökologischen Auswirkungen der Aquakultur zu minimieren (Besatz bis zu $100 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ möglich), denn ihre Prozessabwässer können vor der Rückleitung in die Meere wiederaufbereitet werden.

Unabhängig von der Art der Zuchtanlage müssen die Fische gefüttert werden. Dies geschieht heutzutage hauptsächlich mit Futtermitteln auf Fischmehlbasis. Fischmehl ist sehr gut zur Fischzucht geeignet, da seine Zusammensetzung der natürlichen Nahrung vieler Speisefische ähnelt, ist aber eine teure Ressource. Eine Tonne kostete im 4. Quartal 2016 durchschnittlich 1280 \$ (Weltbankstatistik). Darüber hinaus wurde bereits gezeigt, dass Fischmehl in seiner Zusammensetzung je nach verarbeiteter Spezies variiert und dies durchaus den Fütterungserfolg beeinflussen kann (Anderson *et al.*, 1995). Fischmehl war lange Zeit ein Nebenprodukt der Fischereiindustrie, das vornehmlich aus Schlachtabfällen gewonnen wurde, nachdem diesen meist noch das Fischöl ausgepresst wurde. Der Presskuchen wurde anschließend getrocknet und gemahlen (Hardy und Tacon, 2002). Anfänglich nur auf dem Acker als Dünger verstreut, fand es in den 50er und 60er Jahren aufgrund seiner guten Verdaulichkeit schnell den Weg in die Futtermittelproduktion für Broiler und Schweine. Laut FAO (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen) und IFFO (Internationale Organisation für Fischöl und Fischmehl) war der Aquakultursektor 2012 mit 1,7 Millionen Tonnen der weltweit größte Abnehmer für Fischmehl und ist dies bis heute geblieben. Nach der Garnelenproduktion steht die Salmonidenzucht als Verbraucher an zweiter Stelle. Diese Nachfrage ist allein durch Schlachtabfälle nicht zu decken. Kleine Fischarten wie die peruanische Sardelle (*Engraulis ringens*) oder Sprotten (*Sprattus sprattus*) werden nun gezielt für die Fischmehlproduktion gefangen und als Ganzes verarbeitet (Shepherd und Jackson, 2013). Selbst bei einer Futtermittelumsatzrate (Feed Conversion Ratio) von 1 werden aber immer noch etwa 4 kg Fangfisch zur Produktion von 1 kg Kulturfisch benötigt. Sprotten und Sardellen könnten auch direkt der menschlichen Ernährung dienen. Damit tritt die Aquakultur nun zum Einen in direkte Nahrungskonkurrenz zum Menschen und zum Anderen besteht die Gefahr, dass sie zusätzlich mit den dezimierten Raubfischbeständen um die Nahrungsfische konkurriert, was die „Abwärtsspirale“ der Degradation der marinen Ökosysteme beschleunigen würde. Dennoch ist auch 2014 die weltweite Nachfrage nach Fisch und Meeresfrüchten gestiegen (Keller und Kess, 2015). Laut Hochrechnungen der FAO wurden 2014 144,6 Millionen Tonnen verbraucht. Somit erreichte der Pro-Kopf-Verbrauch mit 20 kg pro Jahr einen neuen Höchststand. Im selben Jahr wurde auch erstmalig ein höherer Pro-Kopf-Verbrauch aus Aquakultur (10,3 kg) als aus Wildfängen (9,7 kg) geschätzt (FAO, 2014). Die Auseinandersetzung mit der eige-

nen Ernährung und der Wunsch nach natürlichen und gesundheitlich vorteilhaften Nahrungsmitteln macht Fisch auch für viele Deutsche zu einem attraktiven Lebensmittel. Entgegen des weltweiten Trendes war der Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland zuletzt leicht rückläufig und lag 2014 bei 14 kg pro Jahr. 11,6 % stammten aus eigener Erzeugung/Anlandung, der weitaus größere Teil von 88,4 % wurde importiert. Zwei Drittel aller Erzeugnisse waren auf Meeresfische zurückzuführen. In der Rangfolge der nachgefragtesten Speisefische in Deutschland standen laut Fisch-Informationszentrum e.V. (FIZ) im Jahr 2015 die Salmoniden Lachs (*Salmo salar*) auf Platz 1 und Forelle auf Platz 5 mit jeweils 20,5 % bzw. 6,2 % Marktanteil. Salmoniden sind auf Grund ihres Wohlgeschmackes besonders gefragt. Allerdings ist bereits nachgewiesen, dass Wachstum und auch Produktqualität von der Wasserqualität sowie der Zusammensetzung des gewählten Futtermittels und dem Fütterungsregime beeinflusst wird (Faergemand *et al.*, 1995; Haard, 1992). Neben der Wasserqualität ist ein ausgewogenes und artgerechtes Futter also ein wichtiger Schlüssel zu einer erfolgreichen Aquakultur.

Auch in Deutschland wurde das Potential einer stetig wachsenden Aquakulturbranche erkannt. Allerdings werden sowohl die Deutsche Nordseeküste als auch die Ostseeküste bereits stark touristisch genutzt, was dem Aufbau einer klassischen industriellen „off shore“ Aquakultur mit ihren bekannten Problemen interessenbedingt entgegensteht. Daher wurden in Mecklenburg-Vorpommern gezielt nachhaltige „off shore“ Konzepte (z.B. Baltic IMTA, Universität Rostock) erforscht und die Entwicklung landgestützter Zuchtanlagen vorangetrieben (Standorte Born oder Hohen Wangelin, LFA-MV). Die Aufzucht von Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) ist in Deutschland bereits etabliert, findet allerdings bisher vornehmlich in Süßwasserteichen statt (Schäfer und Würtz, 2016). Auf Grund des hohen Sauerstoffbedarfes und entsprechend benötigtem Wasseraustausch ist die Aufzucht in Teichen meist auf einen Besatz von $25 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ limitiert. So wurden 2014 etwa 10000 Tonnen produziert. Ursprünglich stammte die Regenbogenforelle von der Nordamerikanischen Pazifikküste und ist ein räuberischer anadromer Wanderfisch. Das heißt sie kommt im Meereswasser vor, kehrt aber zur Eiablage stets in das Heimatgewässer (Fluss des Schlupfs) zurück (Gall und Crabdell, 1992). Sie ist also zur Aufzucht unter marinen oder Brackwasserbedingungen bestens geeignet.

Üblicherweise wird in der Aquakultur heutzutage industriell gefertigtes, extrudiertes und pelletiertes Trockenfutter verwendet. Abbildung 2 veranschaulicht diese Verfahren schematisch. Im Extruder werden die lockeren Zutaten gepresst und erhitzt. Die Zusammensetzung und Beschaffenheit des Extrudates kann von denen der Ausgangstoffe abweichen und damit die Verdaulichkeit von Proteinen und die

Verfügbarkeit von Aminosäuren, in Abhängigkeit vom genau angewendeten Verfahren beeinflussen (vgl. (Maurya und Said, 2014; Opstvedt *et al.*, 2003)). Diese Form der Futtermittelherstellung wurde am Anfang der 80er Jahre entwickelt und wird bis heute optimiert.

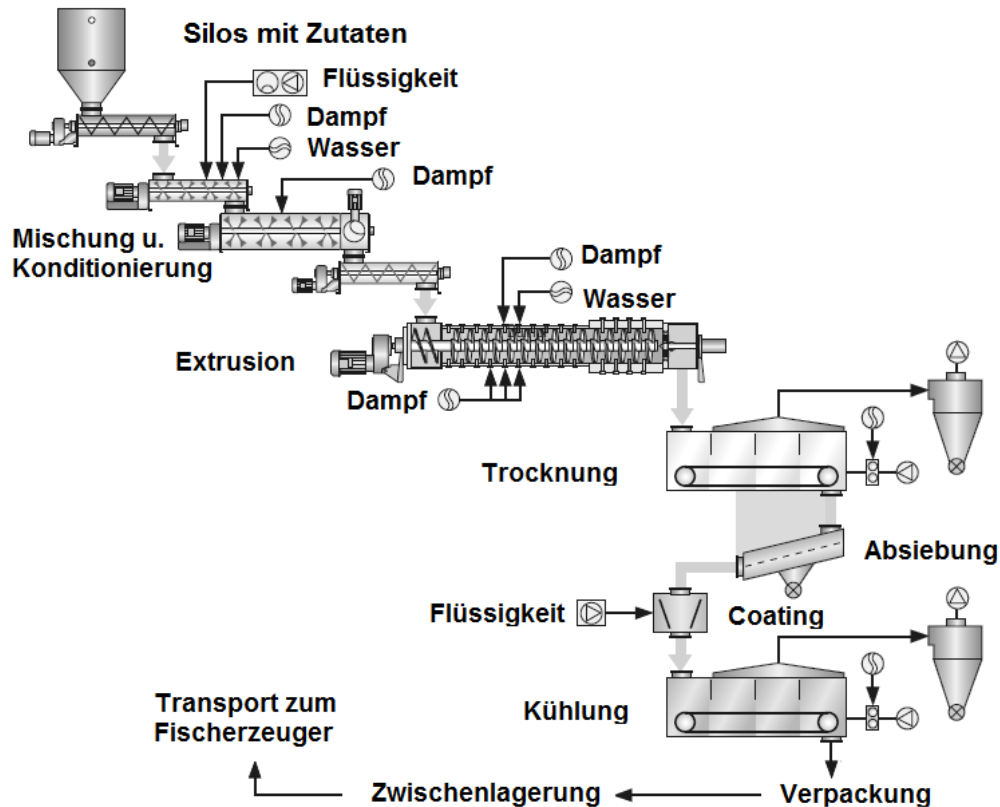


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer modernen Futtermittelproduktion für Speisefische, verändert nach einer Vorlage der Amandus Kahl GmbH & Co. KG

Da es sich um Trockenfuttermittel handelt, sind diese in Säcke verpackt, ohne Probleme zu transportieren und auch begrenzt lagerfähig. Eine unsachgemäße Lagerung kann zur Bildung von Schimmel führen, was das Futter durch die Freisetzung von Mykotoxinen unbrauchbar macht (Hooft *et al.*, 2011). Die Problematik der Verwendung von Fischmehl im Fischfutter wurde bereits angesprochen. Gerade Räuber wie die Forelle sind aber auf proteinreiches und qualitativ hochwertiges Futter für ein gesundes Wachstum angewiesen. Im Gegensatz zum Karpfen benötigen Regenbogenforellen einen höheren Anteil an verdaulichem Protein von mindestens 38 % der Trockenmasse (NRC, 2012), Jungfische benötigen sogar 50 % (NRC, 1993). Doch nicht allein die Proteinmenge ist entscheidend. Es ist allgemein bekannt, dass äquivalent zur Nährstoffversorgung der Pflanzen (Liebig'sches Minimumgesetz), die limitierteste essentielle Aminosäure über den Erfolg der Proteinsynthese bei Nutztieren bestimmt (Häffner *et al.*, 1998). Auch benötigt die Forelle mit

17,6 MJ \times kg⁻¹ Trockenmasse eine um ein Drittel höhere Energiedichte im Futter als der Karpfen. So wurden in den letzten Jahrzehnten viele Versuche unternommen, die Abhängigkeit der Aquakultur vom Fischmehl zu mindern. Dabei lag der Fokus auf einer Substituierung durch pflanzliche Komponenten, aus beispielsweise den Früchten von Soja oder Canola bzw. deren Proteinkonzentraten (Collins *et al.*, 2012; Oliva-Teles *et al.*, 1994; Thiessen *et al.*, 2004). Canola ist eine spezielle Rapsorte, in der der Gehalt von Erucasäure minimiert ist. Diese einfach ungesättigte Fettsäure (C 22 : 1, ω 9) führte in Tierversuchen zu Wachstumsstörungen und Herzmuskelschäden (Knutsen *et al.*, 2016). Vornehmlich wird der Presskuchen nach der Ölgewinnung zur Futtermittelproduktion verwendet (Sommer, 2017). Während Raps ein Produkt lokaler Herkunft ist, importierte die deutsche Futtermittelindustrie bereits 2011 etwa 3,2 Millionen Tonnen Sojabohnen sowie 3,4 Millionen Tonnen Sojaschrot (Deutscher Bauernverband). Es droht also eine entsprechende Importabhängigkeit bei Futtermitteln auf Sojabasis. Zudem stammt das importierte Soja vornehmlich aus Südamerika, wo es auf gerodeten Regenwaldflächen angebaut wird (Oliveira und Hecht, 2016). Die vorrangig kommerzielle Erzeugungsweise des Sojas hat bereits entsprechende Folgen. In Abhängigkeit der Breite eines Puffergürtels zwischen Anbaufläche und Fluss wurden in vielen Flüssen bereits persistierende Chlorkohlenwasserstoffverbindungen nachgewiesen, welche toxisch auf aquatische Invertebraten wirken (Hunt *et al.*, 2016). Außerdem wurde bereits gezeigt, dass Sojabohnen Proteaseinhibitoren enthalten, welche die Verdaulichkeit von Proteinen vermindert (Krogdahl *et al.*, 1994). Es ist davon auszugehen, dass auch andere pflanzenbasierte Proteinquellen diese oder andere antinutritiven Substanzen enthalten, wie z.B. die Lupine *Lupinus luteus* (Serrano *et al.*, 2011). Da es sich bei natürlichen Proteasehemmern stets um Polypeptide handelt (Kim *et al.*, 2009), ist ebenso davon auszugehen, dass sie auch in den Proteinkonzentraten, trotz Prozessierung wenigstens teilweise erhalten bleiben können. In anderen Studien wurde versucht, Proteinkonzentrate aus Getreide wie Reis oder gar Kartoffeln für die Futtermittelherstellung zu gewinnen (Palmegiano *et al.*, 2006; Tusche *et al.*, 2012, 2013). Auch Kartoffeln können in Deutschland regional erzeugt werden. In anderen Futtermitteln sollten die Aufnahmeleistungen bestimmter Nährstoffe durch zugesetzte Enzyme erhöht werden (Dalsgaard *et al.*, 2012; Drew *et al.*, 2005). Letztlich aber werden alle bisher vorgestellten Pflanzen terrestrisch angebaut und haben auch eine direkte Bedeutung für die menschliche Ernährung. Bei einer Expansion der Aquakultur müsste also zusätzliche Anbaufläche für die Futterpflanzen bereitgestellt werden. Daher wurde versucht, Proteinquellen jenseits der Landwirtschaft zu finden. Einen interessanten Ansatz verfolgten beispielsweise Alriksson *et al.* (2014), die versuch-

ten Reste der Holzindustrie (Faserschlamm) mikrobiell umzusetzen. Die Biomasse der gewachsenen Mikroorganismen ist je nach verwendeter Art reich an Protein, das in seiner Zusammensetzung Fischmehl ähnelt und in Fütterungsversuchen mit Tilapien (*Tilapia sp.*) gute Ergebnisse erzielte. Auch im Meer wurde bereits nach potentiellen Ressourcen gesucht. So wurden bereits einige Mehle von Braunalgen durch Yone *et al.* (1986) oder Dantagnan *et al.* (2009) mit positiver Wirkung auf die Retention von mehrfach ungesättigten Fettsäuren (PUFAs) getestet. Yildirim *et al.* (2009) testete zwei Grünalgenspezies, welche bereits bei einer Supplementierung von 10 % zu messbaren Wachstumsdefiziten führte. Die Rotalge *Porphyra dioica* wurde ebenfalls bereits als Additiv zur Forellennahrung getestet (Soler-Vila *et al.*, 2009). Auch hier wurde von einer Supplementierung über 10 % abgeraten, da höhere Gaben zu einem signifikant verringertem Wachstum und einer verkleinerten Leber führte. Die vorliegende Arbeit setzt die Suche nach potentiellen Futtermittelzutatengruppen fort. Zur weiteren Verbesserung der Nachhaltigkeit zukünftiger Aquakulturanlagen in Deutschland, ob nun auf See oder an Land, wurden alternative Futtermittelzutaten getestet, die lokal erzeugt oder gewonnen werden können und für die es bisher keine industrielle Verwendung gibt. Bei Erfolg könnten die verwendeten Zutaten helfen, die Abhängigkeit von Fischmehl als auch die drohende Abhängigkeit von Sojaimporten zu minimieren. Als potentielle Zutaten wurden zunächst die Rotalge *Delesseria sanguinea* und die Baltische Miesmuschel *Mytilus spp.* untersucht. Diese Arten wurden im Pilotprojekt Baltic IMTA (IMTA: Integrierte Multitrophische Aquakultur) bereits zusammen kultiviert. Daher war es naheliegend, nicht absetzbare Produktionsreste (zu kleine Muscheln mit einer Schalenlänge unter 5 cm oder unverkaufte Algen) wieder in das Futtermittel für die Fische zu integrieren. Des Weiteren wurden die in deutschen Küstengewässern verbreiteten Seeringelwurmspezies *Hediste diversicolor* und *Alitta virens* ausgewählt. Alle Organismen wurden hinsichtlich folgender Hypothesen untersucht.

Hypothesen:

Hypothese 1 *Bisher ungenutzte marine Ressourcen können in Alleinfuttermitteln für Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) eingesetzt werden und so die Abhängigkeit von Fischmehl reduzieren.*

Hypothese 2 *Die Testorganismen entstammen unterschiedlichen Abteilungen des Tier- und Pflanzenreichs, daher wird sich ihre stoffliche Zusammensetzung unterscheiden. Diese Unterschiede lassen sich in der Futtermittelkonfektionierung ausgleichen.*

Hypothese 3 *Sollten dennoch Unterschiede im Fütterungserfolg auftreten, konnten die verantwortlichen Parameter mit den eingesetzten Methoden ursächlich nicht erfasst werden.*

2 Material und Methoden

2.1 Organismen

Es folgt eine kurze Vorstellung der Organismen, die hinsichtlich der genannten Hypothesen untersucht wurden.

2.1.1 Die Rotalge *Delesseria sanguinea* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813

Der Blutrote Meerampfer *Delesseria sanguinea* ist ein Makrophyt mit Vorkommen im temperierten Bereich des Nordost-Atlantiks von Spanien bis Skandinavien. Mit Hilfe einer Haftscheibe siedelt sie typischerweise epilithisch, seltener epizooisch oder epiphytisch. In deutschen Küstengewässern kommt sie um den Helgoländer Felssockel herum, als auch in Teilen der westlichen und östlichen Ostsee vor. Die Alge ist perennierend. Im Frühjahr ausgetriebene Thallusteile („Blättchen“) werden aber im Herbst bis auf die Mittelrippen reduziert, welche als Überdauerungsorgan dient. In diesen wird das Speicherpolysaccharid Florideenstärke angereichert, welches namensgebend für die Pflanzenklasse der Florideophyceae ist. *Delesseria sanguinea* besitzt einen dreiphasig, isomorphen Lebenszyklus mit getrenntgeschlechtlichen, haploiden Gametophyten und diploiden Tetrasporophyten, welche gleichzeitig in einem Bestand vorkommen können. Hier verwendetes Material wurde von der Steinschüttung im nördlichen Teil des künstlichen Riffes Nienhagen gesammelt.

2.1.2 Die Baltische Miesmuschel *Mytilus* spp.

Muscheln der Gattung *Mytilus* sind weltweit verbreitet. Verschiedene Arten, wie die gallische Miesmuschel *Mytilus galloprovincialis* oder *Mytilus edulis* werden seit Jahrhunderten für die menschliche Ernährung kultiviert. Der Terminus Baltische Miesmuschel wird durch zwei in der Ostsee vorkommenden *Mytilus*-Spezies geprägt, welche unterschiedlich stark miteinander hybridisieren können. *Mytilus edulis* (Linnaeus, 1758) ist im Atlantik bis zu den baltischen Meerengen Skagerak und Kattegat bestandsbildend. *Mytilus trossulus* (Gould, 1850) dominiert die Bestände in der inneren Ostsee. Im Raum der Meerengen und der Beltsee hybridisieren beide Spezies, sodass nicht mehr klar von der einen oder anderen Spezies gesprochen werden kann (Väinölä und Strelkov, 2011). Das untersuchte Material wurde ebenfalls von Strukturen des künstlichen Riffes Nienhagen entnommen.

2.1.3 Der Seeringelwurm *Hediste diversicolor* (O.F. Müller, 1776)

Hediste diversicolor ist ein Polychaet, der im Nordost-Atlantik, der Nordsee als auch der Ostsee, auf schlammigen bis sandigen Böden weit verbreitet ist. Die Tiere dieser Art erreichen eine durchschnittliche Länge von 15 cm, leben bevorzugt in selbst gegrabenen verzweigten Röhren und ernähren sich omnivor.

2.1.4 Der Seeringelwurm *Alitta virens* (M. Sars, 1835)

Im Gegensatz zu seinem zuvor vorgestellten nahen Verwandten ist *Alitta virens* eine vollmarine Spezies, die ebenso in weiten Teilen des Nordost-Atlantiks vorkommt. Auf Grund der geringeren Brackwassertoleranz ist sie aber nur bis in die Meerengen zwischen Nord- und Ostsee nachzuweisen. Die während dieser Arbeit verwendeten Tiere wurden bei der niederländischen Aquakulturfirma Topsy Baits als frisch gefrorene Blöcke eingekauft.

2.2 Probennahme und Beprobungsstandorte

Die Beprobung erfolgte an zwei Standorten in der südwestlichen Ostsee (siehe Abbildung 3). Mit Hilfe von Forschungstauchern konnten im künstlichen Riff Nienhagen die Proben für *Mytilus spp.* und *Deleseria sanguinea* gewonnen werden. Diese wurden von, im Laufe des Projektes Baltic Reefs, ausgebrachtem Hartsubstrat entnommen. Für die Miesmuscheln wurden zur genaueren Untersuchung drei Größenklassen erstellt, wobei Klasse a Individuen einer Schalenlänge von 1 bis 3 cm umfasst. Individuen der Klasse b besaßen eine Schalenlänge zwischen 3 bis 5 cm und Klasse c Schalenlängen von über 5 cm. Die Wurmproben (*Hediste diversicolor*) wurden strandnah in Gollwitz auf der Insel Poel in etwa 50 cm Wassertiefe von Hand ausgegraben. In Tabelle 1 sind die Probenahmezeitpunkte, Standorte und entnommenen Spezies zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht zu Probenahmezeitpunkten, Standorten und entnommenen Spezies; *Mytilus spp.* (M.spp.), *Delesseria sanguinea* (D.s.) und *Hediste diversicolor* (H.d.); Größenklassen: a (1-3 cm), b (3-5 cm) und c (>5 cm)

Spezies	Standort	Datum	Größenklasse	Unterprobe	Saison
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	a	1	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	a	2	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	a	3	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	b	1	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	b	2	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	b	3	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	c	1	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	c	2	Frühjahr
M.spp.	Riff Nienhagen	13.03.2014	c	3	Frühjahr
D.s.	Riff Nienhagen	13.03.2014	-	1	Frühjahr
D.s.	Riff Nienhagen	13.03.2014	-	2	Frühjahr
D.s.	Riff Nienhagen	13.03.2014	-	3	Frühjahr
H.d.	Gollwitz	20.03.2014	-	1	Frühjahr
H.d.	Gollwitz	13.06.2014	-	1	Sommer
M.spp.	Riff Nienhagen	24.06.2014	a	1	Sommer
M.spp.	Riff Nienhagen	24.06.2014	b	1	Sommer
M.spp.	Riff Nienhagen	24.06.2014	c	1	Sommer
D.s.	Riff Nienhagen	24.06.2014	-	1	Sommer
H.d.	Gollwitz	08.09.2014	-	1	Herbst
M.spp.	Riff Nienhagen	23.09.2014	a	1	Herbst
M.spp.	Riff Nienhagen	23.09.2014	b	1	Herbst
M.spp.	Riff Nienhagen	23.09.2014	c	1	Herbst
D.s.	Riff Nienhagen	23.09.2014	-	1	Herbst
H.d.	Gollwitz	07.01.2015	-	1	Winter
M.spp.	Riff Nienhagen	26.02.2015	b	1	Winter
M.spp.	Riff Nienhagen	26.02.2015	c	1	Winter

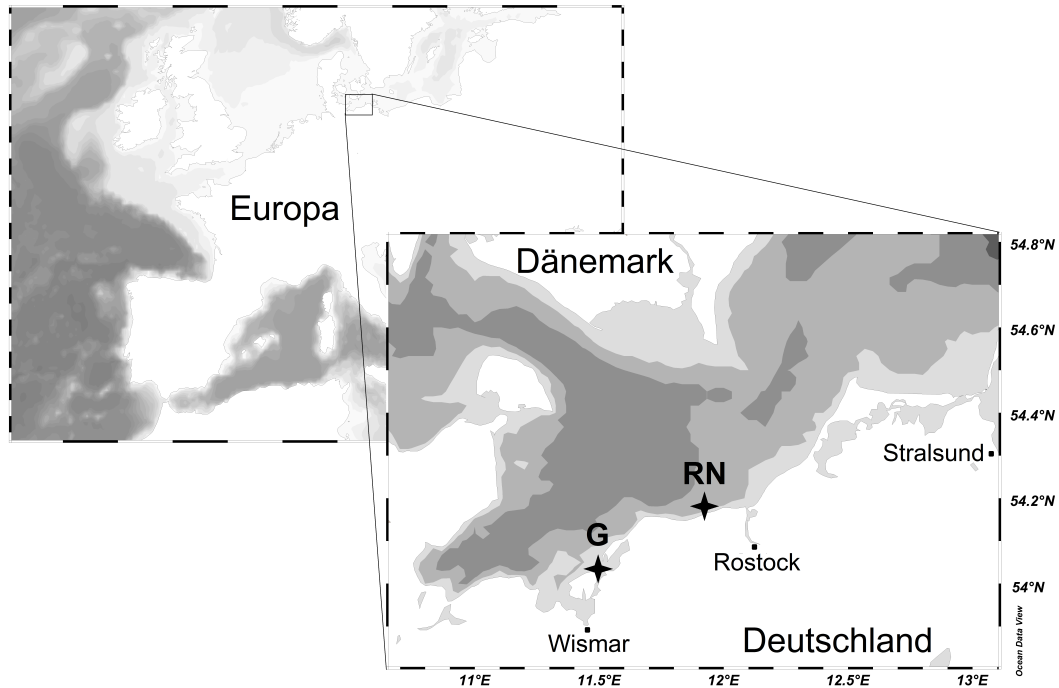


Abbildung 3: Lage der Beprobungsstandorte Gollwitz (G) und Riff Nienhagen (RN), an der deutschen Ostseeküste

Der Transport der Proben erfolgte in speziellen isolierten Transportboxen mit autochthonem Seewasser. Ab der Sommersaison wurden die Transportboxen für Würmer zusätzlich mit Abschnitten von Silikonschläuchen von 3 bis 5 mm Innendurchmesser statt Sediment als Versteck bestückt. Diese wurden als Rückzugsmöglichkeit angenommen und verringerten zugleich den Aschegehalt der Tiere, da diese ingestiertes Sediment ausschieden. Je nach Jahreszeit erfolgte eine Zwischenlagerung der Proben bei 4 °C bzw. 10 °C in einer Kühlkammer. Anschließend an die Probenahme wurde mit der Trocknung zur Probenvorbereitung gemäß Weender-Analyse begonnen.

2.3 Weender-Futtermittel-Analyse

2.3.1 Probenvorbereitung (Vortrocknung)

Die entnommenen Proben wurden zunächst luftgetrocknet, um sie schonend in einen mahlbaren Zustand zu überführen und für weitere Analysen haltbar zu machen (Wärmebehandlung im Umlufttrockenschrank MLW HS 100 bei 60 °C für 72 h). Algen- und Muschelproben wurden nach der Trocknung in einer Kugelmühle zu Pulver mit einer Körnung ≤ 1 mm vermahlen und in luftdichte Aufbewahrungsgläsern gelagert. Die Volumina der Proben von *Hediste diversicolor* konnten auf Grund ihres geringen Umfangs ebenfalls im Umlufttrockenschrank vorgetrocknet werden. Das gewonnene Material wurde mit Mörser und Pistill unter zu Hilfenahme von flüssigen Stickstoff kryogemahlen (Körnung ≤ 1 mm). Zusätzliches Wurmmaterial von *Alitta virens*, welches von der Firma Topsy Baits geliefert wurde, wurde auf zweierlei Weise vorbereitet. Zum einen wurde das Verfahren wie zuvor für *Hediste diversicolor* beschrieben angewendet. Zum Anderen wurde das Material wie auch später für die Futtermittelproduktion zunächst für 24 h gefriergetrocknet (Christ Delta 1-24 LCSplus) und anschließend in einem Multizerkleinerer der Firma Krups weiterverarbeitet, bis ein lockeres, leicht faseriges Material entstand. Auch das vorgetrocknete Wurmmaterial wurde bei Raumtemperatur in luftdichten Gläsern für weitere Analysen aufbewahrt. Alle folgenden Analysen wurden als Doppelbestimmungen durchgeführt.

2.3.2 Trockensubstanz und Rohasche

Die Trockensubstanz ist der entwässerte Anteil an der ursprünglichen Probe nach der Trocknung. Sie ist ein häufig gewählter Bezug zur Angabe von Nährstoffgehalten. Zur Bestimmung der Trockensubstanz wurden je nach vorhandenem Material 1,5 bis 2 g der vorgetrockneten Substanz in zuvor getrocknete und eingewogene Aschetiigel gegeben und diese bei 105 °C im Umlufttrockenschrank für 3 h nachgetrocknet. Die zurückbleibende Masse wird als Trockensubstanz (TS) bezeichnet und nach folgender Formel berechnet:

$$TS(\%) = \frac{(c - a)}{(b - a)} \times 100 \quad (1)$$

a = Tiegelleermasse

b = Gesamtmasse (Tiegel + Inhalt) vor Trocknung

c = Gesamtmasse nach Trocknung

Nach der Abkühlung im Exikator wurden die Tiegel zurückgewogen. Wurde der Gewichtsverlust aus der Vortrocknung mit bilanziert, ergibt die Addition der beiden Gewichtsabnahmen ein Maß für den Wassergehalt einer Probe. Die im Tiegel verbliebene TS wurde in einem weiteren Schritt für 6 h bei 600 °C im Muffelofen verascht. Anschließend wurden die Tiegel wieder in einem Exikator abgekühlt und abermals zurückgewogen. Die verbliebene Masse wird Rohasche (RA) genannt und wie folgt berechnet:

$$RA (\%TS) = \frac{(c - a)}{(b - a)} \times 100 \quad (2)$$

a = Tiegelleermasse

b = Gesamtmasse (Tiegel + Inhalt) vor Veraschung

c = Gesamtmasse nach Veraschung

Die Rohasche ist ein Maß für den Anteil der anorganischen Verbrennungsrückstände der Probe in Bezug auf die Trockensubstanz. Durch Subtraktion des Wertes von der Trockensubstanz errechnet sich der entsprechende Anteil an organischer Substanz. Die Rohasche besteht je nach Probe hauptsächlich aus Mineralstoffen und Sand.

2.3.3 Rohprotein

Die Kenntnis des Eiweißgehaltes ist wichtig zur Herstellung und Überprüfung tiergerechter und effizienter Futtermittel. Die Bestimmung erfolgte mittels der Dumas Verbrennungsmethode (Dumas, 1826; zitiert von Buckee (1994)), in dem Gerät vario MAX der Firma Elementar. Es wurden je nach angenommenen Proteingehalt 0,5 g (Wurmproben) oder 1,5 g (Alge und Muschel) der vorgetrockneten Substanz in einen speziellen Verbrennungstiegel gegeben, welcher automatisch von dem Gerät in die Verbrennungskammer geführt wird. Dort wird aller in brennbaren Molekülen gebundener Stickstoff in den elementaren Zustand überführt, mit Hilfe eines Wärmeleitfähigkeitssensors detektiert und von der Gerätesoftware in den Stickstoffgehalt umgerechnet. Per Umrechnungsfaktor (6,25) wird aus den Stickstoffgehalt der Rohproteinwert berechnet. Spezifische Einstellungen wie Temperaturregime und Flüsse der Transportmedien wurden am Messgerät gemäß VDLUFA Methodenbuch (Bassler, 1993) eingestellt.

2.3.4 Rohfett

Rohfett (RFe) ist die Gesamtheit aller Lipide einer Probe. Zur Bestimmung des Rohfettes wurden die halbautomatischen Hydrolyse- und Extraktionsapparate SOXTEC 1047 sowie SOXTEC 2050 eingesetzt. Gearbeitet wurde nach dem Soxhlet-Prinzip (Soxhlet, 1879). Es wurden 3 g Probenmaterial mit etwa 2 g Celite in ein Aufschlussgefäß (Glasfilterfritte) eingewogen, anschließend mit 120 ml 4N HCl versetzt und im Hydrolysegerät für 60 min gekocht. Nach Abkühlung wurden die Proben fünfmal mit je 100 ml destilliertem Wasser ($T \approx 20-25 \text{ }^\circ\text{C}$) gespült und das Wasser durch die Glasfritte abgesaugt. Das Extraktionsgefäß wurde anschließend abermals mit 50 ml Aquadest. ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) aus der Sprühpistole gereinigt und das Wasser durch die Fritte abgesaugt. Nach dem Spülen wurde das Extraktionsgefäß mit einem acetongetränkten, fettfreien Wattebausch und einem Reinigungstab von Rückständen befreit. Der Wattebausch wurde ebenfalls in die jeweilige Glasfritte gegeben. Über Nacht wurden die Glasfilterfritten bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank getrocknet und anschließend im Exikator abgekühlt. Vorgetrocknete Extraktionstiegel wurden mit Siedesteinschen versehen und ausgewogen. Sowohl Glasfritten als auch Extraktionstiegel wurden wie vorgeschrieben in das Extraktionsgerät gegeben. Die Tiegel wurden mit 90 ml Petrolether befüllt.

Tabelle 2: Programm zur Rohfettextraktion

Temperatur	1. Phase Sieden	2. Phase Extraktion	3. Phase Rückgewinnung	4. Phase Trocknung
135 °C	20 min	45 min	15 min	1 min

Die Rohfettextraktion wurde gemäß des Programmes in Tabelle 2 durchgeführt. Die Extraktionstiegel wurden entnommen, für 1 h bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet, im Exikator abgekühlt und anschließend zurückgewogen. Der Rohfettgehalt ergibt sich rechnerisch wie folgt:

$$\text{RFe (\%TS)} = \frac{(b - a)}{(c \times \text{TS (\%)})} \times 10000 \quad (3)$$

a = Masse des Extraktionstiegel + Siedesteinschen nach Vortrocknung

b = Masse (Extraktionstiegel + Inhalt) nach Extraktion, Trocknung und Abkühlung

c = Probeneinwaage

2.3.5 Rohfaser

Die Rohfaser (RFa) beschreibt die unlösliche, organische Substanz nach einer wechselnden Säure- und Basenbehandlung der Probe. Die Analysen erfolgten am halbautomatischen FOSS-Analyser "Fibertec 2010". Dazu wurden 1 g Probenmaterial mit etwa 0,5 g Celite in einer speziellen Glasfritte vermengt und diese auf dem Herd des Gerätes eingesetzt. Die Siedekolonnen wurden geschlossen und mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt (H_2SO_4 $c = 0,13 \text{ mol} \times l^{-1}$). Zur Unterdrückung des Aufschäumens wurden, nach deren Befüllung, etwa 2 Tropfen n - Octanol in die Siedekolonnen gegeben. Das Reagenz wurde nach 30 min Kochzeit aus den Kolonnen abgesaugt, zweifach mit Wasser gespült und der Siedeprozess mit verdünnter Kalilauge (KOH $c = 0,23 \text{ mol} \times l^{-1}$) wiederholt. Nach der zweiten Spülung wurden die Fritten aus dem Gerät entnommen und der Rückstand wurde in einer Kaltwasserextraktionseinrichtung dreimal mit je 25 ml Aceton gespült. Die gespülten Fritten wurden über Nacht bei 105 °C getrocknet und nach dem Abkühlen im Exikator gewogen. Nachfolgend wurde im Muffelofen bei 500 °C für eine Stunde verascht. Nach der erneuten Abkühlung im Exikator wurden die Fritten nochmals gewogen. Die Gewichtsdiﬀerenz entspricht dem Rohfaseranteil an der TS. Für die untersuchten Wurmproben wurde angenommen, dass sie keine Faserbestandteile enthalten.

$$RFa (\%TS) = \frac{(a - b)}{E} \times 100 \quad (4)$$

a = Gesamtmasse (Fritte + Inhalt) nach Trocknung

b = Gesamtmasse nach Veraschung

E = Einwaage der Probe

2.3.6 Stickstofffreie Extrakte

Die Fraktion Stickstofffreie Extrakte (NfE) konnte nach vorangegangenen Untersuchungen rechnerisch ermittelt werden. Diese Stoffgruppe enthält alle Nichtfaserkohlenhydrate wie z.B. Zucker oder Stärke.

$$NfE (\%TS) = 100 \% - RA \% - RP \% - RFe \% - RFa \% \quad (5)$$

2.4 Bestimmung der Aminosäuren mittels HPLC

Zur Bestimmung der Aminosäuren wurden zunächst aus dem getrockneten Probenmaterial Hydrolysate hergestellt. Es wurden 2 g Probenmaterial in eine 250 ml Blutkonservenflasche eingewogen, mit 60 ml 6 M HCl versetzt und anschließend für 22 h im Trockenschrank bei 110 °C hydrolysiert (saure Hydrolyse). Nach Abkühlung wurde in einem 250 ml Maßkolben überführt und mit Aquadest. aufgefüllt. Anschließend wurde durch Papierfilter filtriert. 5 ml Filtrat wurden mit einem Rotationsverdampfer vollständig eingeeengt und in 2 ml 0,1 M HCl wiederaufgenommen und analysiert. Zur genaueren Bestimmung der schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin erfolgte ein Oxidationsschritt vor der eigentlichen Hydrolyse. Dazu wurde nach der Einwaage in die Blutkonservenflasche 10 ml Oxidationsgemisch (Ameisensäure und Wasserstoffperoxid, Verhältnis 9:1) zur Probe gegeben (oxidierte Hydrolyse) und diese über Nacht im Kühlschrank aufbewahrt. Anschließend wurde mit 1 M Kaliumpermanganatlösung versetzt bis keine Entfärbung mehr stattfand. Es folgten die Versetzung mit 6 M HCl und die Hydrolyse im Trockenschrank für 22 h bei 110 °C, sowie die Folgeschritte entsprechend dem Vorgehen bei der sauren Hydrolyse. Zur Bestimmung von Tryptophan wurde eine gesonderte Hydrolyse durchgeführt (basische Hydrolyse). Diese wurde mit 100 ml 4 M NaOH Lösung, bei 110 °C für 24 h mit einer Probeneinwaage von 2 g in Blutkonservenflaschen durchgeführt. Anschließend wurde das Hydrolysat mit 6 M HCl auf einen pH-Wert zwischen 4 und 5 eingestellt und in 500 ml Maßkolben überführt. Die Maßkolben wurden auf 500 ml mit Aquadest. aufgefüllt und die Lösung anschließend durch Papierfilter filtriert. Das entstandene Filtrat konnte direkt zur Messung in der Hochdruckflüssigkeitschromatografie (HPLC)-Anlage verwendet werden. Die qualitative und quantitative Bestimmung der proteinogenen Aminosäuren erfolgte automatisiert mit der modularen HPLC-Anlage der Firma Shimadzu. Folgende Säulen waren im Gerät im Einsatz; Vorsäule: LCA K04/Na der Firma ALLtech-Grom GmbH sowie die Trennsäule: LC K06 von Alltech-Grom GmbH. Die Aminosäuren wurden mit einem Citratpuffer und steigendem pH (3,45 bis 10,85) beim Durchfluss in der Trennsäule getrennt. Es erfolgte eine Nachsäulenderivatisierung mit Ninhydrin und die anschließende Detektion der Eluente mittels eines UV-Fluoreszenzsensors (570 nm, Prolin 440 nm).

2.5 Brennwerte

Der Brennwert einer Probe ist ein Maß für den Energiegehalt, der durch Verbrennung mit Sauerstoff freigesetzt werden kann. Die in dieser Arbeit präsentierten

Brennwerte wurden mittels eines Bombenkalorimeters (IKA C 200) gemessen, welches direkt den Brennwert der eingegebenen Substanz ausgibt. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf die Trockensubstanz der jeweiligen Probe.

2.6 Futtermittelvorbereitung

Nach der Untersuchung der Organismen wurden diese getrennt oder in einem Fall auch kombiniert mit einem kommerziellen Hauptfutter für Forellen (Baywa Aqua Profie 4 mm) vermengt. Dieses Futter war laut Herstellerangaben soweit mit Vitaminen und Mineralstoffen angereichert, dass eine artgerechte Versorgung der Versuchstiere auch nach Eingriffen in die Futtermittelzusammensetzung gewährleistet war. Ziel war es, eine möglichst große Menge der neuen Zutaten in die Versuchsfuttermittel einzubringen. Auf Grund der hohen Energie und Proteinwerte des Ausgangsfutters, welches auch gleichzeitig als Kontrolle (K) diente, wurden je nach Bedarf Fischmehl und Leinöl zugegeben, um die Versuchsfuttermittel isoenergetisch und isonitogen einzustellen. Tabelle 3 zeigt die prozentuale Zusammensetzung der verwendeten Futtermittel (FM). Ein Zusatz von Gluten soll die Festigkeit der hergestellten Pellets verbessern. Als Komponente Ringelwurm kam ausschließlich die zugekaufte Spezies *Alitta virens* zum Einsatz, da *Hediste diversicolor* im Rahmen dieser Arbeit manuell nicht hinreichend aus der Umwelt zu beschaffen war.

Tabelle 3: Verwendete Versuchsfuttermittel und deren Zusammensetzung; K: Kontrollfutter, A: Algenfutter, M: Muschelfutter, W: Wurmfutter, A+W: Algen und Wurm Mischfutter

Zusammensetzung (%)	K	A	M	W	A+W
Baywa FM	100	45	45	45	40
Rotalge	0	10	0	0	10
Miesmuschel	0	0	10	0	0
Ringelwurm	0	0	0	35	30
Fischmehl	0	25	25	0	0
Leinöl	0	15	15	15	15
Gluten	0	5	5	5	5

Zur Herstellung der Futtermittel wurde das Kontrollfutter in einer Schlagmühle gemahlen und die Zutaten, wie in Tabelle 3 gezeigt, miteinander vermengt. Nach Zugabe von Wasser entstand ein fester Teig, der mittels eines Handextruders in 3 × 5 mm Stückchen pelletiert wurde. Das erhaltene Extrudat wurde anschließend für 12 h bei 60 °C im Umlufttrockenschrank getrocknet. Die fertigen Futterpellets wurden bis zur Verwendung im Experiment kühl und trocken gelagert.

2.7 Fütterungsexperiment

Die Testung der hergestellten FM erfolgte in Kooperation mit der LFA-MV am Standort der Versuchsanlage Born. Dazu wurden aus der aktuellen Generation 165 Jungfische, die bereits an ein Hauptfutter gefüttert gewöhnt waren, aus einer großen Gruppe zufällig ausgewählt. Die Tiere wurden unter tierärztlicher Aufsicht mit 2-Phenoxyethanol ($c = 0,25 \text{ ml} \times \text{l}^{-1}$) betäubt, ihre Gesamtlänge (von Kopfspitze bis Schwanzflossenende) vermessen und das Gewicht bestimmt. Anschließend wurde den Tieren zur individuellen Nachverfolgung ein Farbcode unter die Haut gespritzt und sie wurden in Gruppen zu elf Tieren auf 15 Versuchsbecken einer gekoppelten Kreislaufanlage verteilt. Abbildung 4 zeigt einen Teil dieser Anlage schematisch. Die gesamte Anlage bestand aus zwei solcher Aquarienwände zwischen denen ein kontinuierlicher Wasseraustausch gewährleistet war, um allen Versuchstieren einem einheitlichen Wasserkörper auszusetzen. Die Anlage wurde drei Wochen vor Versuchsbeginn mit vorgefiltertem Oberflächenwasser aus dem nahegelegenen Boddetter Bodden (Salinität 3-5 PSU) angefahren und die Biofilter mit einem Bakterienpremix angeimpft. Die Fischbecken wurden während des Versuchs zusätzlich belüftet um eine ständige Sauerstoffsättigung von über 80 % zu gewährleisten.

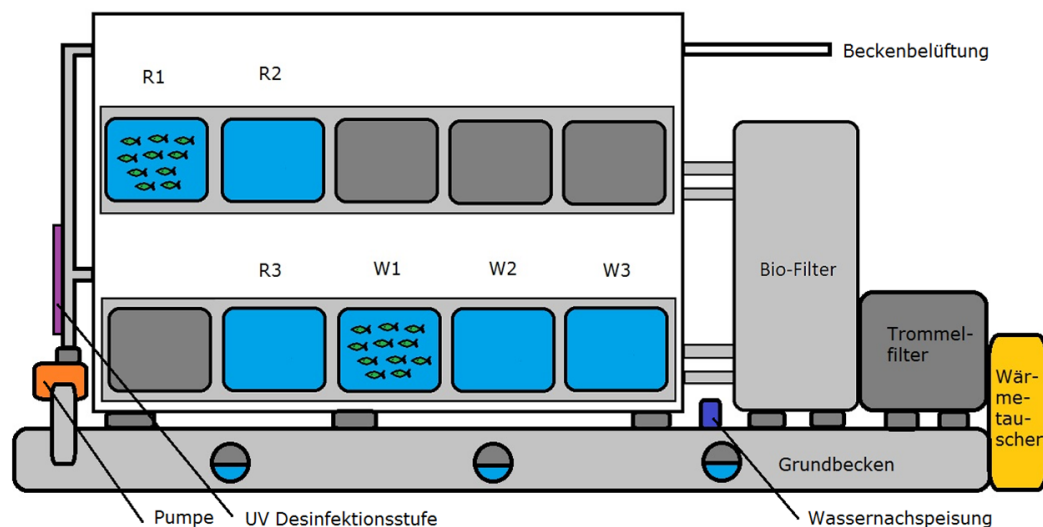


Abbildung 4: Die schematische Darstellung des Aufbaus für den Fütterungsversuch verwendeten Aquarienwände der LFA-MV am Standort Born zeigt die Anordnung der technischen Komponenten und der Versuchsbecken. Nur besetzte Becken nahmen an der Zirkulation teil. Exemplarisch werden die Becken der Kontrollversuchsgruppe (R1-3) sowie der Versuchsgruppe Wurm (W1-3) gezeigt.

Die Temperatur wurde auf 20 °C eingestellt. Verdunstungsverluste wurden über eine automatische Nachspeisung mit Boddenwasser ausgeglichen. Die Fütterung erfolgte einmal täglich von Hand mit 1,8 % Futtermittel je Fischmasse pro Becken. Es wurde pauschal eine Futtermittelumsatzrate (Feed Conversion Ratio) (FCR) von 1

angenommen und die Futtermittelgabe wurde sukzessiv erhöht. Die Futtermittelgaben für einzelne Becken wurden nach einer Vermessungsrunde oder nach erkanntem Fischtod entsprechend angepasst. Während des Versuches wurden in der Anfangsphase täglich Temperatur, pH-Wert und O₂-Sättigung zur Kontrolle der Wasserqualität gemessen. Als sicher war, dass die Anlage stabil funktionierte, wurden diese Daten jeden zweiten Tag erhoben. Zweimal wöchentlich wurden zudem die Konzentrationen der Nährstoffe Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat im Anlagenwassers mittels Hach-Lange Standardkits photometrisch (Hach Spektralphotometer DR3900) bestimmt.

2.8 Schlachtkörperanalysen

Der Fütterungsversuch endete, als sich die Fischmasse in den Becken etwa verdoppelt hatte. Am 74. Tag erfolgte die letzte Fütterung. Es folgte ein Tag zur Ausnüchterung. Anschließend erfolgte die Betäubung. Die Endgewichte sowie die Endlängen aller verbliebenen Tiere wurden festgehalten. Aus jeder Versuchsuntergruppe wurden nach Möglichkeit jeweils die drei schwersten und die drei leichtesten Exemplare für die Schlachtkörperanalyse ausgewählt. Die betäubten Versuchstiere wurden per Kehlschnitt getötet und seziiert. Es wurden die Parameter Schlachtkörpermasse (mit und ohne Kopf), Eingeweidegewicht, Lebergewicht sowie die Masse des ausgekratzten Eingeweidefettes protokolliert. Jeweils ein großer und ein kleiner Fisch jeder Versuchsuntergruppe wurden als ganzer Fisch weiter analysiert. Von zwei weiteren Tieren jeder Untergruppe wurde das Filet geschnitten und analysiert. Dabei wurden Rohasche, Rohprotein und die Aminosäurezusammensetzung bestimmt. Zusätzlich wurden einige der übrigen Fische einer gustatorischen Testung unterzogen. Als Tester wurden nur bekennende Fischesser ausgewählt, die Forellen bereits in unterschiedlichen Zubereitungsformen kannten. Diese bewerteten Geruch, Geschmack und Struktur des Fischfleisches mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (ungenügend). Stellvertretend für alle Fische wurde zunächst ein Fisch der Kontrollgruppe am Tag nach der letzten Wägung geschlachtet und das gekochte Filet getestet, um eine eventuelle Auswirkung des Anlagenwassers auf die Qualität zu erfassen. Anschließend wurden alle verbliebenen Tiere für zehn Tage in aufgesalzenem Leitungswasser (3 PSU) ausgenüchert und der Test wiederholt. Danach wurden Tiere aller Versuchsgruppen zur Veredelung geräuchert und anschließend gemäß der vorgestellten Kriterien getestet.

2.9 Datenanalyse, statistische Methoden und Software

Die gewonnen Rohdaten wurden mit Hilfe der Softwareanwendungen Microsoft Excel (Datenbankerstellung, Mittelwertberechnung und Standardabweichungen) sowie der freien Programmiersprache R (verschiedene Rechenoperationen, statistische Auswertungen und Abbildungen) ausgewertet. So erfolgte die Berechnung des Ammoniaks im Wasser der Versuchsanlage aus den zuvor bestimmten Werten nach der folgenden Formel:

$$c(NH_3) = \frac{0,94412 \times c(NH_4^+)}{1 + 10^{(pKa-pH)}} \quad (6)$$

$$pKa = 0,0925 + \frac{2728,795}{t+273,5}$$

t = Temperatur in °C

Die Proteinretention in den Versuchsfischen errechnete sich aus der Formel:

$$PR(\%) = \frac{RP(g\ TS)\ Fischbecken \times 100}{RP(g\ TS)\ eingesetztes\ Futter} \quad (7)$$

Die Berechnung der täglichen Wachstumsraten (wr) innerhalb einzelner Versuchsintervalle erfolgte nach der Formel:

$$wr = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (8)$$

m_1 = Startmasse

m_2 = Endmasse

t = Zeit in Tagen

Der Konditionsindex (KI) der Versuchstiere (*Oncorhynchus mykiss*) wurde nach der Formel von Ricker (1975) wie folgt berechnet:

$$KI = \frac{100 \times m}{l^3} \quad (9)$$

m = Gesamtmasse in g

l = Länge in cm

Der Hepatosomatische Index wurde mit folgender Formel berechnet:

$$HSI = \frac{100 \times x}{m} \quad (10)$$

m = Gesamtmasse in g

x = Leberfrischmasse in g

Schlachtdaten wurden unter anderem auch mit Hilfe von Box-Whisker-Plots analysiert. Dabei ist der Querstrich in der Box der Median. Die Box selbst zeigt das obere und untere Quartil, umfasst also 50 % aller Werte. Der Abstand zwischen den beiden Quartilen wird Interquartilabstand genannt. Die Whiskers stellen die minimale und die maximale Abweichung dar, sofern diese nicht das 1,5 fache des Interquartilabstandes überschreitet. Werte außerhalb dieses Bereiches werden als Ausreißerpunkte dargestellt. Zur Durchführung von Mittelwertvergleichen wurde zunächst die Normalität der Datensätze mittels Shapiro-Wilk-Test sowie die Homogenität per Levene-Test geprüft. Wurden beide Bedingungen mit $p \geq 0,05$ erfüllt, wurde mit einfacher ANOVA und anschließendem post-hoc Tukey-Test verglichen. Waren eine oder beide Bedingungen nicht erfüllt konnte mit Kruskal-Wallis-Test und anschließendem Bonferroni-Test verglichen werden. Ein Unterschied galt als signifikant, wenn $p \leq 0,05$ war. Für multivariate Analysen wurden sowohl die Multidimensional Skalierung (MDS) als auch die Hauptkomponentenanalyse (PCA) genutzt.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Testorganismen im Jahresgang

3.1.1 Weender-Analyse

Im Jahresgang 2014 wurden quartalsweise Wildproben der Testorganismen entsprechend Tabelle 1 genommen und diese auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Tabelle 4 gibt eine Übersicht zur biochemischen Zusammensetzung der getesteten Organismen. Allgemein sind die Unterschiede bei den erhobenen Daten zwischen den beiden Wurmpezies gering. Im Proteingehalt unterschieden sich die Organismen zum Teil sehr. Dieser reichte von 10,9 % bei der *Mytilus spp.* bis 66,4 % bei *Hediste diversicolor*. Rohaschegehalte wurden zwischen 17,5 % (*Hediste diversicolor*) und 84,4 % (*Mytilus spp.*) nachgewiesen. Der Gehalt an HCl unlöslicher Asche lag zwischen 1,7 % (*Delesseria sanguinea*) und 3,8 % (*Mytilus spp.*). Weitere Rohwerte konnten für *Hediste diversicolor* auf Grund geringen Probenmaterials nicht erhoben werden.

Tabelle 4: Prozentuale Zusammensetzung der Testorganismen bezüglich ihrer Trockenmasse (TS) entsprechend der Weender-Futtermittelanalyse. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte (Doppelbestimmung) vom Herbst 2014 (außer *Alitta virens*). Für *Mytilus spp.* werden die Daten der Größenklasse b (3-5 cm) gezeigt.

Zusammensetzung (% TS)	<i>Delesseria sanguinea</i>	<i>Mytilus spp.</i>	<i>Hediste diversicolor</i>	<i>Alitta virens</i>
Rohasche	23,3	82,1	17,6	18,0
HCl unl. Asche	1,70	3,80	3,40	3,20
Rohprotein	19,2	12,6	66,4	64,8
Rohfett	< 1,00	< 1,00	n.v.	7,60
Rohfaser	5,40	2,60	n.v.	n.v.
N freie Extrakte	51,1	2,70	n.v.	9,60
Bruttoenergie (MJ × kg ⁻¹ TS)	12,1	2,93	19,7	18,8
Protein-Energie-Ratio (g × MJ ⁻¹ TS)	15,9	43,0	33,7	34,5

Der Rohfettwert lag für *Delesseria sanguinea* als auch für *Mytilus spp.* bei < 1 %. *Alitta virens* hatte einen Rohfettgehalt von 7,6 %. Der Rohfasergehalt wurde nur für *Delesseria sanguinea* und *Mytilus spp.* getestet und betrug 2,6 % für die Muschel und 5,4 % für die Alge. Die Gehalte an NfE waren ebenfalls sehr unterschied-

lich. Den höchsten Wert erreicht *Delesseria sanguinea* mit 46,6 %, den niedrigsten *Mytilus spp.* mit 2,4 %. Für *Alitta virens* wurde ein Wert von 9,4 % bestimmt. Zusätzlich wurde der Energiegehalt der Organismen bestimmt. *Mytilus spp.* hatte die geringste Energiedichte mit $2,9 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ TS. Es folgte die Rotalge mit $12,1 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ und die Würmer mit Werten von $18,8 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (*Alitta virens*) und $19,7 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (*Hediste diversicolor*). Die resultierenden Protein-Energie-Ratios betragen $15,7 \text{ g} \times \text{MJ}^{-1}$ für *Delesseria sanguinea*, 33,7 und $34,5 \text{ g} \times \text{MJ}^{-1}$ für *Hediste diversicolor* und *Alitta virens* sowie $43,0 \text{ g} \times \text{MJ}^{-1}$ für *Mytilus spp.*. Am Wichtigsten für die Folgeexperimente war der Proteingehalt. Tabelle 5 zeigt die Rohproteingehalte der Testorganismen, bezüglich ihrer Trockenmasse im Jahresverlauf.

Tabelle 5: Rohproteingehalte der Organismen (% TS) im Jahresverlauf 2014; *Mytilus* der Größenklasse b (3-5 cm); * Werte vor Methodenumstellung bei Probennahme; (Doppelbestimmung)

Organismus	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<i>Delesseria sanguinea</i>	22,06	21,83	19,21	n.v.
<i>Mytilus spp.</i>	13,52	10,92	12,56	13,40
<i>Hediste diversicolor</i>	52,25*	47,22*	66,35	61,85

Der gemessene Proteingehalt von *Delesseria sanguinea* unterlag im Jahresverlauf 2014 einer leicht fallenden Tendenz von 22,06 % im Frühjahr auf 19,21 % im Herbst. Im Winter konnte auf Grund der fortgeschrittenen Degeneration keine vergleichbare Probe gewonnen werden. Der Proteingehalt von *Mytilus spp.* der Größenklasse 3-5 cm schwankte im Jahresverlauf zwischen 10,92 % im Sommer (Minimum) und 13,52 % im Frühjahr (Maximum). Die Messwerte der Proteingehalte von *Hediste diversicolor* schwankten zwischen 47,22 % und 66,35 %. Nach Umstellung der Probennahmemethode wurden grundsätzlich Werte über 60 % Rohproteingehalt in *Hediste diversicolor* gemessen.

3.1.2 Aminosäureanalysen

Zur besseren Einschätzung der Futtermittelwertigkeit der Testorganismen, wurde die Aminosäurezusammensetzung des Rohproteins bestimmt. Tabelle 6 zeigt die Zusammensetzung des Proteins aller vier untersuchten Organismen. *Delesseria sanguinea* erreichte Maximalwerte für die Aminosäuren Prolin mit $5,24 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ und Cystein mit $2,29 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ im Vergleich zu den anderen Organismen. Das

Protein von *Mytilus spp.* war mit $12,1 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ hingegen besonders reich an Glycin. Ebenso zeigte die Muschel mit $2,0 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ den höchsten Methioningehalt im Protein.

Tabelle 6: Aminosäuregehalte der Testorganismen (Doppelbestimmung; $\text{g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$) in Proben aus dem Sommer 2014 (außer *Alitta virens*), *Mytilus spp.* der Größenklasse b (3-5 cm), Die Aminosäuren Asparagin und Asparaginsäure (Asx) sowie Glutamin und Glutaminsäure (Glx) wurden zusammen bestimmt.

Aminosäure	<i>Delesseria sanguinea</i>	<i>Mytilus spp.</i>	<i>Hediste diversicolor</i>	<i>Alitta virens</i>
Asx	9,22	8,84	8,22	7,78
Thr	4,34	3,58	3,87	3,43
Ser	4,72	4,70	3,81	3,54
Glx	12,8	9,75	12,9	11,5
Gly	4,68	12,1	4,74	5,71
Ala	5,71	5,57	6,43	6,56
Val	4,57	4,00	4,25	3,56
Ile	3,80	3,33	3,91	3,20
Leu	5,60	5,41	6,58	5,63
Tyr	2,98	4,38	2,61	2,47
Phe	3,59	3,16	3,67	3,15
His	1,81	2,03	2,36	2,16
Lys	4,62	4,98	6,49	5,64
Arg	5,92	5,64	3,69	5,90
Pro	5,24	3,25	3,43	3,21
Cys	2,29	1,49	1,14	1,00
Met	1,42	2,00	1,32	1,74
Trp	0,70	0,94	0,82	0,70

Im Vergleich wurden bei beiden Wurmspezies *Hediste diversicolor* und *Alitta virens* erhöhte Werte für die Aminosäuren Alanin (6,43 und 6,56 $\text{g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$) sowie Lysin (6,49 und 5,64 $\text{g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$) gemessen. Alle Testorganismen wiesen einen Tryptophangehalt von $< 1 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ auf. Zur Absicherung einer

gleichbleibenden Proteinqualität wurden auch die Aminosäuremuster im Jahresverlauf 2014 gemessen. Tabelle 7 zeigt die wichtigsten zur Muskelproteinbildung benötigten Aminosäuren der Testorganismen im Jahresverlauf. Die größten Abweichungen (> 16%) im Jahresmittel zeigten die Aminosäuren Arginin und Methionin im Protein von *Hediste diversicolor* ($4,12 \pm 0,70$ und $1,74 \pm 0,29 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$).

Tabelle 7: Für den Fleischansatz wichtige Aminosäuren (Doppelbestimmung; $g \times (16 g N)^{-1}$) der Testorganismen im Jahresverlauf, *Mytilus spp.* der Größenklasse b (3-5 cm)

Organismus					Jahresmittel
	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	\pm Stabw.
<i>Delesseria</i>					
<i>sanguinea</i>					
Thr	4,48	4,34	4,35	n.v.	4,39 \pm 0,07
Lys	4,68	4,62	5,03	n.v.	4,78 \pm 0,22
Arg	5,74	5,92	5,54	n.v.	5,73 \pm 0,19
Cys	n.v.	2,29	2,66	n.v.	2,48 \pm 0,27
Met	n.v.	1,42	1,45	n.v.	1,43 \pm 0,02
Trp	n.v.	0,70	0,68	n.v.	0,69 \pm 0,01
<i>Mytilus</i>					
<i>spp.</i>					
Thr	3,76	3,58	3,71	4,21	3,81 \pm 0,27
Lys	5,62	4,98	5,24	6,10	5,49 \pm 0,49
Arg	6,15	5,64	5,66	6,54	6,00 \pm 0,43
Cys	1,64	1,49	1,31	1,66	1,52 \pm 0,16
Met	1,92	2,00	1,73	2,47	2,03 \pm 0,31
Trp	n.v.	0,94	0,94	n.v.	0,94 \pm 0,00
<i>Hediste</i>					
<i>diversicolor</i>					
Thr	4,06	3,87	3,99	4,00	3,98 \pm 0,08
Lys	6,51	6,49	5,43	6,38	6,20 \pm 0,52
Arg	3,74	3,69	3,89	5,16	4,12 \pm 0,70
Cys	1,15	1,14	1,22	1,23	1,19 \pm 0,04
Met	1,81	1,32	1,96	1,89	1,74 \pm 0,29
Trp	n.v.	0,82	0,77	0,87	0,82 \pm 0,05

Ebenfalls größere Schwankungen im Jahresverlauf waren bei den Aminosäuren Cy-

stein und Methionin im Protein von *Mytilus spp.* festgestellt worden ($1,52 \pm 0,16$ und $2,03 \pm 0,31 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$). Mit mehr als 10 % schwankte auch das Cystein im Protein von *Delesseria sanguinea* ($2,48 \pm 0,27 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$). Alle anderen dargestellten Aminosäuren schwankten um weniger als 10 % um ihr Jahresmittel.

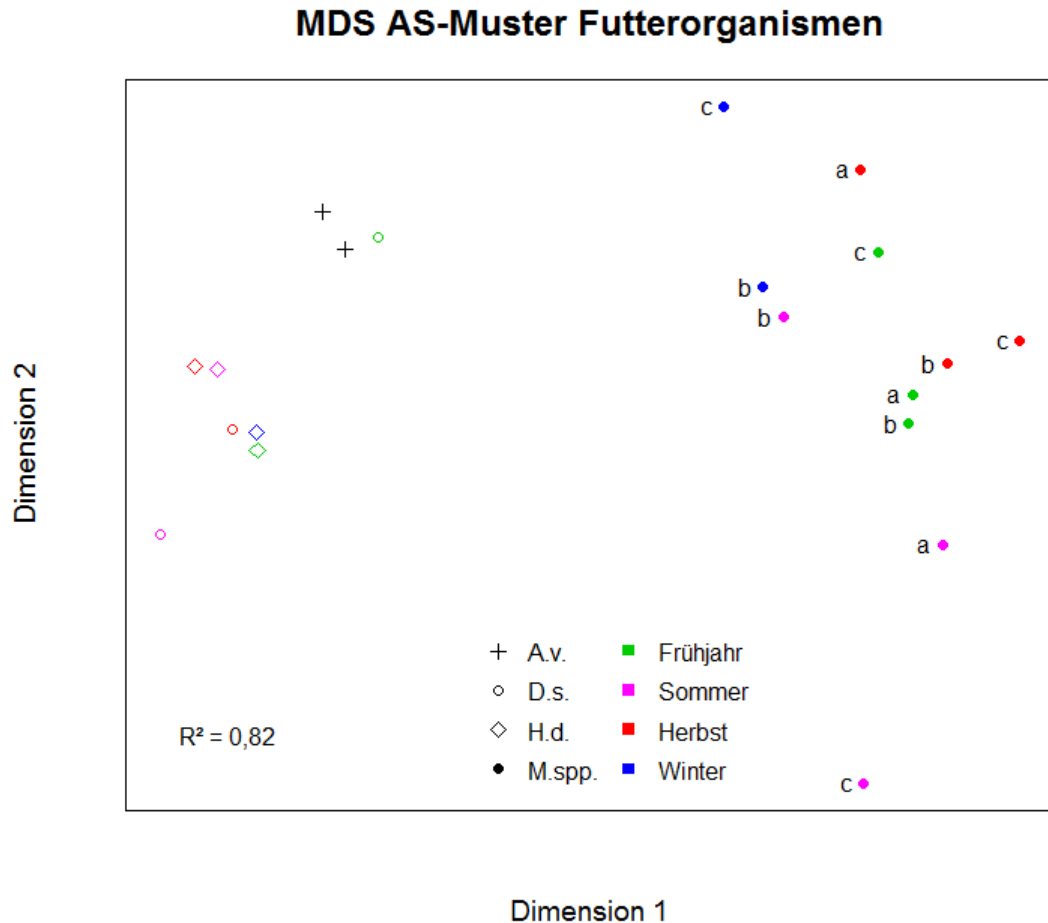


Abbildung 5: Statistische Unterschiede (multidimensionale Skalierung) in der Aminosäurezusammensetzung der Proteine der Testorganismen im Jahresverlauf 2014; A.v.: *Alitta virens*, D.s.: *Delesseria sanguinea*, H.d.: *Hediste diversicolor*, M.spp.: *Mytilus spp.*; Größenklassen: a (1-3 cm), b (3-5 cm) und c (>5 cm)

Eine multidimensionale Skalierung aller im Jahresverlauf 2014 gemessenen Aminosäuremuster der Testorganismen zeigt Abbildung 5. Die Aminosäurekomposition des Proteins von *Hediste diversicolor* zeigten dem nach die geringsten Veränderungen im Jahresverlauf. Die Zusammensetzung des Muschelproteins streute im Gegensatz dazu relativ stark, sowohl im Jahresverlauf als auch durch die Größenklassen. Die Aminosäurezusammensetzung von *Delesseria sanguinea* unterlag im Verlauf des Jahres 2014 einer kontinuierlichen Veränderung. Allerdings ist darauf zu verweisen, dass das Bestimmtheitsmaß für die Trennung der Datenpunkte mit $R^2 = 0,82$

relativ gering war.

3.2 Das Fütterungsexperiment

Im Folgendem werden die Daten beschrieben, die während des Fütterungsexperimentes mit *Oncorhynchus mykiss* erhoben wurden. Dazu gehörten abiotische Wasserparameter sowie die Wachstumsdaten der Fische.

3.2.1 Abiotische Daten

Während des gesamten Fütterungsversuches wurden abiotische Parameter in der Anlage überwacht und protokolliert. In Abbildung 6 A sind die Entwicklung von Temperatur und pH-Wert sowie die Konzentration an Ammoniumionen dargestellt. Die Temperatur der Anlage war auf 20 °C eingestellt worden. Außenwitterungsbedingt wurde die regulatorische Kapazitätsgrenze der Versuchsanlage erreicht, daher betrug die Wassertemperatur bereits zu Beginn des Experimentes 22,3 °C. Eine technische Störung des Wärmetauschers führte zu einem Temperaturmaximum von 23,5 °C am dritten Tag des Versuches. Erst am Tag 15 konnte diese Störung endgültig behoben werden und die Wassertemperatur stellte sich weitestgehend auf Werte zwischen 19,8 und 20,1 °C ein. Der pH-Wert sank kontinuierlich während des Versuches von einem Startwert von 8,48 auf einen Endwert von 7,61. Der Ammoniumgehalt des Anlagenwassers schwankte im Versuchsverlauf zwischen $4,99 \mu\text{mol} \times \text{l}^{-1}$ (Maximum) und $13,64 \mu\text{mol} \times \text{l}^{-1}$ (Minimum).

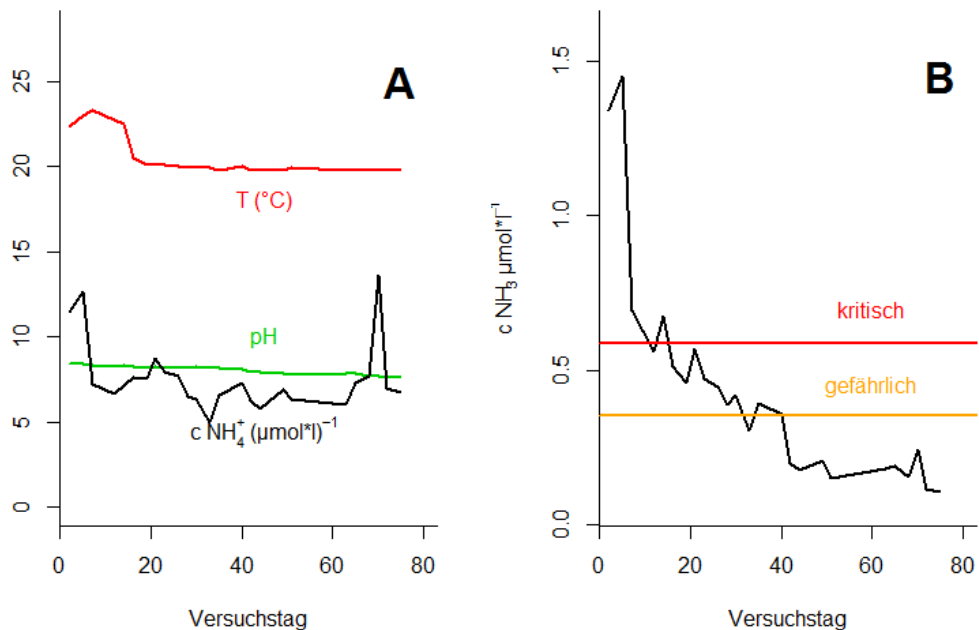


Abbildung 6: A: Messwerte der abiotischen Parameter pH-Wert und Temperatur, sowie die Ammoniumkonzentration in den Versuchsbecken. B: Verlauf der Ammoniakkonzentration im Wasser der Versuchsanlage während des Fütterungsversuches mit eingetragenen Grenzkonzentrationen nach (Schreckenbach, 2015) (orange und rote Waagerechte.)

Ammoniak steht in einem Temperatur und pH-Wert abhängigen Dissoziationsgleichgewicht mit Ammoniumionen. Die resultierende Ammoniakkonzentration im Wasser ist in Abbildung 6 B aufgetragen. Sie hatte ein Maximum von $1,45 \mu\text{mol} \times 1^{-1}$ am fünften Tag des Versuches. Anschließend fiel die Ammoniakkonzentration auf einen Minimumwert von $0,11 \mu\text{mol} \times 1^{-1}$ am 75. Tag des Experimentes.

3.2.2 Kontrolle der Testfuttermittel

Die Testfuttermittel wurden entsprechend der in Tabelle 3 vorgestellten Zusammensetzung hergestellt. Zur Absicherung wurden sie vor dem Einsatz noch einmal hinsichtlich ihrer Zusammensetzung überprüft. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle 8 dargestellt. Ziel war es die Testfuttermittel isokalorisch und isonitrogen zu gestalten. Mit Rohproteinwerten von 46,7 % Kontrollfuttermittel (K), 43,3 % Algensupplementiertes Testfuttermittel (A), 42,1 % Muschelsupplementiertes Testfuttermittel (M), 46,9 % Wurmsupplementiertes Testfuttermittel (W) und 49,9 % Algen- und Wurmsupplementiertes Testfuttermittel (AW), sowie Brennwerten von $23,6 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (K), $23,1 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (A), $22,4 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (M), $24,8 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (W) und $23,4 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ (AW) wurden diese Bedingung erfüllt. Durch die unter-

schiedliche Supplementierung der Versuchsfuttermittel fielen bestimmte Rohdatenwerte besonders auf. So war der Rohaschegehalt vom Versuchsfuttermittel M mit 18,3 % zum Teil mehr als doppelt so hoch wie in den anderen Futtermitteln. Das Futtermittel W wies mit 17,8 % den niedrigsten Rohfettwert auf. Alle anderen Testfuttermittel besaßen einen Fettgehalt von deutlich über 20,0 %.

Tabelle 8: Zusammensetzung der hergestellten Testfuttermittel bezüglich der Trockenmasse (TS); Doppelbestimmung; Kontrollfutter (K), Algenfutter (A), Muschelfutter (M), Wurmfutter (W) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW)

	K	A	M	W	AW
Rohwerte					
<i>% TS</i>					
RA	8,45	12,2	18,3	8,20	9,55
RP	46,7	43,3	42,1	46,9	42,9
RFe	23,2	28,0	27,3	17,8	21,9
RFa	4,16	2,54	3,17	3,53	3,80
NfE	17,5	14,0	9,13	23,6	21,9
Aminosäure					
<i>g × (16 g N)⁻¹</i>					
Thr	3,49	3,38	3,48	3,36	3,35
Lys	6,14	5,38	5,73	5,51	5,41
Arg	5,52	5,19	5,40	5,55	5,44
Cys	1,00	0,94	0,98	0,99	1,01
Met	1,86	1,81	1,95	1,74	1,68
Trp	0,77	0,78	0,71	0,77	0,82
Bruttoenergie					
<i>MJ × kg⁻¹</i>					
	23,6	23,1	22,4	24,8	23,4
Protein- Energie-Ratio					
<i>g × MJ⁻¹ TS</i>					
	19,8	18,7	18,8	18,9	18,3

Die Aminosäurezusammensetzung des Rohproteins zeigte keine auffälligen Unterschiede zwischen den Versuchsfuttermitteln. Allein der Lysingehalt im Protein des Kontrollfutters war mit $6,14 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ leicht erhöht gegenüber den anderen Testfuttermitteln.

3.2.3 Entwicklung der Versuchsfische

Die Versuchstiere wurden vor ihrem Einsatz in der Versuchsanlage zwei Tage ausgenüchert. Nach der Markierung wurden sie am 6. August 2015 in die Versuchsbekken eingesetzt und nach einer fünfstündigen Eingewöhnungsphase noch am selben Tag erstmals mit den Versuchsfuttermitteln gefüttert. Am 10. August wurde der erste Fisch tot aufgefunden (vergleiche Tabelle 9). Insgesamt starben 17 von 165 Fischen während des Versuches. Auf Grund der angesprochenen zunehmenden technischen Probleme wurde die Fütterung im Zeitraum vom 11.08. bis 17.08. eingestellt, um zusätzlichen Stress zu vermeiden. Nach Behebung der Probleme wurde am 18.08. die Fütterung zunächst mit der halben Ration und ab 19.08. wieder regulär aufgenommen.

Tabelle 9: Liste der im Versuchsverlauf verstorbenen Fische; Versuchsuntergruppen: Kontrollfutter (K1-3), Algenfutter (A1-3), Muschelfutter (M1-3, Wurmfutter (W1-3) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW1-3)

Datum	Becken	Versuchs- untergruppe	Fisch- kennzahl
10.08.2015	2	K2	2
	2	K2	5
	2	K2	9
	2	K2	n.v.
11.08.2015	3	K3	7
	12	A3	10
12.08.2015	2	K2	6
13.08.2015	10	A1	9
	10	A1	n.v.
14.08.2015	2	K2	5
15.08.2015	10	A1	n.v.
19.08.2015	2	K2	n.v.
	10	A1	n.v.
20.08.2015	8	AW2	n.v.
21.08.2015	12	A3	n.v.
	9	AW3	n.v.
30.08.2015	2	K2	n.v.

Der kumulative Futtermiteinsatz sowie die resultierende Fischmasseentwicklung sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Versuchsgruppe K hatte ein durchschnittliches Startgewicht von $864,0 \pm 83,0$ g pro Becken und erreichte ein Endgewicht von $2387,8 \pm 206,7$ g. Der dazugehörige Futtermiteinsatz betrug $1747,0 \pm 212,0$ g. Die Versuchsgruppe W startete mit einem Gewicht von $863,1 \pm 44,8$ g. Ihr Endgewicht am 75. Versuchstag betrug $2184,6 \pm 236,0$ g. Dazu wurden $1653,0 \pm 122,8$ g Futtermittel eingesetzt. Das Startgewicht der Gruppe AW betrug $841,0 \pm 40,2$ g. Sie erreichte ein Endgewicht von $2085,3 \pm 11,0$ g bei einem Futtermiteinsatz von $1598,0 \pm 6,9$ g. Die Gruppe A vollzog eine Masseentwicklung von $768,1 \pm 80,9$ g

auf $1919,9 \pm 153,6$ g bei einem Futtermiteinsatz von $1476,0 \pm 84,0$ g. Versuchsgruppe M steigerte die durchschnittliche Frischmasse von $854,8 \pm 41,1$ g auf $2216,2 \pm 127,9$ g. Der benötigte Futtermiteinsatz betrug $1598,0 \pm 6,9$ g.

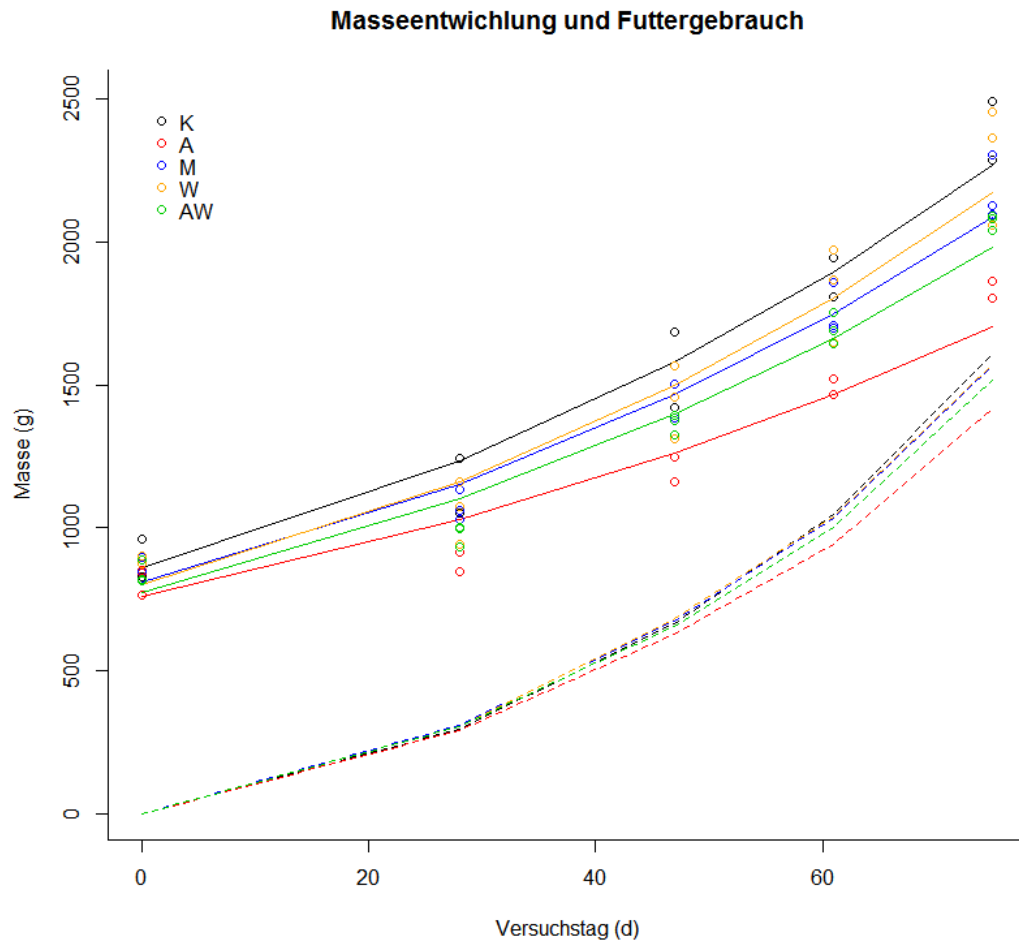


Abbildung 7: Interpolierte Entwicklung der Fischmasse in den Versuchsbecken der Kreislaufanlage (durchgezogene Linien) sowie der kumulative Futtermiteinsatz (gestrichelte Linien). A: Alge (n=2 Becken), AW: Alge + Wurm (n=3), K: Kontrolle (n=2), M: Muschel (n=3), W: Wurm (n=3).

Auf Grund der vorgenommenen Markierungen ließen sich die Gewichts- als auch die Längenzunahme der Versuchstiere individuell nachverfolgen. Da die Wachstumsrate ein relatives Maß ist und die Futtermenge an die Fischmassen in den Versuchsbecken angepasst war, konnten auch die Daten der Becken, in denen Fische gestorben waren, mit ausgewertet werden. Die Wachstumsraten (Massenzunahme) der Versuchsgruppen innerhalb der vier Versuchsintervalle werden in Abbildung 8 gezeigt. Allgemein ist zu sehen, dass die Wachstumsraten aller vier Testgruppen im ersten Versuchsintervall deutlich reduziert sind, im Vergleich zu den Wachstumsraten der drei Folgeintervalle. Zu Beginn zeigte die Versuchsgruppe K mit $1,10 \pm 0,04$ % (Gruppenminimum) die größte Wachstumsrate unter den Ver-

suchsgruppen. Sie erhöhte sich auf $1,95 \pm 0,15 \%$, im zweiten Intervall, fiel auf $1,63 \pm 0,47 \%$ im dritten Intervall und erreichte schließlich ein Maximum von $1,95 \pm 0,06 \%$ im vierten Intervall. Die Wachstumsrate der Versuchsgruppe A stieg im Laufe des Experimentes von $0,60 \pm 0,28 \%$ (Minimum) im ersten Intervall, auf $1,91 \pm 0,05 \%$ im zweiten Intervall (Maximum). Im dritten und vierten Intervall stagnierte der Zuwachs nahezu gleichbleibend bei $1,71 \pm 0,15 \%$ und $1,69 \pm 0,10 \%$.

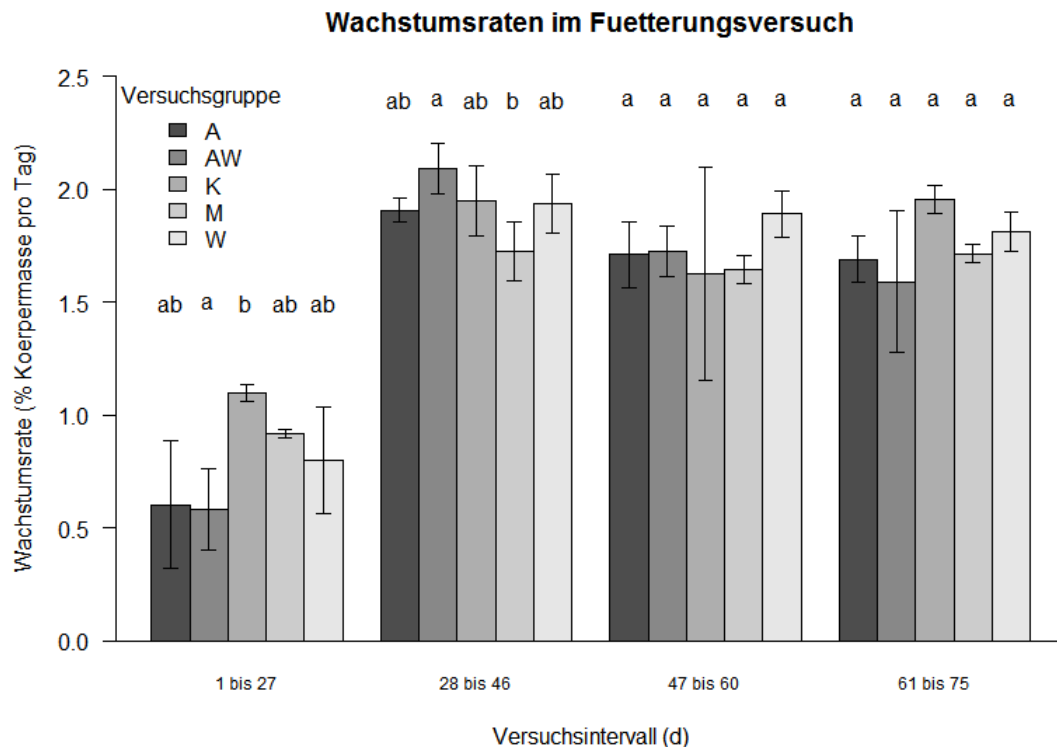


Abbildung 8: Wachstumsraten der einzelnen Versuchsgruppen innerhalb der vier Untersuchungsintervalle während des Fütterungsversuches. A: Alge, AW: Alge + Wurm, K: Kontrolle, M: Muschel, W: Wurm (n=3 Untergruppen für alle Versuchsgruppen). Wachstumsraten innerhalb eines Versuchsintervalles mit unterschiedlichen Überschriften weichen signifikant voneinander ab ($p \leq 0,05$; einfache ANOVA mit post-hoc-Test nach Tukey)

Die Testgruppe M wuchs zu Beginn des Versuches mit einer Rate von $0,92 \pm 0,02 \%$. In den folgenden Intervallen blieb sie mit $1,72 \pm 0,13 \%$, $1,64 \pm 0,06 \%$ und $1,72 \pm 0,04$ relativ konstant. Versuchsgruppe W wuchs anfänglich mit einer Rate von $0,80 \pm 0,24 \%$. Im zweiten Versuchsintervall wurde ein Maximum von $1,93 \pm 0,13 \%$ erreicht. In den beiden Folgeintervallen sank die Wachstumsrate wieder leicht ab. Sie erreichte $1,88 \pm 0,1 \%$ im dritten Intervall und sank im vierten abermals auf $1,81 \pm 0,09 \%$. Versuchsgruppe AW startete mit dem geringsten Wachstum aller Gruppen ($0,58 \pm 0,18 \%$). Im zweiten Intervall wuchs diese Gruppe mit der höchsten Wachstumsrate aller Gruppen während des Versuches ($2,10 \pm 0,11 \%$). Das Wachstum

reduzierte sich in den Folgeintervallen über $1,72 \pm 0,11 \%$ auf $1,59 \pm 0,31 \%$. Ein weiteres Maß für die Leistungsfähigkeit eines Futtermittels ist die Futtermittelumsatzrate FCR. Diese gibt das einfache Verhältnis von eingesetzter Futtermittelmasse zu gewonnener Fischmasse wieder. Abbildung 9 stellt die Umsatzraten der einzelnen Versuchsgruppen über den gesamten Versuch hinweg dar.

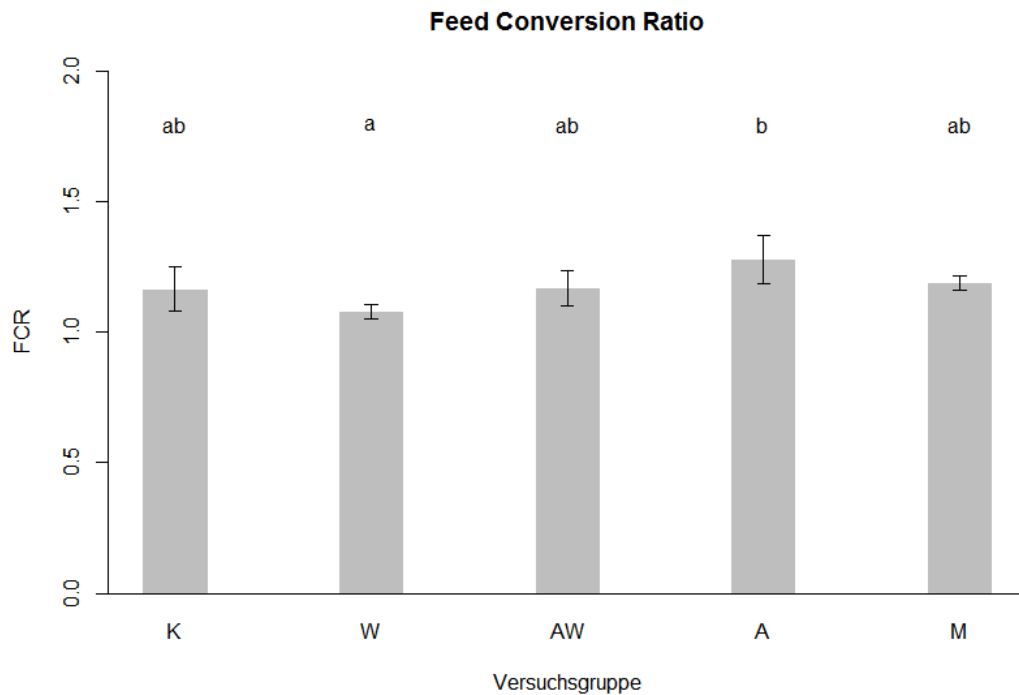


Abbildung 9: Die Feed-Conversion-Ratio zeigt den Futtermittelumsatz der einzelnen Versuchsgruppen während des Fütterungsexperimentes (n=3 Untergruppen für alle Versuchsgruppen). Die Werte geben den benötigten Futtermiteleinatz pro erzeugtem kg Fischmasse wieder. Mittelwerte mit unterschiedlichen Überschriften weichen signifikant voneinander ab ($p \leq 0,05$; einfache ANOVA mit post-hoc-Test nach Tukey).

Die Kontrollversuchsgruppe setzte das Futter im gesamten Versuchszeitraum mit einer Rate von $1,17 \pm 0,08$ um. Es gab keinen signifikanten Unterschied zu einer der Testgruppen. Versuchsgruppe A erreichte eine Umsatzrate von $1,28 \pm 0,09$ und unterschied sich damit signifikant von der Versuchsgruppe W mit einer Umsatzrate von $1,08 \pm 0,03$. Die Versuchsgruppen AW und M zeigten Umsatzraten von $1,17 \pm 0,07$ und $1,19 \pm 0,03$. Die Proteinretention konnte nur für einzelne Becken berechnet werden, in denen keine Versuchstiere gestorben waren. Die Kontrollgruppe erreichte einen Proteinrückhalt von 31,3 % (n=1). Gruppe W erreichte einen Rückhalt von $30,3 \pm 1,4 \%$ (n=3). Die Gruppen A und AW zeigten mit Retentionen von 27,1 % (n=1) und 28,5 % (n=1) die niedrigsten Werte. Gruppe M erreichte eine Proteinretention von $29,3 \pm 0,9$ (n=3).

3.3 Schlachtdaten, Weender-Analyse und Aminosäuremuster der Forellen

Nach der Schlachtung der Versuchstiere wurden morphologische und biochemische Eigenschaften der Versuchstiere gemessen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

3.3.1 Schlachtdaten

Am Ende des Fütterungsversuches erfolgte die Schlachtung der Versuchstiere. Die erhobenen Körpermerkmale und ihre Varianz werden in Abbildung 10 und Abbildung 11 als Box-Whisker-Plot gezeigt. So betrug der Median des KI der Versuchstiere vor dem Experiment 1,06 bei einem Interquartilabstand (IQA) von 1,04 bis 1,17 (n=3) und unterschied sich damit signifikant vom KI der Versuchsgruppen K (n=15) und W (n=18) am Ende des Experimentes. Den niedrigsten KI der Versuchsgruppen hatte die Gruppe A (n=18) mit 1,36 mit einem IQA zwischen 1,33 und 1,42. Den höchsten KI erreichte Versuchsgruppe W mit 1,50 bei einem IQA von 1,37 bis 1,53. Es gab keinen signifikanten Unterschied der Konditionsindices zwischen den Versuchsgruppen. Der Anteil des Eingeweidefettes an der Körpermasse der Versuchstiere hat sich während des Fütterungsversuches nicht geändert (vergleiche Abbildung 10 B). Die Nullprobe unterschied sich mit 0,99 % und einem IQA von 0,98 bis 1,84 nicht signifikant von den Versuchsgruppen, die Werte von 2,45 bis maximal 2,84 % erreichten. Auch zwischen den Versuchsgruppen gab es keinen signifikanten Unterschied im Gehalt des Eingeweidefettes.

Abbildung 11 A zeigt den Anteil des Schlachtkörpers (ohne Kopf) am Gesamtfisch. Die Kontrollgruppe unterschied sich mit 65,9 % und einem IQA zwischen 64,1 und 69,6 % nicht signifikant von der Nullprobe mit einem Median von 66,3 % bei einem IQA zwischen 65,4 und 69,3 %. Mit Werten von 63,4 % (IQA zwischen 61,9 und 64,3 %) sowie 63,5 % (IQA zw. 61,1 und 64,0 %) unterschieden sich die Versuchsgruppen A und AW signifikant von den anderen Gruppen. Abbildung 11 B zeigt den Hepatosomatischer Index (HSI). Der Leberanteil macht übergreifend über alle Versuchsgruppen als auch der Nullprobe im Median etwa 1,4 % aus. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen oder zur Nullprobe.

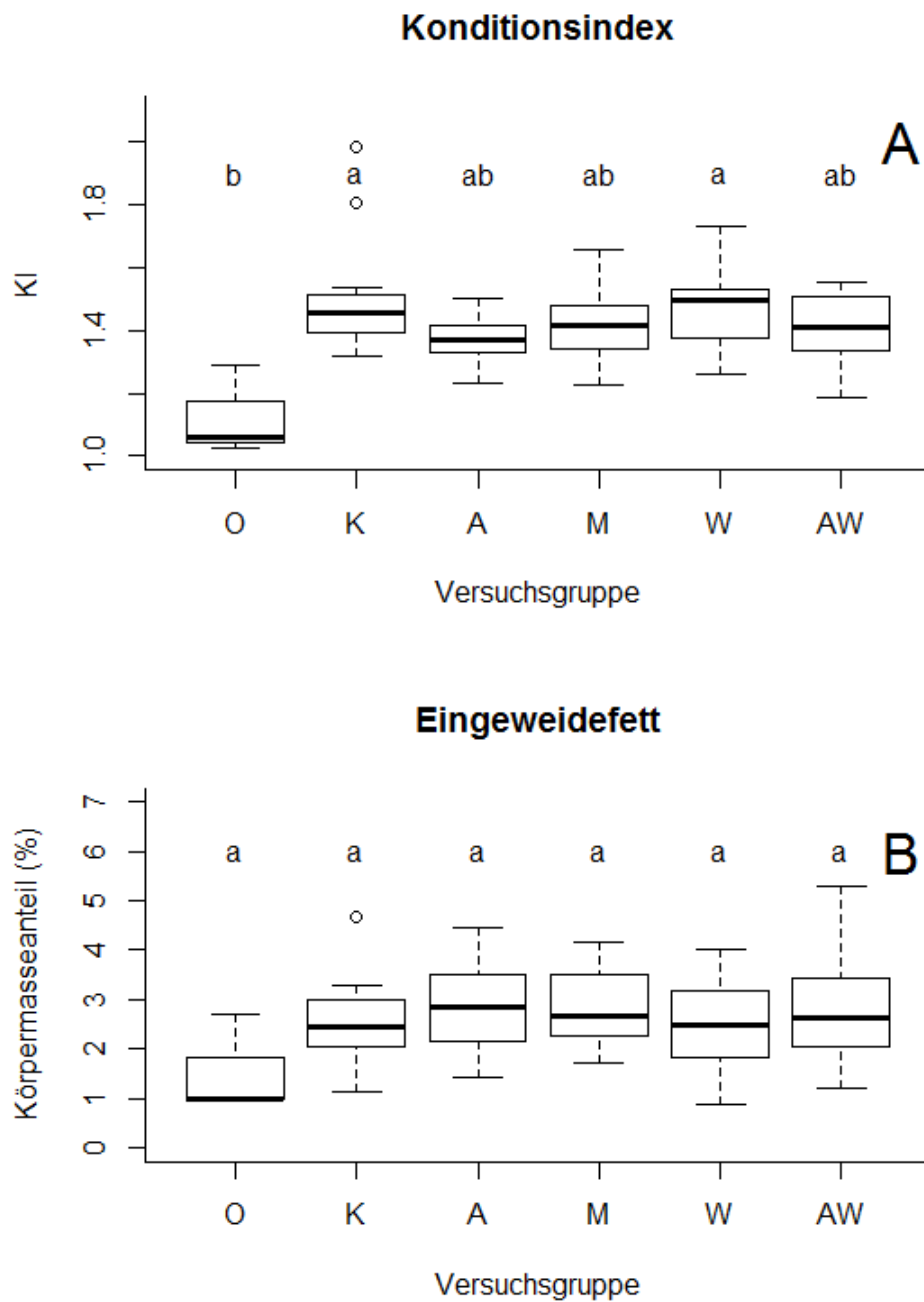


Abbildung 10: Box-Whisker-Plot zu Schlachtdaten der Versuchsfische. Dargestellt sind Konditionsindex und Eingeweidefettanteil. O: Nullprobe (n=3 Fische), K: Kontrolle (n=15), A: Alge (n=18), M: Muschel (n=18), W: Wurm (n=18), AW: Alge + Wurm (n=18). Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).

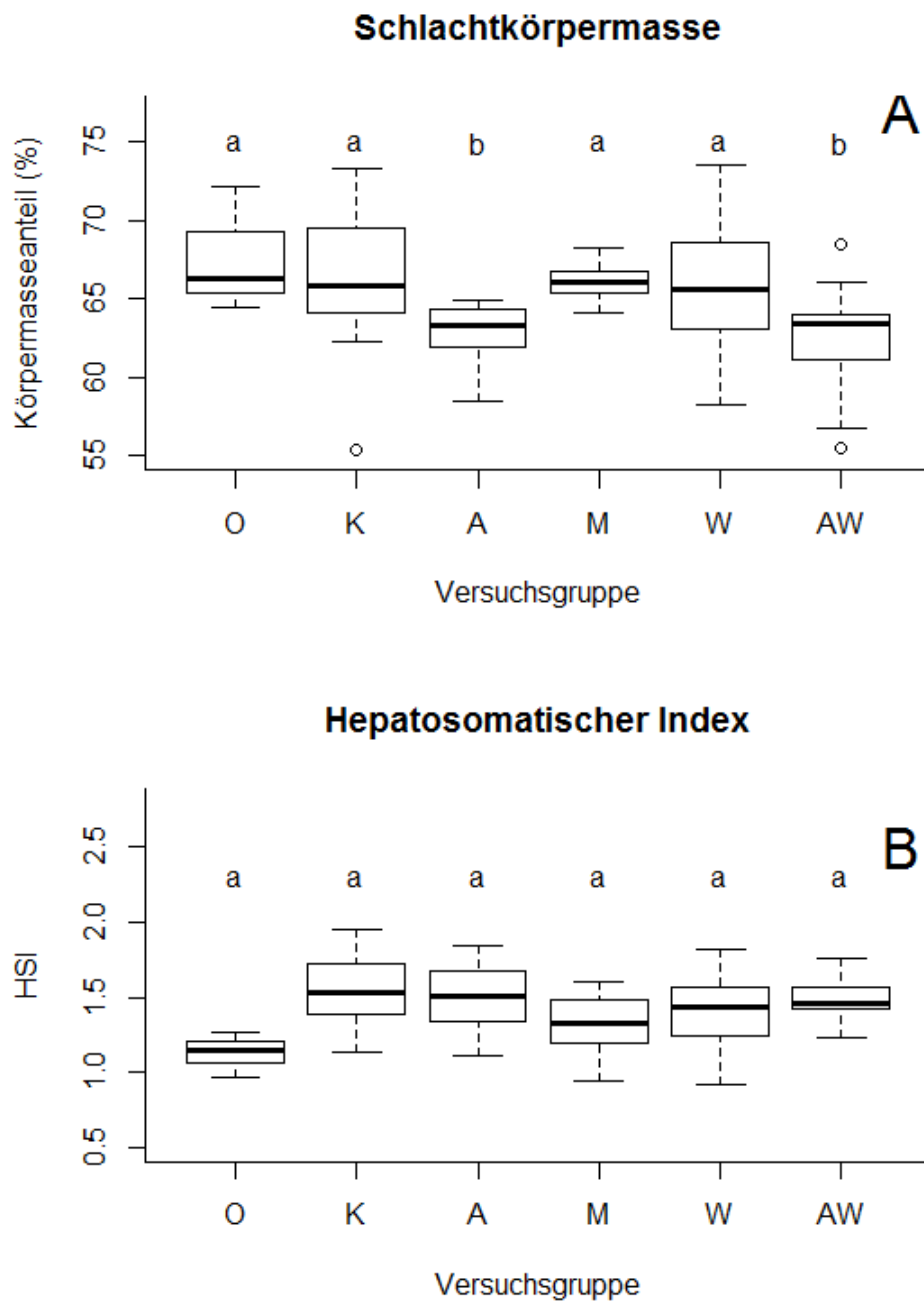


Abbildung 11: Box-Whisker-Plots zu Schlachtdaten der Versuchsfische. Dargestellt sind Anteile der Schlachtkörpermasse (ohne Kopf) am Gesamtfisch sowie der hepatospmatische Index (HSI). O: Nullprobe (n=3 Fische), K: Kontrolle (n=15), A: Alge (n=18), M: Muschel (n=18), W: Wurm (n=18), AW: Alge + Wurm (n=18). Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal - Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).

3.3.2 Gustatorische Testung

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die Einzelbewertungen sowie die Gesamtbenotung der gustatorischen Testung der Versuchsfische dargestellt.

Tabelle 10: Benotung der gustatorischen Testung gekochter Proben der Kontrollgruppe (K) vor und nach der Ausnüchterung (Aus.); 1 (sehr gut), 2 (gut), 3 (befriedigend), 4 (ausreichend), 5 (ungenügend)

Kriterium \ Gruppe	K vor Aus.			K nach Aus.		
	Geruch	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
Geschmack	3,0	2,0	4,0	2,0	3,0	1,0
Struktur	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Mittelwert	2,3	2,3	2,7	2,0	2,3	1,7
Gesamtnote	2,4			2,0		

Tabelle 11: Benotung der gustatorischen Testung geräucherter Proben der Versuchsgruppen nach der Ausnüchterung; 1 (sehr gut), 2 (gut), 3 (befriedigend), 4 (ausreichend), 5 (ungenügend); Algenfutter (A), Muschelfutter (M), Wurmfutter (W) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW)

Kriterium \ Gruppe	A				M			
	Geruch	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Geschmack	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	3,0	2,0	2,0
Struktur	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	2,0
Mittelwert	2,3	1,7	1,7	2,0	2,0	2,7	2,3	2,3
Gesamtnote	2,4				2,0			
Kriterium \ Gruppe	W				AW			
	Geruch	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
Geschmack	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Struktur	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0
Mittelwert	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	2,0	1,3	2,0
Gesamtnote	1,3				1,4			

Die Ausnüchterung im aufgesalzenem Leitungswasser führte zu einer leichten Verbesserung der sensorischen Bewertung des Fischfleisches von 2,4 auf 2,0. In der Endprodukttestung erhielten die Fische Bestnoten (1,3 und 1,4), die zuvor mit hohen Wurmanteilen im Futter (W und AW) gefüttert wurden. Auch die Versuchsgruppen Algenfutter (A) und Muschelfutter (M) schnitten gut ab (2,4 und 2,0).

3.3.3 Weender- und Aminosäureanalysen

Nach Möglichkeit wurden die zwei größten und die zwei kleinsten Tiere jeder Versuchsuntergruppe nach der Schlachtung biochemisch weiter untersucht. Je ein großer und ein kleiner Fisch pro Versuchsuntergruppe wurden als ganzer Fisch bzw. als Filetprobe analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen für einzelne ganze Tiere sind in Tabelle 12 dargestellt. Der Rohproteingehalt der Versuchsgruppen war gegenüber der Nullprobe erniedrigt. Die Aminosäurekomposition des Rohproteins der gezeigten Gruppen wies keine Unterschiede auf, die über natürliche Schwankungen hinausgehen. Der Proteinrückhalt der Versuchsgruppen ist in Tabelle 13 dargestellt und lag rechnerisch zwischen 27 % (Algenfutter) und 31 % (Kontrollfutter).

Tabelle 12: Rohwerte und Aminosäuregehalte einzelner ganzer Versuchsfische (K: Kontrolle, A: Alge, AW: Alge + Wurm, M: Muschel, W: Wurm) im Vergleich zur Nullprobe (O) und zum Literaturwert (R) (Wilson und Cowey, 1985); Doppelbestimmung

	R	O	K	A	M	W	AW
Rohwerte (% TS)							
RA	n.v.	8,53	5,95	7,63	5,78	8,64	8,06
Rohprotein (RP)	n.v.	61,5	47,9	53,6	49,4	54,4	54,0
AS ($g \times (100 g AS)^{-1}$)							
Asx	9,94	10,1	10,1	9,84	9,88	10,1	10,0
Thr	4,76	4,49	4,56	4,70	4,54	4,49	4,54
Ser	4,66	4,57	4,39	4,48	4,40	4,54	4,33
Glx	14,2	14,7	14,5	14,5	14,3	14,5	14,8
Gly	7,76	8,70	7,46	7,66	7,84	8,77	7,85
Ala	6,57	6,43	6,32	6,41	6,31	6,62	6,61
Val	5,09	4,80	5,14	5,01	4,42	5,00	5,05
Ile	4,34	4,28	4,39	4,21	4,33	4,07	4,28
Leu	7,59	7,32	7,62	7,49	8,34	7,23	7,38
Tyr	3,38	3,08	3,07	3,40	3,48	2,84	3,13
Phe	4,38	4,03	4,27	4,25	4,41	4,10	4,28
His	2,96	3,30	3,67	3,74	3,41	3,35	3,67
Lys	8,49	8,51	9,13	8,87	8,78	8,49	8,96
Arg	6,41	6,67	6,61	6,91	6,82	6,79	6,93
Pro	4,89	4,51	4,21	3,72	4,09	4,78	3,79
Cys	0,80	1,15	1,23	1,22	1,21	1,11	1,15
Met	2,88	3,30	3,01	3,51	3,44	3,19	3,25
Trp	0,93	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Für die wichtigsten muskelproteinbildenden Aminosäuren ist eine statistische Analyse der erhobenen Daten in Tabelle 14 dargestellt. Weder die Ganzfischproben noch die Filets der Versuchsgruppen zeigten einen signifikanten Unterschied im Gehalt der gezeigten Aminosäuren. Die Ganzfischproben enthielten 4,49-4,76 und

$g \times (16 g N)^{-1}$ Threonin, 8,49-9,13 $g \times (16 g N)^{-1}$ Lysin, 6,41-6,93 $g \times (16 g N)^{-1}$ Arginin, 0,8 - 1,23 $g \times (16 g N)^{-1}$ Cystein sowie 2,88-3,51 $g \times (16 g N)^{-1}$ Methionin.

Tabelle 13: Proteinretention in den Becken der Versuchsgruppen; Kontrollgruppe: K (n=1), Algenfutter: A (n=1), Muschelfutter M (n=3), Wurmfutter: W (=3), Algen-Wurm-Mischfutter: AW (n=1)

Versuchsgruppe	K	A	M	W	AW
Proteinretention	31,3	27,1	29,3 ± 1,0	30,3 ± 1,4	28,5

Tabelle 14: Gehalte von Rohprotein (% TS), sowie wichtiger muskelproteinbildender Aminosäuren ($g \times (16 g N)^{-1}$) der Versuchsfische der einzelnen Futtermitteltestgruppen gemessen im ganzen Fisch als auch im Filet; O (Nullprobe, n=3), K (Kontrollfutter, n=10), A (Algenfutter), M (Muschelfutter), W (Wurmfutter), AW (Algen-Wurm-Mischfutter); Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).

Kompartiment	O	K	A	M	W	AW
ganzer Fisch						
RP	61,9 ± 0,38 ^a	48,9 ± 1,55 ^b	50,4 ± 2,53 ^{ab}	48,8 ± 2,55 ^b	52,6 ± 3,91 ^{ab}	50,3 ± 4,36 ^{ab}
RA	9,10 ± 0,51 ^a	6,39 ± 0,60 ^b	7,14 ± 0,92 ^{ab}	6,59 ± 1,66 ^b	7,50 ± 0,98 ^{ab}	7,27 ± 0,84 ^{ab}
Thr	3,89 ± 0,10	4,17 ± 0,12	4,12 ± 0,08	4,06 ± 0,06	4,12 ± 0,17	4,17 ± 0,17
Lys	7,50 ± 0,30	8,13 ± 0,16	7,90 ± 0,31	7,66 ± 0,14	7,67 ± 0,29	7,97 ± 0,37
Arg	5,78 ± 0,07	6,11 ± 0,16	6,00 ± 0,16	5,92 ± 0,06	6,01 ± 0,19	6,17 ± 0,36
Cys	0,99 ± 0,01	1,08 ± 0,04	1,06 ± 0,04	0,97 ± 0,22	1,03 ± 0,04	1,07 ± 0,04
Met	2,91 ± 0,03	2,96 ± 0,08	2,98 ± 0,08	2,69 ± 0,05	2,93 ± 0,04	2,95 ± 0,03
Filet						
RP	n.v.	74,9 ± 5,22	76,1 ± 4,23	73,7 ± 1,60	71,6 ± 4,98	70,7 ± 4,45
RA	n.v.	5,70 ± 0,43	5,62 ± 0,36	5,52 ± 0,23	5,79 ± 0,40	5,75 ± 0,43
Thr	n.v.	4,34 ± 0,15	4,39 ± 0,14	4,32 ± 0,07	4,25 ± 0,12	4,26 ± 0,05
Lys	n.v.	9,11 ± 0,58	9,20 ± 0,30	9,01 ± 0,24	8,97 ± 0,38	9,18 ± 0,17
Arg	n.v.	5,78 ± 0,32	5,93 ± 0,18	5,78 ± 0,11	5,75 ± 0,13	5,97 ± 0,14
Cys	n.v.	1,15 ± 0,03	1,14 ± 0,02	1,18 ± 0,02	1,13 ± 0,02	1,16 ± 0,01
Met	n.v.	3,17 ± 0,09	3,16 ± 0,03	3,17 ± 0,05	3,17 ± 0,04	3,21 ± 0,03

Die Filets wiesen Threoningehalte von $4,25 \pm 0,12$ - $4,39 \pm 0,14 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ auf. Der Gehalt an Lysin betrug $8,97 \pm 0,38$ - $9,20 \pm 0,3 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$. Ebenso enthielten sie $5,75 \pm 0,13$ - $5,97 \pm 0,14 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Arginin, $1,13 \pm 0,02$ - $1,18 \pm 0,02 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Cystein sowie $3,16 \pm 0,03$ - $3,21 \pm 0,03 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Methionin.

Hauptkomponentenanalyse der AS-Muster der Forellen

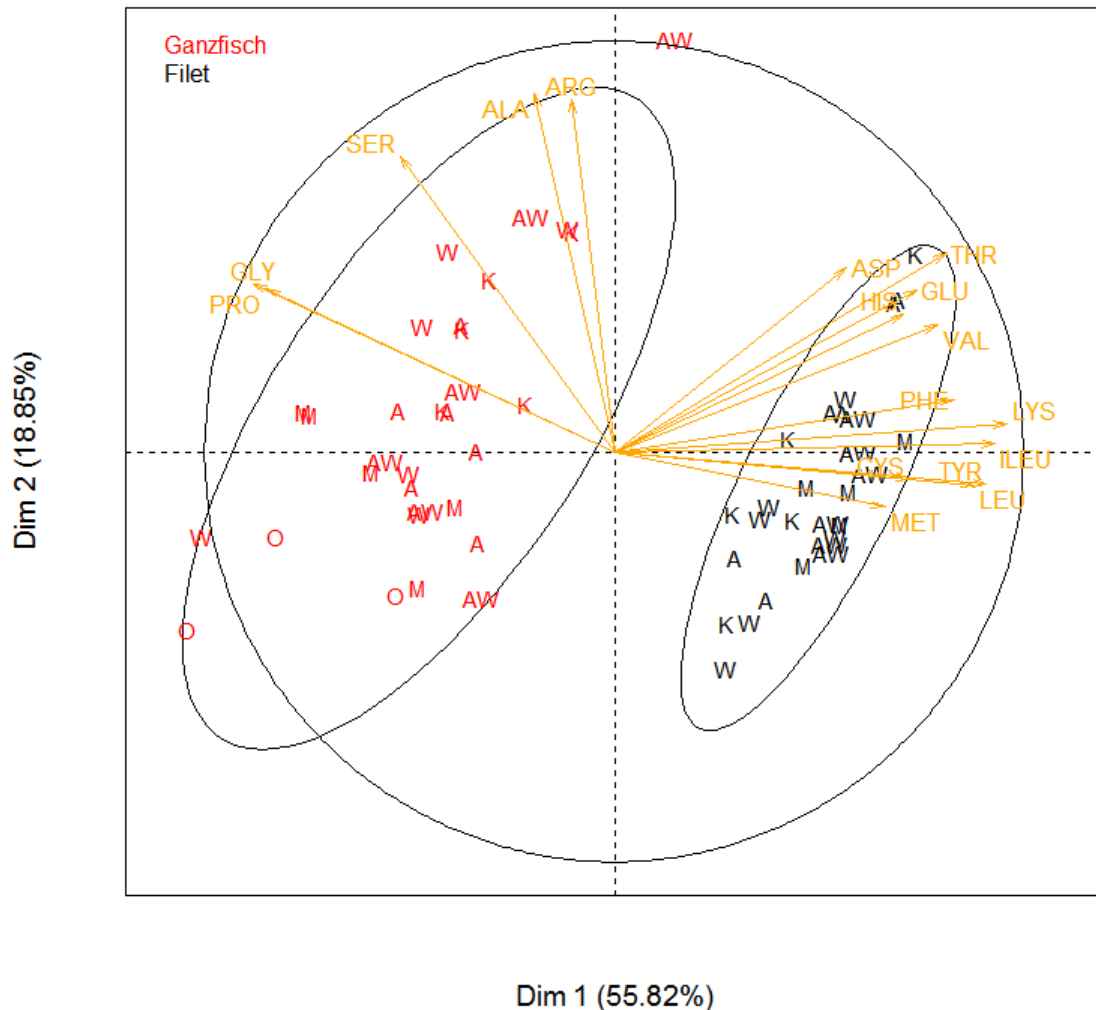


Abbildung 12: Hauptkomponentenanalyse der Aminosäuremuster der untersuchten Fischkompartimente; schwarze Ellipsen zeigen die Vertrauensintervalle der Gruppen auf einem Niveau von 95 %; Unterschiede zwischen den Gruppen werden durch die orangefarbenen Pfeile dargestellt; O (Nullprobe, n=3), K (Kontrollfutter, n=10), A (Algenfutter), M (Muschelfutter), W (Wurmfutter), AW (Algen-Wurm-Mischfutter)

Mit der Verwendung aller in den Fischen gemessenen Aminosäuren konnte eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) dieser Muster durchgeführt werden. Abbildung 12 zeigt die Clusterung der als Ganzes und als Filet vermessenen Proben der einzelnen Versuchsgruppen. Auffällig ist, dass die Proben ganzer Fische weiter

streuen als die der Filets. Dennoch lassen sich beide Cluster durch Vertrauensintervalle auf einem Niveau von 95 % eindeutig trennen. Die Trennung der Cluster erfolgt hauptsächlich in der Ersten Dimension, die 55,82 % der Unterschiede erklärt. Sehr bestimmend im Ganzfischcluster sind die Aminosäuren Prolin und Glycin. Die Verschiebung zum Filetcluster wird maßgeblich von den Aminosäuren Lysin, Tyrosin, Leucin, Isoleucin, Methionin, Phenylalanin und Cystein bestimmt.

4 Diskussion

4.1 Futtermittelwertigkeit der Testorganismen

Futtermittel sind in der Aquakultur das wichtigste Produktionsmittel. Ihre Qualität entscheidet maßgeblich über den Fütterungserfolg und die Produktqualität. Fische gelten allgemein als gute Futtermittelverwerter und können so helfen, den Proteinbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung nachhaltig zu decken, wenn die verwendeten Futtermittel entsprechend hergestellt werden. *Oncorhynchus mykiss* ist, als carnivorere Speisefisch, für eine gute Wachstumsleistung in der Aquakultur, auf hochwertiges Futter angewiesen. Die Zusammensetzung eines Futtermittels ist abhängig von Menge und Qualität der gewählten Zutaten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analysen der Testorganismen hinsichtlich ihrer Futtermittelwertigkeit für die Forellenaquakultur diskutiert. Es wurde bereits gezeigt, dass die Proteinquelle (Wacyk *et al.*, 2012) als auch die Protein Energie Ratio (Cho und Kaushik, 1990; Ruohonen *et al.*, 1998) einen Einfluss auf die Proteinverwertung der Forelle haben. Als optimal (bezüglich der Stickstoffretention) wird eine Ratio von etwa 22-25 g verwertbarem Protein pro MJ verwertbare Energie beschrieben (Cho, 1992; Cho und Kaushik, 1990). Zur Abschätzung der verdaulichen Energie bzw. des verdaulichen Proteingehaltes sind stoff- und tierspezifische Apparent Digestibility Coefficient (ADC)'s notwendig, die für viele hier verwendete Substanzen nicht bekannt sind. Üblicherweise wird in der Praxis ein fertiges Mischfutter getestet und daraus die verwertbaren Anteile in dem Futter berechnet. Durch den Aufbau der Versuchsanlage bedingt konnten die Ausscheidungen der Versuchstiere nicht hinreichend gesammelt und untersucht werden. Daher kann an dieser Stelle nicht mit einschlägiger Fachliteratur verglichen werden. Um wenigstens einen Überblick zu gewinnen, wurden Protein-Energie-Ratios in dieser Arbeit unter Verwendung des Rohproteinwertes sowie der Bruttoenergiedichte berechnet. Ohnehin beschränken sich Herstellerangaben von Futtermitteln für Fische meist auf die Angabe der Rohwerte, wie sie die Weender-Analyse liefert, sowie die Angabe der Bruttoenergie. Laut NRC (2012) sollte ein adäquates Alleinfuttermittel einen verwertbaren Proteingehalt von mindestens 38 % TS sowie eine Energiedichte von mindestens $17,6 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ aufweisen. Mit Proteingehalten von über 60 % und Energiedichten von über $18,0 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$ wurden diese Anforderungen, absolut betrachtet, nur durch die getesteten Wurmspezies *Hediste diversicolor* und *Alitta virens* erfüllt, wenn man annimmt, dass die enthaltene Energie zu wenigstens 98 % verwertet werden kann. Dies befähigt beide Wurmspezies grundsätzlich zum Einsatz als Hauptkomponente in einem Alleinfuttermittel für Regenbogenforellen. Allerdings

war die Protein-Energie-Ratio mit über $30 \text{ g} \times \text{MJ}^{-1}$ zu hoch, so dass einem Alleinfuttermittel auf Wurmbasis eine weitere gut verwertbare, nicht proteinbasierte Energiequelle zugefügt werden sollte, um N-Verluste durch den Energiegewinn aus dem oxidativen Aminosäureabbau zu minimieren. Die Alge *Delesseria sanguinea* und die Muschel *Mytilus spp.* sind in der hier verwendeten Verarbeitungsform allein wegen des zu geringen Rohproteingehaltes von unter 20 % von vornherein als Zutaten zu betrachten, die nicht als Hauptkomponente eingesetzt werden können.

Es ist bekannt, dass für die Forelle die selben zehn Aminosäuren essentiell sind wie für den Menschen (Hardy, 2002). Hardy (2002) macht außerdem Vorschläge für Mindestgehalte an essentiellen Aminosäuren im Forellenfutter. Die für die Muskelfleischbildung wichtigen Aminosäuren Threonin (0,8 % TS), Arginin (2,0 % TS), Lysin (1,8 % TS), Methionin + Cystein (1,4 % TS) sowie Tryptophan (0,2 % TS) sollten daher entsprechend dieser Angaben in der Forellennahrung enthalten sein um ein gesundes Wachstum zu gewährleisten. Diese Angaben schwanken leicht je nach Quelle. So empfiehlt (NRC, 2012) mindestens folgende Aminosäuregehalte in der Forellennahrung: Threonin (1,1 % TS), Arginin (1,5 % TS), Lysin (2,4 % TS), Methionin + Cystein (1,1 % TS) sowie Tryptophan (0,3 % TS). Hintergrund für unterschiedliche Bedarfsangaben könnte die Verfügbarkeit der einzelnen Aminosäuren in den Proteinquellen der vorangegangenen Studien sein. Hardy (2002) gibt dafür exemplarisch die Spanne für den ermittelten Argininbedarf in den Studien von Kaushik (1979) mit 1,2 % und Ketola (1983) mit 2,8 % an. Zudem geht aus NRC (1993) hervor, dass der Bedarf der essentiellen Aminosäuren im Futter bei Jungfischen größer ist als bei adulten Regenbogenforellen. Laut Hardy (2002) sollten folgende Anteile an Aminosäuren im Protein eines Forellenfutters enthalten sein: Threonin (2,0 % RP), Arginin (5,0 % RP), Lysin (4,5 % RP), Methionin + Cystein (3,5 % RP) sowie Tryptophan (0,5 % RP). Des Weiteren sollten die verbliebenen essentiellen Aminosäuren Histidin, Isoleucin, Leucin, Phenylalanin und Valin in den Konzentrationen 2,8 % RP, 2,0 % RP, 3,5 % RP, 4,5 % RP und 3,2 % RP enthalten sein.

Die Zusammensetzung des Proteins der Testorganismen zeigte in dieser Arbeit untereinander einige Unterschiede für die Gehalte an essentiellen Aminosäuren (siehe Tabelle 6). So besaß das Protein von *Hediste diversicolor* die höchsten Gehalte an Lysin ($6,5 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$) sowie Leucin ($6,6 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$). In beiden Fällen waren die Gehalte um mindestens $0,8 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ höher als bei den anderen Organismen. Dafür war der Arginingehalt mit $3,7 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ um mindestens $2,0 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ geringer. Mit $2,0 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ verfügte *Mytilus spp.* über den höchsten Methioningehalt im Protein. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass

alle benötigten essentiellen Aminosäuren in den Proteinen der Testorganismen hinreichend vertreten waren, um sie in der Futtermittelproduktion einsetzen zu können. Im Jahresverlauf schwankte der Proteingehalt von *Mytilus spp.* zwischen 10 und 13 % TS. Damit liegt der Proteingehalt nach FAO Maßstäben an der unteren Grenze der Definition als Proteinquelle ($RP \geq 10\%$ in festen Futtermitteln). Diese Schwankungen resultieren vermutlich aus dem Auf- und Abbau von Reservestoffen im Verlauf des Jahres (Hummel *et al.*, 1989). Der Proteingehalt der Rotalge *Delesseria sanguinea* sank im Jahresverlauf kontinuierlich von 22,0 auf 19,2 % TS ab. Die blattartigen Thallusteile wurden in den Herbstmonaten soweit degeneriert, dass nur die Mittelrippen als Überdauerungsorgan verbleiben. Dieser Prozess könnte die Proteinabnahme erklären und macht eine Ernte in den Wintermonaten ineffizient. Die Veränderung des Proteingehaltes von *Hediste diversicolor* im Jahresverlauf konnte nicht eindeutig erfasst werden. Nach der beschriebenen Methodenumstellung konnte der Ascheanteil, der aus ingestierten Sediment resultierte, verringert werden. Entsprechend stieg der gemessene Proteingehalt auf mindestens 60 % TS. Die für die Muskelbildung wichtigen Aminosäuren zeigten nur geringe Schwankungen von höchstens 17 % Standardabweichung vom Jahresmittel (vgl. Tabelle 7) für alle untersuchten Organismen. Dies ist ein erster Hinweis auf eine gleichbleibende Proteinqualität im Jahresgang. Eine multidimensionale Skalierung der gemessenen Aminosäuremuster bestätigt die Ähnlichkeit der Proteinzusammensetzungen der Testorganismen (vgl. Abbildung 5), sowohl untereinander als auch im Jahresverlauf. Hier clusterten die Wurmproben zusammen mit den Algenproben und das Muschelcluster zeigte teils eine höhere innere Streuung als Abstände zu den anderen Organismen. Zudem zeigte ein R^2 von 0,82 eine relativ geringe Bestimmtheit der Trennung zwischen den Proben. Bis auf die Rotalge (*Delesseria sanguinea*), die im Winter degeneriert, könnten die untersuchten Organismen also ganzjährig Protein von guter Qualität liefern.

Neben Proteingehalt, Proteinqualität und Energiedichte entscheidet auch die Zusammensetzung und der Gehalt an Rohasche über die Futtermittelwertigkeit. Ein zu hoher Anteil an HCl unlöslicher Asche gilt allgemein als verdauungsstörend (Meyer, 2014). Die gemessenen Werte der Testorganismen von $\leq 3,8\%$ TS gelten als unproblematisch (Atkinson *et al.*, 2011). Nachteilig ist die hohe Calciumkarbonatkonzentration in der Schale der Muschel. Dieses reagiert mit der Salzsäure im Magen der Forellen, das senkt den pH-Wert und setzt somit die Verdaulichkeit anderer Nährstoffe herab. Daher ist der Einsatz von untermaßigen, ganzen Miesmuscheln von jeher auf höchstens 45 % beschränkt, wie bereits Versuche von Berge und Austreng (1989) zeigten.

Für viele Organismen sind Kohlenhydrate wichtige Reservestoffe und Energieträger. Pflanzen, wie Weizen etwa speichern die Glucose aus der Photosynthese als Stärke in den Samen. Kohlenhydrate aller Art, die nicht zur Rohfaser gehören, sind Bestandteil der NfE Fraktion der Weender-Analyse. Bei der Miesmuschel und den Wurmspezies handelt es sich hierbei hauptsächlich um gelöste Zucker und Glycogen als Reservestoff (Hummel *et al.*, 1989; Pellerin-Massicotte *et al.*, 1994). Die NfE Fraktion von *Delesseria sanguinea* ist mit einem Anteil von 51,1 % die Größte der drei Testorganismen. Es wird angenommen, dass der Hauptbestandteil dieser Fraktion, wie bei anderen Rotalgenarten auch, das Speicherpolysaccharid Florideenstärke ist (Väinölä und Strelkov, 2011). Auch die sulfatierten Polysaccharide der Zellwände gehören zur NfE Fraktion (Potin *et al.*, 1992). Der Gehalt an Florideenstärke unterliegt außerdem saisonalen Schwankungen und ist laut Grünwald und Alban (2009) im Frühjahr am Niedrigsten. Allgemein verfügt die Forelle, als carnivorer Fisch, nur über eine geringe Verdauungsleistung von Stärke. Vor allem Rohstärke ist problematisch, da sie die Amylaseaktivität in den Verdauungssäften hemmt (Spannhof und Plantikow, 1983). Des Weiteren wird die Darmpassage beschleunigt, so dass die Zeit zur Resorption von Nährstoffen sinkt. Zur konkreten Verdaulichkeit der genannten rotalgenspezifischen Kohlenhydrate für die Forelle liegen bisher keine Daten vor.

Rohfettwerte konnten im Laufe dieser Studie nur in den Proben von *Alitta virens* in nennenswerter Menge nachgewiesen werden. Die verwendeten Tiere stammten aus einer kommerziellen Aquakultur. Ihr Fettgehalt von 7,5 % TS war nach Umrechnung mit den Frischmassewerten der Freilandproben von Pellerin-Massicotte *et al.* (1994) vergleichbar. Sie stellten für Wildpopulationen Werte zwischen 0,8 und 2,3 $mg \times g^{-1}$ Frischmasse fest. Es wurde der durchschnittliche Wassergehalt von 88 % gemäß der Messungen von Neilsen *et al.* (1995) angenommen. Dies entspräche Rohfettwerten zwischen 0,7-1,9 % TS. Allerdings betragen die Proteinwerte bei gleicher Frischmassekorrektur 5-20 % TS. Dies wäre vergleichsweise niedrig und könnte auf mitgemessenen Darminhalt zurückzuführen sein. Eine weitere Korrektur um den Faktor 3 zum Ausgleich des Rohproteingehaltes auf die in dieser Arbeit festgestellten 60 % TS, ergäbe Rohfettwerte zwischen 2-6 % TS. Es ist davon auszugehen, dass die gekauften Würmer sich auf Grund der Aufzuchtbedingungen in einem guten Ernährungszustand befanden. Für *Hediste diversicolor* konnten auf Grund zu geringen Probenmateriales keine Fettwerte erhoben werden. Eine Studie von Phillips Dales (1957) zeigte allerdings, dass diese im Freiland durchschnittlich 17 $mg \times g^{-1}$ Frischmasse betragen können. Damit erscheint *Hediste diversicolor* zunächst fettreicher als *Alitta virens*. Allerdings ist *Hediste diversicolor* ein Osmo-

konformer und der Wassergehalt kann in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen schwanken (Sayles, 1935). Zudem wurde bereits gezeigt, dass der Fettgehalt sowie dessen Zusammensetzung in den Polychaeten vom Nahrungsspektrum abhängt (Bischoff *et al.*, 2009) und dass so bei ihrem Einsatz in einer integrierten Aquakultur der Verlust von Futterfettsäuren vermindert werden. Im Freiland unterliegt der Fettgehalt Schwankungen, die aber keiner offensichtlichen Jahresrhythmik folgen (Pellerin-Massicotte *et al.*, 1994), sondern eher die Ernährungssituation widerspiegeln. Wie beschrieben, nutzen sowohl *Delesseria sanguinea* als auch *Mytilus spp.* Kohlenhydrate als Reservestoffe, was sich auch in den geringen Rohfettwerten von < 1,0 % TS widerspiegelt.

Des Weiteren wurde der Rohfaseranteil in *Delesseria sanguinea* bestimmt. Mit 5,4 % TS ist der Wert gegenüber der Empfehlung der NRC (1993), mit maximal 3,0 % TS Rohfaser in Alleinfuttermitteln, leicht erhöht.

Anhand dieser Datengrundlage konnten keine Indikatoren ausgemacht werden, die grundsätzlich gegen einen Einsatz der analysierten Testorganismen als Zutat in einem Alleinfuttermittel für Forellen sprechen, wenngleich die angesprochenen Defizite durch verantwortungsbewusste Futtermittelkomposition ausgeglichen werden müssen.

4.2 Testfuttermittelkontrolle

Die Zutaten der Testfuttermittel wurden gemäß der erstellten Rezepturen miteinander vermengt, pelletiert und anschließend in ihrer Zusammensetzung kontrolliert. Die Testfuttermittel wurden so komponiert, dass sie mit einem kommerziellen Hochleistungsfutter (BAYWA AquaProfi 4 mm) verglichen werden konnten. So konnte der unmittelbare Einfluss der potentiellen Ressourcen auf den Fütterungserfolg direkt erfasst werden. Auf Grund der hohen Energie- und Proteindichte (BE: $23,6 \text{ MJ} \times \text{kg}^{-1}$; RP: 46,7 % TS) war die Supplementation mit *Mytilus spp.* und *Delesseria sanguinea* auf 10 % im Testfutter begrenzt, da andernfalls der Proteingehalt durch zugekauftes Fischmehl nicht mehr ausgleichen werden konnte. Wie bereits beschrieben, ist es gelungen die Futtermittel isokalorisch (BE: 22,4-24,8 $\text{MJ} \times \text{kg}^{-1}$) und isonitrogen (RP: 42,1-46,9 % TS) zu gestalten. Die Abweichungen zwischen den Werten resultieren aus angesprochenen, natürlichen Schwankungen in der Zusammensetzung der eingesetzten Zutaten. Auch wurden in der Futtermittelkomposition immer gleiche Anteile an Ausgleichszutaten zu den Futtermitteln dazugegeben, um nicht den Effekt deren Auswirkung zu erfassen. So enthielten alle Testfuttermittel einen Anteil von 15 % Leinöl zum Energieangleich sowie

5 % Gluten als Bindemittel. Die Futter A und M enthielten außerdem 25 % zugekauftes Fischmehl zum Proteinausgleich. Grundsätzlich waren damit die wichtigsten Bedingungen für vergleichbare Futtermittelversuche erfüllt. Allerdings war der Lysingehalt im Kontrollfutter gegenüber den Testfuttermitteln leicht erhöht. Über hydroxylierte Lysinreste erfolgt unter Anderem die kovalente Quervernetzung von Kollagenfibrillen zu Kollagenfasern. Kollagen ist das häufigste Strukturprotein in Vertebraten (Genovese *et al.*, 1984) und daher für den Muskelfleischansatz entscheidend. Die Supplementierung mit essentiellen und limitierenden Aminosäuren wird in der Futtermittelherstellung entsprechend neuer Erkenntnisse angewendet, um eine effizientere Rohproteinnutzung zu gewährleisten (Häffner *et al.*, 1998). So können N-Verluste über Ausscheidungen reduziert und Kosten gespart werden. Eine Supplementierung mit zusätzlichen Lysin zur Leistungsoptimierung im eingesetzten Kontrollfutter kann nicht ausgeschlossen werden.

Ebenfalls auffällig, war der relativ hohe NfE-Gehalt in den Wurm supplementierten Futtermitteln. Dieser überstieg, die im Vorfeld gemessenen Gehalte der an NfE der verwendeten Zutaten und hätte diesen Wert theoretisch nicht annehmen dürfen. Die Würmer wurden bei einem kommerziellen Erzeuger gekauft, der die Tiere nach der Erbrütung bis zur Ernte in einer Freilandanlage kultiviert. Wie von Pellerin-Massicotte *et al.* (1994) beschrieben, können die Tiere im Freiland, bedingt durch das Nahrungsangebot, im Jahresverlauf natürliche Schwankungen in ihren Gehalten an Zuckern, Fetten und Glycogen aufweisen. Die Firma Topsy Baits produziert im Wesentlichen Angelköder und ist kein Futtermittelproduzent, der eine Chargengleichheit garantieren muss. Es wird daher angenommen, dass die im Vorfeld untersuchten Tiere einer anderen Charge mit niedrigerer NfE-Fraktion entstammten als jene die letztlich in den Testfuttermitteln verwendet wurden. Es wurde weiterhin angenommen, dass es sich bei dieser Fraktion größtenteils um assimilierte Kohlenhydrate der Würmer und nicht um unverdaute pflanzliche Nahrungsreste im Verdauungstrakt handelt. Die tierischen Kohlenhydrate können von den Forellen verwertet werden, da sie in ihrem eigenen Metabolismus vorkommen (Polakof *et al.*, 2010). Daher wurde entschieden auch diese Futtermittel im Versuch einzusetzen.

4.3 Auswertung des Fütterungsversuches

Im Folgendem werden die Ergebnisse des Fütterungsversuches mit selbsterstellten Versuchsfuttermitteln, denen unterschiedliche Anteile der zuvor getesteten Organismen zugesetzt wurden, diskutiert.

4.3.1 Entwicklung der Wasserwerte

Die verwendete Hälterungsanlage (siehe Abbildung 4) stellt einen hochgradig artifizialen Lebensraum dar und der verhältnismäßig kleine Wasserkörper ist entsprechend störanfällig, weshalb die regelmäßige Wasserkontrolle nötig war. Auf Grund der klimatischen Bedingungen und technischer Probleme mit der Wärmeregulationseinheit der Anlage überstieg die Wassertemperatur ihren Sollwert von 20 °C in den ersten 15 Tagen des Versuches. Mit 23,5 °C war die Temperatur nahe dem Maximum. Laut Molony (2001) liegt das Temperaturmaximum der Regenbogenforelle zwischen 24 und 26 °C. Gleichzeitig sollte der Sauerstoffgehalt 6-8 mg $\times l^{-1}$ nicht unterschreiten. Bei 20 °C eingestellter Wassertemperatur entspräche dies einer Sauerstoffsättigung von 66-88 %. Ab 25 °C ist die Lösung von mehr als 8 mg $\times l^{-1}$ physikalisch nicht mehr möglich, was das Stresspotential zusätzlich erhöht. Während dieser Arbeit war die Sauerstoffsättigung im Wasser der Versuchsanlage stets < 95 %, womit die ausreichende Sauerstoffversorgung der Versuchstiere durchgehend gewährleistet war.

Ammoniak (NH_3) unterliegt im Wasser einem im wesentlichen vom pH-Wert und der Temperatur abhängigen Dissoziationsgleichgewicht mit Ammoniumion (NH_4^+) vor (Trussel, 1972). Die Ammoniumkonzentration im Anlagenwasser wurde photometrisch bestimmt. Abbildung 6 B zeigt die rechnerisch resultierende Ammoniakkonzentration. Untersuchungen zeigten, dass sich bei ansteigenden NH_3 -Gehalt im Wasser die $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Konzentration im Blut der Fische steigt (Thurston *et al.*, 1981). In Abhängigkeit vom Ernährungszustand und der Gesamtbelastung treten Schädigungen bei $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Konzentrationen $> 0,22 \text{ mmol} \times l^{-1}$ im Blut auf (Schreckenbach, 1994; Schreckenbach *et al.*, 1975). Dabei kommt es zu einem Anstieg des Sauerstoffbedarfes, der Herzfrequenz und des Blutdruckes sowie einer Verringerung des Sauerstoffdruckes im Blut. Außerdem können umfangreiche Blutschädigungen (Körting, 1969; Schreckenbach und Spangenberg, 1983) auftreten. Die Toxizität des Ammoniaks kann durch verschiedene Einflüsse wie Ernährungszustand oder kumulativen Stress erheblich verstärkt oder vermindert werden, daher sind in der Literatur unterschiedliche Grenzwerte zu finden. So vertragen energetisch ausreichend versorgte Fische auch höhere NH_3 -Konzentrationen schadlos. Bei Eintritt von Energiemangelsituationen sowie bei der Einwirkung anderer Belastungen wird die Toleranz verringert. Unter Berücksichtigung der höchsten Empfindlichkeiten empfiehlt Schreckenbach (2015) Sicherheitsgrenzwerte von 0,006 mg $\text{NH}_3 \times l^{-1}$ (0,352 $\mu\text{mol} \times l^{-1}$ angefütterte Forellen) bis 0,01 mg $\text{NH}_3 \times l^{-1}$ (0,587 $\mu\text{mol} \times l^{-1}$ größere Forellen). Gerade in der ersten Phase des Experimentes wurden diese Grenzwerte auf Grund der angesprochenen Probleme zum Teil stark überschritten (fünfter

Versuchstag: $1,45 \mu\text{mol} \times \text{l}^{-1}$). Erst ab Tag elf fiel die NH_3 - Konzentration wieder permanent auf unterkritische Werte und ab Tag 42 wurden dauerhaft ungefährliche Werte erreicht. Die erhöhte Ammoniakkonzentration im Anlagenwasser wurde als Hauptursache für die Fischverluste während des Versuches gewertet, da die meisten Versuchstiere im Zeitraum der stark erhöhten Konzentration verstarben (vgl. Tabelle 9).

Sonstige gelöste Stickstoffverbindungen wie Nitrit und Nitrat lagen stets in ungefährlichen Konzentrationen vor.

4.3.2 Wachstum und Futtermittelverwertung der Forellen

Einleitend wurde bereits eine Vielzahl von Versuchen aufgezeigt, welche die kommerzielle Forellenaquakultur durch Futtermitteloptimierung verbessern sollte. Der im Folgenden diskutierte Fütterungsversuch hatte zum Ziel lokale, bisher ungenutzte marine Ressourcen als potentielle Alleinfuttermittelkomponente zu testen.

Es ist beschrieben, dass Forellen bei einer Temperatur von $17,2 \text{ }^\circ\text{C}$ und entsprechender Fütterung etwa 5 % Körpermasse pro Tag zulegen können (Hokanson *et al.*, 1977). Eine maximale Nährstoff- und Energieretention wurde für eine Temperatur von etwa $9 \text{ }^\circ\text{C}$ beschrieben (Azevedo *et al.*, 1998). Als Poikilotherme haben Forellen generell einen relativ geringen, Umgebungstemperatur abhängigen Grundenergiebedarf (etwa $40 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (Cho und Kaushik, 1990)). Wegen der erhöhten Aktivität und des gesteigerten Grundbedarfs, bedeuten höhere Wassertemperaturen also größere Wachstumsraten bei verringerter Futtermittelleffizienz.

Die im Versuch verwendete Borner Forelle wird seit 1975 am Standort gezüchtet und verträgt die hohen Sommertemperaturen sowie das trübe Boddenwasser besser als andere Züchtungen [Pers. Komm. Ralf Bochert (Stationsleiter Born)]. Ihre optimale Wachstumstemperatur liegt über dem häufig angegebenen Wert für Regenbogenforellen von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ (Futtermittelhersteller). Deshalb wurde auch entschieden, den Versuch bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Wassertemperatur durchzuführen.

Auf Grund der beschriebenen Probleme mit den Wasserwerten, konnte im ersten Messintervall des Versuches nicht planmäßig gefüttert werden. Die Massenentwicklung und die Wachstumsraten der Versuchstiere war entsprechend eingeschränkt (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Zur Auswertung der absoluten Massenentwicklung in den Versuchsbecken wurden je ein Kontrollbecken und ein Becken der Gruppe A, wegen zu hoher Fischverluste (siehe Tabelle 9), vernachlässigt. Dadurch konnten, außer für die Startwerte (keine signifikanten Unterschiede zwischen den Startmassen der Versuchsbecken; alle $p \geq 0,05$ einfache Anova mit post-hoc-Test nach Tukey) keine statistischen Mittelwertvergleiche mehr durchgeführt werden.

Dennoch zeigte die grafische Darstellung einen Trend zu geringerem Massenzuwachs bei der Gruppe A (Abbildung 7, rote Linie).

Bei der relativen Betrachtung mit Hilfe von Wachstums- und Umsatzraten wurden die Daten aller verbliebenen Fische mit genutzt (siehe Abbildung 8). Im ersten Versuchsintervall unterschied sich die Wachstumsrate der Kontrollgruppe signifikant von der Gruppe AW ($p=0,0411$) und auch die Gruppe A zeigte mit $p=0,0512$ eine starke Tendenz zu einer verringerten Wachstumsleistung gegenüber der Kontrollgruppe. Dies könnte, neben den bereits diskutierten Störquellen, durch zusätzliche Probleme mit der Umstellung auf die pflanzliche Komponente erklärt werden. Die Bildung fraßhemmender Stoffe wurden in *Delesseria sanguinea* nachgewiesen (Rohde und Wahl, 2008), allerdings muss diese durch Fraß induziert werden. Auch die Wirkung dieser Stoffe auf die Forellen ist nicht untersucht. Schon im zweiten Versuchsintervall waren die Unterschiede zwischen den Wachstumsraten der Versuchsgruppen nicht mehr vorhanden. Hier zeigte die Gruppe AW tendenziell die höchste Wachstumsleistung und wuchs signifikant schneller als Gruppe M ($p=0,0249$). Im dritten und vierten Intervall gab es keine Unterschiede in der Wachstumsleistung zwischen den Versuchsgruppen, sie wuchsen recht gleichartig. Betrachtet man die Futtermittelumsatzrate über den gesamten Versuchszeitraum wird das bisherige Bild vervollständigt. Keine Versuchsgruppe zeigte einen signifikanten Unterschied im Vergleich zur Kontrollgruppe (alle $p \geq 0,05$). Allerdings ist der signifikante Unterschied zwischen den Gruppen A und W ein weiterer Hinweis auf Leistungsdefizite bei Zusatz von *Delesseria sanguinea* zum Forellenfutter.

Als Maß für die Futtermittelleffizienz wurde die Futtermittelkonversionsrate berechnet (siehe Abbildung 9). Im vorliegenden Versuch wurden aus der Literatur bekannte FCR- Werte von etwa 0,8 (Krogdahl *et al.*, 2004; Sorensen *et al.*, 2005) nicht erreicht. Allerdings wurden die zitierten Versuche bei Wassertemperaturen zwischen 7 bis 10 °C durchgeführt. Auch die angenommene Verwertungsrate von 1 wurde von der Kontrollgruppe als auch der Gruppe W verfehlt, obwohl es sich bei dem Kontrollfutter, laut Herstellerangaben, um ein Hochleistungsfuttermittel handelte. Ein Grund für die erhöhten Werte war der aus der erhöhten Wassertemperatur resultierende gesteigerte Energiegrundumsatz. Zudem fordert das Leben im Boddenwasser auf Grund höherer Pathogenabundanzen eine stärkere Immunantwort (Rebl *et al.*, 2012), was den Energiebedarf weiter steigert. Da die Forelle einen großen Teil ihrer benötigten Energie aus dem oxidativen Abbau von Aminosäuren gewinnt (Hillaby und Randall, 1979), stehen diese dann nicht mehr zum Aufbau von Körpermasse zur Verfügung.

Auch wenn es möglich ist, Regenbogenforellen effizienter zu mästen, wurde in der

vorliegenden Studie klar gezeigt, dass die vorgestellten möglichen neuen Futtermittelkomponenten ohne erkennbare Leistungsdefizite in Hochleistungsfuttermittel integriert werden können.

Am Ende des Fütterungsversuches wurden die verbliebenen Forellen geschlachtet. Die Fischkörper wurden morphologisch als auch biochemisch analysiert. Die erhaltenen Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

4.3.3 Morphologische Analysen

Aus Masse und Länge der Einzeltiere wurde zunächst der Konditionsindex (KI) ermittelt. Dieser ist ein Maß für die Umgebungsqualität der Fische. Während des Fütterungsversuches verschob sich der Index von 1,1 (Nullprobe) auf etwa 1,4 für alle Versuchsgruppen. Dabei unterschieden sich der Index der Versuchsgruppen K und W signifikant von der Nullprobe. Das Körpermasse- Längenverhältnis hat sich zur Masse hin verschoben. Im Fischereijargon sagt man; „Der Fisch ist runder geworden“. Ansonsten gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen (vgl. Abbildung 10 A). Die ermittelten Gewichts- und Konditionswerte der Versuchstiere sind mit denen 1,5-jähriger Forellen aus norwegischer Aquakultur vergleichbar (Elvingson und Johansson, 1993).

Der Eingeweidefettanteil zeigte keine signifikante Erhöhung der Versuchsgruppen gegenüber der Nullprobe und auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen (siehe Abbildung 10 B). Die erzielten Werte von etwa 3-4 % sind mit Literaturangaben anderer Zuchtforellen vergleichbar (Akhan *et al.*, 2010).

Der HSI ist ein Maß für die Energiereserven der Fische. Die Werte des HSI der Versuchsgruppen änderten sich durch die Fütterung nicht signifikant gegenüber dem Wert der Nullprobe und unterschieden sich nicht untereinander. Mit Werten von etwa 1,5 unterschieden sie sich auch nicht von Werten anderer Forellenzuchten (Akhan *et al.*, 2010). Generell waren die Körpermerkmale (KI und HSI) der Versuchstiere mit denen die üblicherweise für die Borner Forelle in einer weniger regulierten Durchflussrinne erreicht werden vergleichbar (Bochert und Goldammer, 2016).

Als wirtschaftlich relevante Größe wurde der Anteil der Schlachtkörpermassen der einzelnen Versuchsgruppen ausgewertet (siehe Abbildung 11 A). Die Gruppen K, M und W wiesen mit etwa 66 % einen ebenso großen Anteil auf, wie bereits die Nullprobe. Versuchsgruppe A und AW besaßen dagegen, mit etwa 64 % einen signifikant geringeren Anteil an Schlachtkörpermasse. Die festgestellten Unterschiede zwischen diesen Werten bestätigen die Tendenz des KI zu einem geringeren Massenansatz bei den mit *Delesseria sanguinea* supplementierten Futtermitteln und zei-

gen darüber hinaus, dass dieses Ansatzdefizit vorrangig das Muskelfleisch des Filets betrifft. Akhan *et al.* (2010) hat den Schlachtkörperanteil mit Kopf ausgewertet und dabei etwa 75 % festgestellt. Vervollständigend wurde in der zitierten Studie dem Schlachtkörperanteil der Filetanteil gegenübergestellt. Dieser betrug im Schnitt 68 % der Frischmasse. Auch wenn hier zusätzlich die Wirbelsäule entfernt wurde ist er am ehesten mit dem Schlachtkörperanteil der vorliegenden Arbeit vergleichbar. Auf die Technik des Filetierens wurde in dieser Arbeit verzichtet, da die Ergebnisse zu ungenau waren.

Allgemein wurde festgestellt, dass trotz der besonders artifiziellen Versuchsbedingungen, die Konstitution der Versuchstiere am Ende des Experimentes mit denen, die in einer kommerziellen Aquakultur erreicht werden, vergleichbar waren. Allerdings mit den angesprochen Einschränkungen bei der Supplementierung mit *Deleseria sanguinea*.

4.3.4 Gustatorische Testung

Im vorherigen Kapitel wurde dargelegt, dass die Versuchsfische im durchgeführten Experiment und unter den gegebenen Versuchsbedingungen, eine auch nach industriellen Maßstäben akzeptable Wachstumsleistung erzielten. Um einen eventuellen Einfluss der verwendeten neuen Zutaten auf den Geschmack eines fertigen Endproduktes zu erfassen, wurden einzelne Fische aller Versuchsgruppen verkostet. Der Umfang als auch die Umstände der durchgeführten Testung erlauben keine wissenschaftliche Auswertung. Die vorgestellten Noten sind daher höchstens als mögliche Hinweise zu interpretieren und mit umfangreicheren Testungen nicht vergleichbar. Die Vortestung bezüglich einer Verbesserung der Fleischqualität durch eine 10-tägige Ausnüchterung ergab eine Verbesserung der Gesamtnote um 0,4 Notepunkte. Vor allem Geschmack und Geruch verbesserten sich (vgl. Tabelle 10) nach Meinung der Tester.

Die eigentliche Endprodukttestung erfolgte mit ausgenücherten und geräucherten Forellen aller Versuchsgruppen. Alle Versuchsgruppen haben wenigstens eine gute Note erhalten. Tabelle 11 zeigt, dass die Tester den Fischen, welche mit Wurm supplementierten Futter ernährt wurden (W und AW), eine höhere sensorische Qualität zusprechen als den anderen Versuchsgruppen (A und M). Auf Grund der erhaltenen Noten wird vorerst davon ausgegangen, dass die getesteten Ressourcen, in den hier verwendeten Mengen, keine negativen Auswirkungen auf Produktqualität haben.

4.4 Zusammensetzung der Versuchsfische

Trotz des Umstandes, dass die Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*) schon länger als einer der meist erforschten Speisefische der Welt gilt (Gall und Crabdell, 1992), ist es bisher noch nicht gelungen, das ideale Futter sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht, zur Produktion dieser edlen Speisefische zu finden, wie der Umfang des gegenwärtigen Forschungsaufwandes beweist. Auch in dieser Arbeit wurden Untersuchungen durchgeführt, die eine nachhaltigere Erzeugung von Speiseforellen ohne Defizite in der Wachstumsleistung oder Produktqualität ermöglichen sollen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Zusammensetzung der Versuchsfische, die in dieser Arbeit unter Verwendung der hergestellten Testfuttermittel gewachsen sind. Proteingehalt und Aminosäurezusammensetzung werden dabei vordergründig diskutiert.

Einleitend wurde bereits erwähnt, dass die Aminosäurezusammensetzung des Futterproteins über den Erfolg der Proteinsynthese und damit über die Proteinretention entscheidet (Häffner *et al.*, 1998). Aus praktischen Gründen wurde in den hier durchgeführten Untersuchungen auf eine vollständige Weender-Analyse verzichtet und nach der Bestimmung von Trockenmasse und organischer Substanz, nur noch eine Rohproteinbestimmung durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass der Rohproteingehalt der ganzen Versuchstiere im Verlauf des Experimentes von 61 % *TS* auf durchschnittlich 50 % *TS* gesunken ist. Des Weiteren wurde gezeigt, dass dieser Effekt für die Gruppen K und M gegenüber der Nullprobe signifikant war. Der Rohaschegehalt zeigte ebenfalls eine rückläufige Tendenz, die ebenfalls im Falle der Gruppen K und M signifikant von der Nullprobe abwich. Der Gehalt organischer Substanz nahm also zu, während der Proteingehalt sank. Die tendenzielle Zunahme des Eingeweidefettes (siehe Tabelle 14) reicht zur Erklärung nicht aus. Folglich wurde der Proteingehalt durch organische Substanzen reduziert, deren Anteil beziehungsweise dessen betreffendes Kompartiment in dieser Arbeit nicht gesondert berücksichtigt wurde, wie z.B. der Fettgehalt in den Bauchlappen. Diesen Effekt von abnehmendem Proteingehalt bei steigendem Fettanteil bei heranwachsenden Forellen wurde bereits von Weatherley und Gill (1983) beschrieben.

Der Rohproteingehalt des Muskelfleisches des Filets betrug im Schnitt 74 % *TS*. Dieser war im Vergleich zum Literaturwert von durchschnittlich 82 % *TS* (Souci *et al.*, 2015) erniedrigt, liegt aber im Bereich der angegebenen Schwankungen. Der Rohascheanteil entspricht mit 5,6 % *TS* dem durchschnittlichen Literaturwert (Souci *et al.*, 2015). Auch hier könnte der nicht gemessene Fettgehalt die Differenz zwischen den unterschiedlichen Rohproteinwerten erklären. Der durchschnittliche Literaturwert für Rohfett im Forellenfilet beträgt 32 % *TS* (Souci *et al.*, 2015).

Dieser kann aber zwischen 7 % *TS* und 43 % *TS* betragen und sich entsprechend auf den Rohproteingehalt in der Trockenmasse auswirken. Abzüglich des minimalen Rohproteinwertes und des kleinsten festgestellten Rohaschewertes würden nur 23,5 % Resttrockenmasse in den Filets der Versuchsfische verbleiben. Selbst unter der Annahme dieser Rest wäre alles Fett, würden die erzeugten Forellenfilets damit immer noch einen vergleichsweise unterdurchschnittlichen Fettgehalt aufzeigen. Die Retention des gefütterten Proteins wurde in dieser Arbeit als Verhältnis von zugewonnenem Fischprotein in Trockenmasse zu gefüttertem Protein in Trockenmasse angegeben und war mit 31,3 % in der Kontrollgruppe maximal. Badillo *et al.* (2014) berechneten einen ähnlichen Wert (PER) als Verhältnis aus gewonnener Fischfrischmasse zu aufgenommener Proteinmenge. In diesem Versuch wurden unterschiedliche Anteile von „poultry byproduct meal“ (Mehl aus Nebenprodukten der geflügelverarbeitenden Industrie) als mögliches Fischmehlsubstitut getestet. Sie erhielten dabei Werte von durchschnittlich 2,8. Errechnet man diese Retentionswerte aus den Daten dieser Arbeit, erhält man durchschnittlich 1,9. Dieser Wert war erwartungsgemäß niedriger, da die geringere Temperatur (14 °C) in der Vergleichsstudie, die Retention von Nährstoffen begünstigte.

Zur Überprüfung der Proteinzusammensetzung wurden die Aminosäuregehalte, sowohl des ganzen Fisches als auch nur des Filets bestimmt. Dies erlaubte auch Rückschlüsse auf die Verteilung der Aminosäuren im Fischkörper. Grundsätzlich wurden Werte zu Aminosäuregehalten in dieser Arbeit in g Aminosäuren je 16 g N angegeben, um einen absoluten Bezug für die gemessenen Aminosäuregehalte zu haben, welcher unabhängig von Trocken- oder Frischmasse ist. Da der Stickstoffgehalt die Berechnungsgrundlage für den Rohproteingehalt war, kann die gewählte Einheit für die Aminosäuregehalte als äquivalent zu der ebenfalls gängigen Einheit g Aminosäuren je 100 g Rohprotein interpretiert werden. Es ist allerdings aufgefallen, dass die Addition der gemessenen proteinogenen Aminosäuren bei den Testorganismen durchschnittlich 80 % und bei den Versuchsfischen mindesten 85 % des zuvor gemessenen Stickstoffes erklärte, welcher schließlich die Berechnungsgrundlage in der Rohproteinbestimmung war. Dies liegt zum einen daran, dass die Widerfundrate freier Aminosäuren zwischen 93 und 109 % schwanken kann (Jajic *et al.*, 2013). Allgemein werden Messgenauigkeiten zwischen 90 und 110 % Widerfundrate akzeptiert. Des Weiteren ist die saure Hydrolyse ein kritischer Schritt, da einzelne Aminosäuren wie Tryptophan und Cystein gänzlich und andere wie Serin und Threonin teilweise zerstört werden (Bartolomeo und Maisano, 2006). Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Umrechnungsfaktor zur Rohproteinbestimmung nicht zu Überschätzung einzelner Proteingehalte führte. Der Faktor

von 6,25 zur Konversion von Stickstoffgehalt zu Rohprotein ist schon länger in der Diskussion, da auch nicht proteinogener Stickstoff mitbestimmt wird. Jones (1941) und Tkachuk (1969) zeigten am Beispiel von Getreiden und anderen Nutzpflanzen, dass es zu einer Überschätzung des Proteingehaltes kommen kann und schlugen entsprechend angepasste Faktoren für die getesteten Pflanzen vor. Allerdings zeigten sie auch, dass der Faktor für verschiedene Bohnensorten sehr gut funktioniert. In der Praxis ist der Faktor von 6,25 bis heute allgemein gebräuchlich. Auf Grund der Vergleichbarkeit sind den Messungen von Wilson und Cowey (1985) (Mittelwerte zweier Individuen) in Tabelle 12 die Mittelwerte von Doppelbestimmungen einzelner Individuen der Versuchsgruppen gegenübergestellt. Obwohl Wilson und Cowey (1985) die Eingeweide ihrer Proben entfernten, war die relative Verteilung der nachgewiesenen Aminosäuren, über alle Versuchsgruppen hinweg gut mit den Literaturwerten vergleichbar und zeigte nur geringe Unterschiede, die in den meisten Fällen natürlichen Schwankungen entsprechen. Allein die Werte der schwefelhaltigen Aminosäuren in den Versuchstieren waren, mit Werten von durchschnittlich $3,8 \text{ g} \times (100 \text{ g AS})^{-1}$ Methionin und $1,2 \text{ g} \times (100 \text{ g AS})^{-1}$ Cystein gegenüber den Referenzen aus der Literatur mit $2,9 \text{ g} \times (100 \text{ g AS})^{-1}$ Methionin sowie $0,8 \text{ g} \times (100 \text{ g AS})^{-1}$ Cys leicht erhöht. Die von Wilson und Cowey (1985) verwendeten Tiere waren allerdings sehr klein, was die Unterschiede erklären kann. Andererseits kann auch das Mitmessen der inneren Organe in dieser Arbeit ursächlich für diese Unterschiede sein. Denn die schwefelhaltigen Aminosäuren erfüllen neben der Proteinsynthese weitere wichtige biologische Funktionen. So dient Methionin nach der Reaktion mit ATP zu S-Adenosylmethionin (SAM)(Baker, 2006) mit entsprechenden Methyltransferasen zur Methylierung anderer Moleküle, wie beispielsweise der DNA oder zur Synthese des Stresshormons Adrenalin. Damit erfüllt es wichtige regulatorische und biosynthetische Funktionen. Allerdings zeigten Poppi *et al.* (2011) in Fütterungsversuchen mit Federmehl, dass Methioninkonzentrationen von über 2 % TM im Futter bereits eine toxische Wirkung haben könnten, die auf die Akkumulation von SAM in der Leber zurückzuführen ist (Regina, 1993). Auch Cystein findet Verwendung neben der Proteinsynthese. Vor Allem in der Leber wird es mit Glycin und Glutamin zu Glutathion weiter synthetisiert. Glutathion spielt als Radikalfänger eine wichtige Rolle bei der Zellentgiftung. Durch die Entfernung der Eingeweidedrüsen (z.B. Leber und Milz) könnte der Methionin- und Cysteingehalt der Fische in der Arbeit von Wilson und Cowey (1985) gegenüber denen der in dieser Arbeit festgestellten Werten reduziert sein. Im Vergleich zu den Gehalten an schwefelhaltigen Aminosäuren in den eingesetzten Futtermitteln (durchschnittlich $1,8 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Methionin, $0,8 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Cystein) waren

diese Aminosäuren in den Versuchsfischen mit durchschnittlich $2,9 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Methionin sowie $1,0 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ Cystein erhöht. Eine statistische Auswertung einzelner Rohwerte, sowie für die Muskelbildung wichtiger Aminosäuren ist in Tabelle 14 dargestellt. Es wurden weder im Protein des ganzen Fisches noch im Filet nennenswerte Unterschiede in den Gehalten der getesteten Aminosäuren zwischen den Versuchsgruppen festgestellt. Die Individuen aller Versuchsgruppen besaßen arttypische Aminosäuremuster.

Zum Vergleich aller während dieser Studie gemessenen Aminosäuremuster der Versuchsfische, wurde eine Hauptkomponentenanalyse (Abbildung 12) durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse zeigt durch die Bildung zweier Cluster, die sich durch 95 %ige Vertrauensintervalle klar trennen lassen, dass die Proteinzusammensetzung von Ganzfisch und Filet statistisch verschieden war. Wie Tabelle 14 bestätigt, haben die Aminosäuren Lysin, Methionin und Cystein am Protein des Filet einen höheren Anteil als am Protein des ganzen Fisches. Bei Gehalten von durchschnittlich $9,1 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ unterstreicht dies vor allem die Bedeutung des Lysins für den Muskelfleischaufbau bei der Forelle. Auch im Protein des ganzen Fisches war der Lysingehalt mit durchschnittlich $7,8 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ höher als in den Testfuttermitteln (durchschnittlich $5,5 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$, $6,1 \text{ g} \times (16 \text{ g N})^{-1}$ im Kontrollfutter). Lysin wurde also im Fischkörper und dabei vor allem im Filet angereichert. Aber auch Leucin, Isoleucin und Tyrosin sind der Analyse nach, anteilig häufiger im Filetprotein zu finden als im Protein des ganzen Fisches. Ein erhöhter Anteil dieser Aminosäuren in der Muskulatur kann mit entsprechenden Funktionen dieser Aminosäuren über die Muskelproteinbildung hinaus erklärt werden. So übernehmen Leucin und Isoleucin wichtige Funktionen bei der Muskelfaserreparatur. Wie bereits erläutert ist Lysin entscheidend an der Bildung von Kollagenfasern beteiligt, welche im Bindegewebe benötigt werden. Ähnlich wie Methionin kann auch Cystein als Radikalfänger in der Zellentgiftung dienen. Bei entsprechender Muskelaktivität erhöht sich die Freisetzung von Sauerstoffradikalen aus der mitochondrialen Atmungskette (Amerand *et al.*, 2006), welche sogleich wieder eingefangen werden, bevor sie mit anderen Molekülen reagieren können.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die untersuchten Ressourcen in den hier getesteten Mengenanteilen keinen Einfluss auf den Proteingehalt oder die Aminosäurezusammensetzung der Regenbogenforelle haben.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Rotalge *Delesseria sanguina*, der Seeringelwurm *Alitta virens* sowie die Baltische Miesmuschel *Mytilus spp.* erfolgreich in ein Alleinfuttermittel für Regenbogenforellen *Oncorhynchus mykiss* integriert und im Vergleich zu einem Hochleistungsfutter getestet. Darüber hinaus wurde die Seeringelwurmart *Hediste diversicolor* hinsichtlich ihrer Futtermitteltauglichkeit untersucht. Der Proteingehalt war sehr unterschiedlich und im Fall der Miesmuschel an der unteren Grenze zur Definition als Proteinquelle (10 % RP). Die Wurmspezies zeigten mit über 60 % RP die höchsten Rohproteinwerte. Eine gute Qualität des Rohproteins bezüglich der geforderten Gehalte an essentiellen Aminosäuren konnte für alle untersuchten Spezies bestätigt werden. Es war nicht möglich *Hediste diversicolor* in ausreichender Menge für ein Fütterungsexperiment zu beschaffen. Es wird aber davon ausgegangen, dass auf Grund der Verwandtschaft der untersuchten Wurmart und der hier festgestellten biochemischen Ähnlichkeiten in ihrer Zusammensetzung, ähnliche Ergebnisse in einem vergleichbaren Fütterungsversuch mit *Hediste diversicolor* als Zutat zu erwarten wären, wie sie hier für *Alitta virens* gefunden wurden. Das Wurmfutter enthielt 35 % Wurm trockenmasse und nur noch 45 % fischmehlbasiertes Hochleistungsfutter, dennoch konnten keine signifikanten Unterschiede bei den untersuchten Leistungsparametern (Wachstumsrate, Feed-Conversion-Ratio, Schlachtkörpermasse, Konditionsindex und Hepatosomatischer Index) festgestellt werden. Der hohe Proteinanteil sowie der relativ höhere Anteil an Lysin gegenüber den anderen Testorganismen machen die untersuchten Wurmart zu einer Fischmehlalternative mit hohem Potential. Die Würmer der Art *Alitta virens* für den hier durchgeführten Versuch wurden mit 60 Euro pro Kilogramm gefrorener Frischmasse, ohne Frage unwirtschaftlich zur Forellenproduktion, eingekauft. Allerdings war die Firma Topsy Baits zum Zeitpunkt dieser Arbeit der einzige Seeringelwurmerzeuger auf dem europäischen Festland. Ursprünglich richtete sich das Angebot der Firma vor allem an Angelsportler, aber unlängst stieg auch die Nachfrage durch Aquakulturbetrieben. Nach eigener Aussage von Topsy Baits sind die kultivierten Würmer gemäß Untersuchungen der Universität Arizona frei von Schrimppathogenen und für deren Larvenaufzucht daher ideal geeignet. Für eine breite Anwendung in der Aquakultur, vor allem als Fischmehlersatz müsste das Angebot ausgebaut und die Produktionskosten erheblich reduziert werden.

Auf Grund der niedrigen Rohproteinwerte, war der Zusatz von Algen und Muscheln in der hier getesteten Verarbeitungsform auf 10 % beschränkt, um Protein- und Energiegehalt dem Kontrollfutter entsprechend einstellen zu können. Rechnerisch wäre ein höherer Anteil *Delesseria sanguinea* möglich gewesen, jedoch war im Jahr

des Fütterungsversuches (2015) der Proteingehalt der Algen aus Wildsammlung reduziert und die Rezeptur musste angepasst werden. Durch den geringen Zusatz waren in dem Algen- und Muscheltestfutter nur 2,3 % des enthaltenen Proteins auf die Testorganismen zurückzuführen, was eine Diskussion bezüglich der Proteinqualität erschwert. Für das Muschelfutter wurde kein signifikanter Leistungsunterschied im Vergleich zum Kontrollfutter gefunden. Würde ein Verfahren etabliert werden, das Protein aus den für den Humanverzehr ungeeigneten untermaßigen Miesmuscheln kostengünstig und effizient zu extrahieren, könnte Muschelprotein ebenfalls eine Rolle als Zutat in künftigen Alleinfuttermitteln für Forellen spielen. Damit können Hypothese 1 und 2 bezüglich der Verwendbarkeit der getesteten Zutaten als Fischmehlersatz in Alleinfuttermitteln für Forellen, im Fall von *Alitta virens* positiv beantwortet werden. Für Vollmehl der Baltischen Miesmuschel *Mytilus spp.* mit einer Schalenlänge 3-5 cm konnten die Hypothesen bedingt positiv beantwortet werden. Zwar konnte es anteilig ohne Leistungsdefizite verfüttert werden. Es konnten aber auf Grund der gestellten Versuchsbedingungen nur ein geringer Zusatz getestet werden. Da keine Leistungsdefizite beim Einsatz der getesteten tierischen Ressourcen gab ist Hypothese 3 in diesen Fällen hinfällig.

Auch das Mehl der Rotalge *Delesseria sanguinea* konnte nur in geringer Konzentration getestet werden, führt aber unmittelbar zu signifikanten Defiziten in der Wachstumsleistung der Versuchstiere. Hypothese 1 und 2 müssen in diesem Fall abgelehnt werden. Der Proteingehalt und die Zusammensetzung wurden zwar zunächst als geeignet für eine Komponente in der Futtermittelherstellung bewertet. Gemäß Hypothese 3 konnten diese Leistungsdefizite mit den eingesetzten Methoden nicht ursächlich nachvollzogen werden. Es wurde angenommen, dass zum Einen die hohe NfE- Fraktion in dem Algenmehl sowie weitere antinutritive Substanzen aus dem Sekundärmetabolismus der Pflanze ursächlich für die Einschränkung der Wachstumsleistung sein könnten. In einem Mischfutter mit Algen- und Wurmmzusatz konnten diese Defizite, trotz unveränderten Algenanteils teilweise wieder aufgehoben werden.

Literatur

- Akhan, S., Okumuş, b., Koçak, N., und Sonay, F. D. (2010). Growth, Slaughter, Yield and Proximate Composition of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Raised Under Commercial Farming Condition in Black Sea Makale Kodu (Article Code): KVFD-2010-2330 Karadeniz ' de Ticari Koşullar Altında Yetiştirilen Gökkuşığı A. *Journal of the Faculty of Veterinary Medicine, Kafkas University*, 16(Supplement B):291–296.
- Alriksson, B., Hörnberg, A., Gudnason, A. E., Knobloch, S., Arnason, J., und Johannsson, R. (2014). Fish feed from wood. *Nordic Wood Biorefinery Conference (NWBC 2014)*, 48:843–848.
- Amerand, A., Vettier, A., Sébert, P., und Moinsan, C. (2006). A comparative study of reactive oxygen species in red muscle: Pressure effects. *Undersea & Hyperbaric Medicine*, 33(3):161–167.
- Anderson, J. S., Lall, S. P., Anderson, D. M., und McNiven, M. A. (1995). Availability of amino acids from various fish meals fed to Atlantic salmon (*Salmo solar*). *Aquaculture*, 138(1-4):291–301.
- Anticamara, J. A., Watson, R., Gelchu, A., und Pauly, D. (2011). Global fishing effort (1950-2010): Trends, gaps, and implications. *Fisheries Research*, 107(1-3):131–136.
- Atkinson, J. L., Hilton, J. W., und Slinger, S. J. (2011). Evaluation of Acid - Insoluble Ash as an Indicator of Feed Digestibility in Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(9):1384–1386.
- Azevedo, P. A., Cho, C. Y., Leeson, S., und Bureau, D. P. (1998). Effects of feeding level and water temperature on growth, nutrient and energy utilization and waste outputs of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Living Resources*, 11(4):227–238.
- Badillo, D., Herzka, S. Z., und Viana, M. T. (2014). Protein retention assessment of four levels of poultry by-product substitution of fishmeal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets using stable isotopes of nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) as natural tracers. *PLoS ONE*, 9(9):1–8.
- Baker, D. H. (2006). Comparative species utilization and toxicity of sulfur amino acids. *Journal of Nutrition*, 136:1670S–1675S.

-
- Bartolomeo, M. P. und Maisano, F. (2006). Validation of a reversed-phase HPLC method for quantitative amino acid analysis. *Journal of biomolecular techniques* : *JBT*, 17(2):131–137.
- Bassler, R. (1993). *Methodenbuch Band III - Die chemische Untersuchung von Futtermitteln*. VDLUFA-Verlag, 3 edition.
- Berge, G. M. und Austreng, E. (1989). Blue mussel in feed for rainbow trout. *Aquaculture*, 81(1):79–90.
- Bischoff, A. A., Fink, P., und Waller, U. (2009). The fatty acid composition of *Nereis diversicolor* cultured in an integrated recirculated system: Possible implications for aquaculture. *Aquaculture*, 296(3-4):271–276.
- Bochert, R. und Goldammer, T. (2016). Vergleichende Untersuchungen der Abwachsleistungen von Forellen (*Oncorhynchus mykiss*) (Walbaum, 1792) der Selektionslinie BORN mit Stahlkopfforellen. *Fischerei und Fischmarkt*, 2:22–29.
- Buckee, G. K. (1994). Determination of total nitrogen in barley, malt and beer by Kjeldahl procedures and the Dumas combustion method - collaborative trial. *Journal of Institute of Brewing*, 100(2):57–64.
- Cho, C. Y. (1992). Feeding systems for rainbow trout and other salmonids with reference to current estimates of energy and protein requirements. *Aquaculture*, 100(1-3):107–123.
- Cho, C. Y. und Kaushik, S. J. (1990). Nutritional energetics in fish : energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Review of Nutrition and Dietetics*, 61:132–172.
- Christensen, V., Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Buszowski, J., und Pauly, D. (2014). A century of fish biomass decline in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 512:155–166.
- Collins, S. A., Desai, A. R., Mansfield, G. S., Hill, J. E., Van Kessel, A. G., und Drew, M. D. (2012). The effect of increasing inclusion rates of soybean, pea and canola meals and their protein concentrates on the growth of rainbow trout: Concepts in diet formulation and experimental design for ingredient evaluation. *Aquaculture*, 344-349:90–99.
- Dalsgaard, J., Verlhac, V., Hjermitsev, N. H., Ekmann, K. S., Fischer, M., Klausen, M., und Pedersen, P. B. (2012). Effects of exogenous enzymes on apparent

-
- nutrient digestibility in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets with high inclusion of plant-based protein. *Animal Feed Science and Technology*, 171(2-4):181–191.
- Dantagnan, P., Hernández, A., Borquez, A., und Mansilla, A. (2009). Inclusion of macroalgae meal (*Macrocystis pyrifera*) as feed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effect on flesh fatty acid composition. *Aquaculture Research*, 41(1):87–94.
- Drew, M. D., Racz, V. J., Gauthier, R., und Thiessen, D. L. (2005). Effect of adding protease to coextruded flax : pea or canola : pea products on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal Feed Science and Technology*, 119:117–128.
- Elvingson, P. und Johansson, K. (1993). Genetic and environmental components of variation in body traits of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in relation to age. *Aquaculture*, 118(3-4):191–204.
- Faergemand, J., Rønsholdt, B., Alsted, N., und Borrensen, T. (1995). Fillet texture of rainbow trout as affected by feeding strategy, slaughtering procedure and storage post mortem. *Water Science and Technology*, 31(10):225–231.
- FAO (2014). Fishery and Aquaculture Statistics. Technical report, Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO).
- Gall, G. A. E. und Crabdell, P. A. (1992). The Rainbow Trout. In Gall, G. A. E., editor, *The Rainbow Trout*, pages 1–10. Elsevier B.V., New York.
- Genovese, C., Rowe, D., und Kream, B. (1984). Construction of DNA sequences complementary to rat .alpha.1 and .alpha.2 collagen mRNA and their use in studying the regulation of type I collagen synthesis by 1,25-dihydroxyvitamin D. *Biochemistry*, 23:6210–6216.
- Grünewald, N. und Alban, S. (2009). Optimized and standardized isolation and structural characterization of anti-inflammatory sulfated polysaccharides from the red alga *Delesseria sanguinea* (Hudson) Lamouroux (Ceramiales , Delesseriaceae). *Biomacromolecules*, 10:2998–3008.
- Haard, N. F. (1992). Control of chemical composition and food quality attributes of cultured fish. *Food Research International*, 25(4):289–307.
- Häffner, J., Kahrs, D., Limper, J., de Mol, J., und Peisker, M. (1998). *Aminosäuren in der Tierernährung*. Arbeitsgemeinschaft für Wirkstoffe in der Tierernährung.

-
- Hardy, R. W. (2002). Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. In Webster, C. D. und Lim, C. E., editors, *Nutrient Requirements and Feeding of Finfish for Aquaculture*, pages 184–202. Centre for Agriculture and Biosciences International.
- Hardy, R. W. und Tacon, A. G. J. (2002). Fish meal: historical uses, production trends and future outlook for sustainable supplies. In Stickney, R. R. und McVey, J. P., editors, *Responsible Marine Aquaculture*, pages 311–324. Centre for Agriculture and Biosciences International.
- Hillaby, B. A. und Randall, D. J. (1979). Acute Ammonia Toxicity and Ammonia Excretion in Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 36(6):621–629.
- Hokanson, K. E. F., Kleiner, C. F., und Thorslund, T. W. (1977). Effects of Constant Temperatures and Diel Temperature Fluctuations on Specific Growth and Mortality Rates and Yield of Juvenile Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34(5):639–648.
- Hooft, J. M., Elmor, A. E. H. I., Encarnação, P., und Bureau, D. P. (2011). Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) is extremely sensitive to the feed-borne Fusarium mycotoxin deoxynivalenol (DON). *Aquaculture*, 311(1-4):224–232.
- Hummel, H., de Wolf, L., Zurburg, W., Apon, L., Bogaards, R. H., und van Ruitenburg, M. (1989). The glycogen content in stressed marine bivalves: The initial absence of a decrease. *Comparative Biochemistry and Physiology – Part B: Biochemistry and*, 94(4):729–733.
- Hunt, L., Bonetto, C., Resh, V. H., Buss, D. F., Fanelli, S., Marrochi, N., und Lydy, M. J. (2016). Insecticide concentrations in stream sediments of soy production regions of South America. *Science of the Total Environment*, 547:114–124.
- Jajic, I., Krstovic, S., Glamocic, D., Jaksic, S., und Abramovic, B. (2013). Validation of an HPLC method for the determination of amino acids in feed. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 78(6):839–850.
- Jones, D. (1941). Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of proteins.
- Kaushik, S. (1979). Application of a biochemical method for the estimation of amino acid needs in fish: quantitative arginine requirements of rainbow trout in different salinities. In Tiews, K. und Halver, J. E., editors, *Finfish Nutrition and Fishfeed Technology*, pages 197–207. Heenemann, Berlin.

-
- Keller, M. und Kess, S. (2015). Fischwirtschaft Daten und Fakten 2015. Fisch-Informationszentrum e.V. , www.fischinfo.de.
- Ketola, H. G. (1983). Requirement for dietary lysine and arginine by fry of rainbow trout. *Journal of Animal Science*, 56:101–107.
- Kim, J. Y., Park, S. C., Hwang, I., Cheong, H., Nah, J. W., Hahm, K. S., und Park, Y. (2009). Protease inhibitors from plants with antimicrobial activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(6):2860–2872.
- Knutsen, H. K., Alexander, J., Barregård, L., Bignami, M., Brüschweiler, B., Ceccatelli, S., Dinovi, M., Edler, L., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L. R., Nebbia, C. S., Oswald, I., Petersen, A., Rose, M., Roudot, A., Schwerdtle, T., Vollmer, G., Wallace, H., Cottrill, B., Dogliotti, E., Laakso, J., Metzler, M., Velasco, L., Baert, K., Ruiz, J. A. G., Varga, E., Dörr, B., und Vleminckx, C. (2016). Erucic acid in feed and food. *EFSA Journal*, 14(11):1–173.
- Körting, W. (1969). Die schädigende Wirkung des Ammoniaks auf Fische. *Münchener Beiträge Abwasser-, Fischerei und Flußbiologie*, 16:38–48.
- Krogdahl, Å., Lea, T. B., und Olli, J. J. (1994). Soybean proteinase inhibitors affect intestinal trypsin activities and amino acid digestibilities in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 107(1):215–219.
- Krogdahl, A., Sundby, A., und Olli, J. J. (2004). Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) digest and metabolize nutrients differently. Effects of water salinity and dietary starch level. *Aquaculture*, 229(1-4):335–360.
- Lotze, H. K., Coll, M., Magera, A. M., Ward-Paige, C., und Airoidi, L. (2011). Recovery of marine animal populations and ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 26(11):595–605.
- Masood, E. (1997). Fishing by Numbers Reveals Its Limits. *Nature*, 386:110.
- Maurya, A. K. und Said, P. P. (2014). Extrusion Processing on Physical and Chemical Properties of Protein Rich Products-An Overview. *Journal of Bioresource Engineering and Technology*, 2(4):61–67.
- Meyer, H. (2014). VI Ernährung verschiedener Spezies; 13 Nutzfische (Forellen, Karpfen). In Kamphues, J., Coenen, M., Wolf, P., Leisegang, A., Eder, K.,

-
- Männer, K., Iben, C., Zebeli, Q., Zentek, J., und Kienzle, E., editors, *Supplemente zur Tierernährung für Studium und Praxis*, pages 487–493. M & H Schaper, Hannover, 12 edition.
- Molony, B. (2001). Environmental requirements and tolerances of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Brown trout (*Salmo trutta*) with special reference to Western Australia : A review. *Fisheries Research Report*, 130:1–28.
- Muziasari, W. I., Pitkänen, L. K., Sørum, H., Stedtfeld, R. D., Tiedje, J. M., und Virta, M. (2017). The Resistome of Farmed Fish Feces Contributes to the Enrichment of Antibiotic Resistance Genes in Sediments below Baltic Sea Fish Farms. *Frontiers in Microbiology*, 7:Beitrag: 2137.
- Neilsen, A. M., Eriksen, N. T., Iversen, J. J. L., und Riisg†rd, H. U. (1995). Feeding, growth and respiration in the polychaetes *Nereis diversicolor* (facultative filter feeder) and *N. virens* (omnivorous) - a comparative study. *Marine Ecology Progress Series*, 125:149–158.
- NRC (1993). Nutrient Requirement Tables. In *Nutrient Requirements of Fish*. The National Academies Press, Washington D.C.
- NRC (2012). Nutrient Requirement Tables. In Whitacre, P. T., editor, *Nutrien Requirements of Fish and Shrimp*, pages 326–350. The National Academies Press, Washington D.C.
- Oliva-Teles, A., Gouveia, A., Gomes, E., und Rema, P. (1994). The effect of different processing treatments on soybean meal utilization by rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 124(1-4):343–349.
- Oliveira, G. und Hecht, S. (2016). Sacred groves, sacrifice zones and soy production: globalization, intensification and neo-nature in South America. *The Journal of Peasant Studies*, 43(2):251–285.
- Opstvedt, J., Nygard, E., Samuelsen, T. A., Venturini, G., Luzzana, U., und Mundheim, H. (2003). Effect on protein digestibility of different processing conditions in the production of fish meal and fish feed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(8):775–782.
- Palmegiano, G. B., Daprà, F., Forneris, G., Gai, F., Gasco, L., Guo, K., Peiretti, P. G., Sicuro, B., und Zoccarato, I. (2006). Rice protein concentrate meal as a potential ingredient in practical diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 258(1-4):357–367.

-
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., and Torres Jr., F. (1998). Fishing Down Marine Food Webs. *Science*, 279(5352):860–863.
- Pauly, D., Graham, W., Libralato, S., Morissette, L., and Deng Palomares, M. L. (2008). Jellyfish Blooms: Causes, Consequences, and Recent Advances. *Hydrobiologia*, 616(1):67–85.
- Pellerin-Massicotte, J., Martineu, P., Desrosiers, G., Caron, A., and Scaps, P. (1994). Seasonal variability in biochemical composition of the polychaete *Nereis virens* (Sars) in two tidal flats with different geographic orientations. *Comparative Biochemistry and Physiology – Part A: Physiology*, 107(3):509–516.
- Phillips Dales, R. (1957). Preliminary observations on the role of the coelomic cells in food storage and transport in certain polychaetes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 36(1):91–110.
- Polakof, S., Alvarez, R., and Soengas, J. L. (2010). Gut glucose metabolism in rainbow trout: implications in glucose homeostasis and glucosensing capacity. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 299(1):R19–R32.
- Poppi, D. A., Quinton, V. M., Hua, K., and Bureau, D. P. (2011). Development of a test diet for assessing the bioavailability of arginine in feather meal fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 314(1-4):100–109.
- Potin, P., Patier, P., Floc'h, J. Y., Yvin, J. C., Rochas, C., and Kloareg, B. (1992). Chemical characterization of cell-wall polysaccharides from tank-cultivated and wild plants of *Delesseria sanguinea* (Hudson) Lamouroux (Ceramiales, delesseriaceae): culture patterns and potent anticoagulant activity. *Journal of Applied Phycology*, 4(2):119–128.
- Rebl, A., Verleih, M., Korytás, T., Kühn, C., Wimmers, K., Köllner, B., and Goldammer, T. (2012). Identification of differentially expressed protective genes in liver of two rainbow trout strains. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 145(1-2):305–315.
- Regina, M. (1993). Methionine toxicity in the rat in relation to hepatic accumulation of S-Adenosylmethionine: prevention by dietary stimulation of the hepatic transsulfuration pathway. *Archives of biochemistry and biophysics*, 300:598–607.
- Ricker, W. E. (1975). *Computation and interpretation of biological statistics of fish populations*, volume 191.

-
- Riera, R., Becerro, M. A., Ramos, E., Monterroso, Ó., und Rodríguez, M. (2015). Response of different benthic habitats to off-shore fish cages. *Aquaculture Research*, 46(6):1490–1500.
- Rohde, S. und Wahl, M. (2008). Antifeeding Defense in Baltic Macroalgae: Induction By Direct Grazing Versus Waterborne Cues. *Journal of Phycology*, 44(1):85–90.
- Ruohonen, K., Vielma, J., und Grove, D. J. (1998). Growth and food utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring and dry diets enriched with fish oil. *Aquaculture*, 163(3-4):275–283.
- Sayles, L. P. (1935). The effects of salinity changes on body weight and survival of *Nereis virens*. *The Biological Bulletin*, 69(2):233–244.
- Schäfer, F. und Würtz, S. (2016). Regenbogenforelle. Leibniz Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, www.aquakulturinfo.de.
- Schreckenbach, K. (1994). Kiemenerkrankungen und Ernährung bei Karpfen. *Fischer und Teichwirt* 45, pages 3–7.
- Schreckenbach, K. (2015). Einfluss von Umwelt und Ernährung bei der Aufzucht und beim Besatz von Fischen.
- Schreckenbach, K. und Spangenberg, R. (1983). Das Auftreten von Stickstoffverbindungen bei der Satzkarpfenproduktion und ihre Toxizität. *Z. Binnenfischerei DDR*, 4:115–122.
- Schreckenbach, K., Spangenberg, R., und Krug, S. (1975). Die Ursache der Kiemennekrose. *Z. Binnenfischerei DDR*, 22(9):257–288.
- Serrano, E., Storebakken, T., Penn, M., Overland, M., Hansen, J. O., und Mydland, L. T. (2011). Responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to increasing dietary doses of lupinine, the main quinolizidine alkaloid found in yellow lupins (*Lupinus luteus*). *Aquaculture*, 318(1-2):122–127.
- Shepherd, C. J. und Jackson, A. J. (2013). Global fishmeal and fish-oil supply: Inputs, outputs and markets. *Journal of Fish Biology*, 83(4):1046–1066.
- Soler-Vila, A., Coughlan, S., Guiry, M. D., und Kraan, S. (2009). The red alga *Porphyra dioica* as a fish-feed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): effects on growth, feed efficiency, and carcass composition. *Journal of Applied Phycology*, 21(5):617–624.

-
- Sommer, W. (2017). Rapskuchen - ein hochwertiges Futtermittel.
- Sorensen, M., Storebakken, T., und Shearer, K. D. (2005). Digestibility, growth and nutrient retention in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets extruded at two different temperatures. *Aquaculture Nutrition*, 11(4):251–256.
- Souci, Fachmann, und Kraut, editors (2015). *Die Zusammensetzung der Lebensmittel*. MedPharm, Stuttgart, 8 edition.
- Soxhlet, F. (1879). Die Gewichtsanalytische Bestimmung des Milchfettes. *Polytechnisches Journal*, 232:461–465.
- Spannhof, L. und Plantikow, H. (1983). Studies on carbohydrate digestion in rainbow trout. *Aquaculture*, 30(1-4):95–108.
- Thiessen, D. L., Maenz, D. D., Newkirk, R. W., Classen, H. L., und Drew, M. D. (2004). Replacement of fishmeal by canola protein concentrate in diets fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*, 10(6):379–388.
- Thurston, R. V., Phillips, G. R., Russo, R. C., und Hinkins, S. M. (1981). Increased Toxicity of Ammonia to Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) Resulting from Reduced Concentrations of Dissolved Oxygen. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(8):983–988.
- Tkachuk, R. (1969). Nitrogen-to-protein conversion factors for cereals and oilseed meals.
- Trussel, R. P. (1972). The Percent Un-Ionized Ammonia in Aqueous Ammonia Solutions at Different pH Levels and Temperatures. *Journal of Fisheries Research Board Canada*, 29(10):1505–1507.
- Tusche, K., Arning, S., Wuertz, S., Susenbeth, A., und Schulz, C. (2012). Wheat gluten and potato protein concentrate - Promising protein sources for organic farming of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 344-349:120–125.
- Tusche, K., Nagel, F., Arning, S., Wuertz, S., Susenbeth, A., und Schulz, C. (2013). Effect of different dietary levels of potato protein concentrate supplemented with feed attractants on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal Feed Science and Technology*, 183(3-4):202–209.
- Väinölä, R. und Strelkov, P. (2011). *Mytilus trossulus* in Northern Europe. *Marine Biology*, 158(4):817–833.

-
- Wacyk, J., Powell, M., Rodnick, K., Overturf, K., Hill, R. A., und Hardy, R. (2012). Dietary protein source significantly alters growth performance, plasma variables and hepatic gene expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed amino acid balanced diets. *Aquaculture*, 356-357:223–234.
- Weatherley, A. H. und Gill, H. S. (1983). Protein, lipid, water and caloric contents of immature rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson, growing at different rates. *Journal of Fish Biology*, 23(6):653–673.
- Wilson, R. P. und Cowey, C. B. (1985). Amino acid composition of whole body tissue of rainbow trout and atlantic salmon. *Aquaculture*, 48:373–376.
- Worm, B., Hilborn, R., Baum, J. K., Branch, T. A., Collie, J. S., Costello, C., Fogarty, M. J., Fulton, E. A., Hutchings, J. A., Jennings, S., Jensen, O. P., Lotze, H. K., Mace, P. M., McClanahan, T. R., Minto, C., Palumbi, S. R., Parma, A. M., Ricard, D., Rosenberg, A. A., Watson, R., und Zeller, D. (2009). Rebuilding global fisheries. *Science (New York, N.Y.)*, 325(5940):578–585.
- Yildirim, Ö., Ergün, S., Yaman, S., und Türker, A. (2009). Effects of Two Seaweeds (*Ulva lactuca* and *Enteromorpha linza*) as a Feed Additive in Diets on Growth Performance, Feed Utilization and Body Composition of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of the Faculty of Veterinary Medicine, Kafkas University*, 15(3):455–460.
- Yone, Y., Furuichi, M., und Urano, K. (1986). Effects of dietary Wakame *Undaria penatifida* and *Ascophyllum nodosum* supplements on growth, feed efficiency, and proximate composition of liver and muscle of red sea bream. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 52(8):1465–1468.

Abbildungsverzeichnis

1	Illustration zu „fishing down marine food webs“; Entlang des Pfeiles wird die Entwicklung mariner Ökosysteme von der Vergangenheit über die Gegenwart bis hin zu einer möglichen Zukunft dargestellt.	8
2	Schematische Darstellung einer modernen Futtermittelproduktion für Speisefische, verändert nach einer Vorlage der Amandus Kahl GmbH & Co. KG	11
3	Lage der Beprobungsstandorte Gollwitz (G) und Riff Nienhagen (RN), an der deutschen Ostseeküste	18
4	Die schematische Darstellung des Aufbaus für den Fütterungsversuch verwendeten Aquarienwände der LFA-MV am Standort Born zeigt die Anordnung der technischen Komponenten und der Versuchsbecken. Nur besetzte Becken nahmen an der Zirkulation teil. Exemplarisch werden die Becken der Kontrollversuchsgruppe (R1-3) sowie der Versuchsgruppe Wurm (W1-3) gezeigt.	25
5	Statistische Unterschiede (multidimensionale Skalierung) in der Aminosäurezusammensetzung der Proteine der Testorganismen im Jahresverlauf 2014; A.v.: <i>Alitta virens</i> , D.s.: <i>Delesseria sanguinea</i> , H.d.: <i>Hediste diversicolor</i> , M.spp.: <i>Mytilus spp.</i> ; Größenklassen: a (1-3 cm), b (3-5 cm) und c (>5 cm)	34
6	A: Messwerte der abiotischen Parameter pH-Wert und Temperatur, sowie die Ammoniumkonzentration in den Versuchsbecken. B: Verlauf der Ammoniakkonzentration im Wasser der Versuchsanlage während des Fütterungsversuches mit eingetragenen Grenzkonzentrationen nach (Schreckenbach, 2015) (orange und rote Waagerechte.)	36
7	Interpolierte Entwicklung der Fischmasse in den Versuchsbecken der Kreislaufanlage (durchgezogene Linien) sowie der kumulative Futtermiteinsatz (gestrichelte Linien). A: Alge (n=2 Becken), AW: Alge + Wurm (n=3), K: Kontrolle (n=2), M: Muschel (n=3), W: Wurm (n=3).	40

8	Wachstumsraten der einzelnen Versuchsgruppen innerhalb der vier Untersuchungsintervalle während des Fütterungsversuches. A: Alge, AW: Alge + Wurm, K: Kontrolle, M: Muschel, W: Wurm (n=3 Untergruppen für alle Versuchsgruppen). Wachstumsraten innerhalb eines Versuchsintervalles mit unterschiedlichen Überschriften weichen signifikant voneinander ab ($p \leq 0,05$; einfache ANOVA mit post-hoc-Test nach Tukey)	41
9	Die Feed-Conversion-Ratio zeigt den Futtermittelumsatz der einzelnen Versuchsgruppen während des Fütterungsexperimentes (n=3 Untergruppen für alle Versuchsgruppen). Die Werte geben den benötigten Futtermittelleinsatz pro erzeugtem kg Fischmasse wieder. Mittelwerte mit unterschiedlichen Überschriften weichen signifikant voneinander ab ($p \leq 0,05$; einfache ANOVA mit post-hoc-Test nach Tukey).	42
10	Box-Whisker-Plot zu Schlachtdaten der Versuchsfische. Dargestellt sind Konditionsindex und Eingeweidefettanteil. O: Nullprobe (n=3 Fische), K: Kontrolle (n=15), A: Alge (n=18), M: Muschel (n=18), W: Wurm (n=18), AW: Alge + Wurm (n=18). Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).	44
11	Box-Whisker-Plots zu Schlachtdaten der Versuchsfische. Dargestellt sind Anteile der Schlachtkörpermasse (ohne Kopf) am Gesamtfisch sowie der hepatospmatische Index (HSI). O: Nullprobe (n=3 Fische), K: Kontrolle (n=15), A: Alge (n=18), M: Muschel (n=18), W: Wurm (n=18), AW: Alge + Wurm (n=18). Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal - Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).	45
12	Hauptkomponentenanalyse der Aminosäuremuster der untersuchten Fischkompartimente; schwarze Ellipsen zeigen die Vertrauensintervalle der Gruppen auf einem Niveau von 95 %; Unterschiede zwischen den Gruppen werden durch die orangefarbenen Pfeile dargestellt; O (Nullprobe, n=3), K (Kontrollfutter, n=10), A (Algenfutter), M (Muschelfutter), W (Wurmfutter), AW (Algen-Wurm-Mischfutter)	51

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht zu Probenahmezeitpunkten, Standorten und entnommenen Spezies; <i>Mytilus spp.</i> (M.spp.), <i>Delesseria sanguinea</i> (D.s.) und <i>Hediste diversicolor</i> (H.d.); Größenklassen: a (1-3 cm), b (3-5 cm) und c (>5 cm)	17
2	Programm zur Rohfettextraktion	21
3	Verwendete Versuchsfuttermittel und deren Zusammensetzung; K: Kontrollfutter, A: Algenfutter, M: Muschelfutter, W: Wurmfutter, A+W: Algen und Wurm Mischfutter	24
4	Prozentuale Zusammensetzung der Testorganismen bezüglich ihrer Trockenmasse (TS) entsprechend der Weender-Futtermittelanalyse. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte (Doppelbestimmung) vom Herbst 2014 (außer <i>Alitta virens</i>). Für <i>Mytilus spp.</i> werden die Daten der Größenklasse b (3-5 cm) gezeigt.	29
5	Rohproteingehalte der Organismen (% TS) im Jahresverlauf 2014; <i>Mytilus</i> der Größenklasse b (3-5 cm); * Werte vor Methodenumstellung bei Probennahme; (Doppelbestimmung)	30
6	Aminosäuregehalte der Testorganismen (Doppelbestimmung; $g \times (16 g N)^{-1}$) in Proben aus dem Sommer 2014 (außer <i>Alitta virens</i>), <i>Mytilus spp.</i> der Größenklasse b (3-5 cm), Die Aminosäuren Asparagin und Asparaginsäure (Asx) sowie Glutamin und Glutaminsäure (Glx) wurden zusammen bestimmt.	31
7	Für den Fleischansatz wichtige Aminosäuren (Doppelbestimmung; $g \times (16 g N)^{-1}$) der Testorganismen im Jahresverlauf, <i>Mytilus spp.</i> der Größenklasse b (3-5 cm)	33
8	Zusammensetzung der hergestellten Testfuttermittel bezüglich der Trockenmasse (TS); Doppelbestimmung; Kontrollfutter (K), Algenfutter (A), Muschelfutter (M), Wurmfutter (W) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW)	37
9	Liste der im Versuchsverlauf verstorbenen Fische; Versuchsuntergruppen: Kontrollfutter (K1-3), Algenfutter (A1-3), Muschelfutter (M1-3, Wurmfutter (W1-3) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW1-3)	39
10	Benotung der gustatorischen Testung gekochter Proben der Kontrollgruppe (K) vor und nach der Ausnüchterung (Aus.); 1 (sehr gut), 2 (gut), 3 (befriedigend), 4 (ausreichend), 5 (ungenügend) . . .	46

11	Benotung der gustatorischen Testung geräucherter Proben der Versuchsgruppen nach der Ausnüchterung; 1 (sehr gut), 2 (gut), 3 (befriedigend), 4 (ausreichend), 5 (ungenügend); Algenfutter (A), Muschelfutter (M), Wurmfutter (W) sowie Algen-Wurm-Mischfutter (AW)	46
12	Rohwerte und Aminosäuregehalte einzelner ganzer Versuchsfische (K: Kontrolle, A: Alge, AW: Alge + Wurm, M: Muschel, W: Wurm) im Vergleich zur Nullprobe (O) und zum Literaturwert (R) (Wilson und Cowey, 1985); Doppelbestimmung	48
13	Proteinretention in den Becken der Versuchsgruppen; Kontrollgruppe: K (n=1), Algenfutter: A (n=1), Muschelfutter M (n=3), Wurmfutter: W (=3), Algen-Wurm-Mischfutter: AW (n=1)	49
14	Gehalte von Rohprotein (% TS), sowie wichtiger muskelproteinbildender Aminosäuren ($g \times (16 g N)^{-1}$) der Versuchsfische der einzelnen Futtermitteltestgruppen gemessen im ganzen Fisch als auch im Filet; O (Nullprobe, n=3), K (Kontrollfutter, n=10), A (Algenfutter), M (Muschelfutter), W (Wurmfutter), AW (Algen-Wurm-Mischfutter); Werte mit unterschiedlichen Überschriften unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc-Test nach Bonferroni).	50

Danksagung

Zu Guter Letzt möchte ich meinen Betreuern Herrn Prof.Dr. Hendrik Schubert Frau Prof. Dr. Petra Wolf für die Möglichkeit und das Vertrauen danken, diese Arbeit mit der verfügbaren technischen Ausstattung sowie den motivierten Mitarbeitern der Arbeitsgruppen beider Lehrstühle, durchführen zu können. Dabei sei insbesondere Herrn Dr. Chritof Schygula gedankt, der an der Ideenfindung zu diesen Untersuchungen beteiligt war und die praktische Probennahme tauchend unterstützte. Besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Dr. Ralf Bochert und dem Team der Aquakulturversuchsanlage in Born für die reibungslose t und die Unterstützung bei praktischen Problemen. Des Weiteren möchte ich dem Kapitän des Kutters Praunus Thomas Lorenz und der Besatzung sowie den Forschungstaucher der Universität Rostock für die umfangreiche Unterstützung danken, denn Feldarbeit zu See ist ohne Zusammenarbeit nicht möglich. Schließlich danke ich auch meiner langjährigen Lebensgefährtin Frau Dr. Christiane Volkmann weil sie mir, insbesondere in der Abschlussphase dieser Arbeit, den Rücken stärkte und auch so total toll ist.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Gregor Thum, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Lokale marine Ressourcen zur Herstellung von Alleinfuttermitteln für die Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*)“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als angegeben, verwendet wurde. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Curriculum vitae

1. Persönliche Daten

Name Gregor Thum
Geburtsdatum 06.03.1985 in Neubrandenburg

2. Ausbildung

1995-2004 Gymnasium Malchin (Abitur)
2004-2006 Wehrdienst (Pz.Gren.Btl. 411)
2006-2012 Universität Rostock (Diplom)

3. Berufserfahrung

2013-2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Baltic IMTA (Uni-Rostock)
2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter ZosInf (Uni-Rostock)