

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

Aus der Professur für Aquakultur und Sea-Ranching
Der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS) des
Afrikanischen Raubwelses *Clarias gariepinus* und ihre
Bedeutung für die landwirtschaftliche Entwicklung in
Mecklenburg-Vorpommern**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von
M.Sc. Johannes Christian Pasch
Quellenweg 17, 52074 Aachen

Rostock, den 30.03.2022

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004195

Betreuer und erster Gutachter: Prof. Dr. Harry W. Palm
Professur für Aquakultur und Sea-Ranching
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 2
18059 Rostock

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Bela H Buck
Biosciences | Shelf Sea System Ecology
Knowledge and Technology Transfer | Marine
Aquaculture
Alfred Wegener Institute
Bussestrasse (Raum ZMZFE-Altbau-DA 9)
27570 Bremerhaven

Dritter Gutachter: Prof. Dr. Marcus Mergenthaler
FB Agrarwirtschaft Soest
Fachhochschule Südwestfalen
Lübecker Ring 2
59494 Soest

Eingereicht am: 31.03.2022

Datum der Disputation: 11.11.2022

Zusammenfassung

Nachhaltige Lebensmittelproduktionssysteme wie rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS) und Aquaponik nehmen vor dem Hintergrund steigender Dünge- und Futtermittelpreise und -knappheit, geringer Niederschläge und Ernteausfälle einen zunehmenden Stellenwert in der Gesellschaft ein. Beide Technologien stehen jedoch in Mecklenburg-Vorpommern (MV) vor wirtschaftlichen Problemen. Bei der Initialisierung der Afrikanischen Raubwels (*Clarias gariepinus*)-Wirtschaft in Deutschland wurde die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Anlagen von staatlichen Förderungen der Bioenergie abhängig gemacht, anstelle Strategien für eine selbstständig profitable Fischproduktion zu entwickeln. Ohne adäquate Vermarktungsstrategien führte die schnelle Ausweitung der Produktion bei diesem Nischenprodukt ohne entsprechende Nachfrage zu einem starken Preisverfall und einer unwirtschaftlichen Produktion. Zusätzlich wurden und werden durch die EEG (Erneuerbares-Energie-Gesetz)-Novellen Förderungen der Bioenergie gekürzt oder teilweise ganz gestrichen, wodurch das ehemalige Konzept nicht mehr aufgeht. Da der Verkaufspreis bis heute keinen rentablen Stand erreichen konnte, steht die Clarias-Wirtschaft vor ernststen Problemen und Anlagen haben den Betrieb aufgegeben oder stehen kurz davor. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Verbesserung der Clarias-RAS und -Aquaponik in MV und Deutschland leisten. Dazu wurde das Clarias-Wachstumsverhalten untersucht, neue aquaponische Subsysteme erforscht, die Entwicklung und aktuelle Situation der Afrikanischen Raubwels RAS und Aquaponik in MV analysiert und daraus konkrete Handlungsempfehlungen hergeleitet.

In einem *C. gariepinus* Besatzdichtenexperiment wurde bei höheren max. Besatzdichten von 180 kg/m³ (120 Fische/m³) ein heterogeneres Wachstum als bei niedrigeren max. Besatzdichten von 50 kg/m³ (33 Fische/m³) festgestellt (Besatzdichte je Produktionsvolumen). Zudem wurde beobachtet, dass die anfänglich homogen sortierten Fische sehr gute Futtermittelnutzungsraten und Wachstumswerte aufwiesen und diese mit zunehmender Heterogenität der Fische auch zunehmend schlechter wurden und von Standardwerten abwichen. Das bei den höheren Besatzdichten ausgeprägtere heterogene Wachstum führte dort nach 155 Tagen zu 4,4% kleineren ($45,97 \pm 4,72$ cm) und 8,3% leichteren ($864,77 \pm 319,18$ g) Fischen als bei den niedrigen Besatzdichten ($47,99 \pm 4,09$ cm; $943,06 \pm 289,47$ g). Geringere Besatzdichten produzieren daher mit einer höheren Ressourceneffizienz, würden jedoch in RAS-Anlagen aufgrund der hohen Anschaffungskosten zu einer höchst unprofitablen Produktion führen und sollten daher nicht angewendet werden. Bei aktuellen Marktbedingungen muss für eine bessere Aufteilung der Fixkosten bei maximalen Besatzdichten von > 450 kg/m³ (> 300 Fische/m³) produziert werden. Das heterogene Größenwachstum der intensiveren Besatzdichten und die dadurch bedingten, verschlechterten Wachstumsleistungen könnten durch Sortierung oder anderweitige Maßnahmen wie beispielsweise Fütterungsprotokolle verhindert werden.

Die Pflanzenzucht gilt in der Aquaponik als wirtschaftliche Hauptstütze mit vielen offenen Fragen bezüglich der Zuchteffizienz verschiedener hydroponischer Subsysteme. Daher wurden das DRF- (Dynamic Root Floating) System und die in der aquaponischen Forschung noch nie verwendete Aeroponik auf ihre aquaponische Eignung hin untersucht. Das DRF-System wurde entwickelt, um bei hohen Wassertemperaturen (> 30 °C) die Wurzelaktivität durch einen wenige Zentimeter großen Luftraum zwischen Sprossansatz und Nährlösung und die dadurch induzierte Bildung von „Luftwurzeln“ aufrechtzuerhalten. Im FischGlasHaus der Universität Rostock betrug die Wassertemperaturen der Hydroponik während des Hochsommerversuchs durchschnittlich 28 °C (max. 34,4 °C), wodurch das DRF-System signifikant besser performen konnte als die in der Aquaponik meistverwendeten NFT- und DWC-Systeme. Die wirtschaftlich wichtige Blattbiomasse von Basilikum war im Nass- und Trockengewicht im DRF signifikant höher ($45,36 \pm 13,53$ g; $4,96 \pm 1,57$ g) im Vergleich zu DWC/Raft ($34,94 \pm 9,44$ g; $3,74 \pm 1,04$ g)

und NFT-Systemen (Growpipes) ($32,74 \pm 9,84$ g; $3,75 \pm 1,22$ g). Aufgrund der klimatischen Verhältnisse treten diese hohen Wassertemperaturen in Norddeutschland nicht häufig genug auf, als dass das DRF System für eine kommerzielle Applikation für ganzjährig produzierende Anlagen infrage kommen könnte.

Die Aeroponik konnte in ihrer ersten aquaponischen Integration über 40% mehr Blattmasse in Feucht- und Trockengewicht ($28,53 \pm 8,74$ g; $4,26 \pm 1,23$ g) als DRF ($20,19 \pm 6,57$ g; $2,83 \pm 0,90$ g) und DWC/Raft ($20,35 \pm 7,14$ g; $2,84 \pm 1,04$ g) produzieren. DRF und DWC/Raft haben aufgrund der Wassertemperaturen im Optimalbereich von $26,2$ °C (max. < 30 °C) beinahe identisch performt. Da in der Aeroponik die Wurzeln in der Luft wachsen und von feinen Düsen mit Nährlösung besprüht werden, besteht die Herausforderung darin, das Fischprozesswasser mit geeigneten Filtersystemen zu reinigen, um das Zusetzen der Düsen zu verhindern. Aufgrund der herausragenden Wachstumsergebnisse kann die Aeroponik als ein geeignetes Pflanzenanbausystem für die kommerzielle Aquaponik bewertet werden. Die höheren Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Systemen können sich durch die höheren Erträge schnell amortisieren.

Eine aquaponische Integration birgt eine Vielzahl an Herausforderungen, kann aber bei guter Vermarktung zusätzliche Einkünfte generieren und durch verbesserte Kundenwahrnehmung der aquaponischen Produkte zu Preisaufschlägen von Fisch und Pflanzen führen. Kommerzielle, großskalige Betriebe sollten sich auf die Vermarktung im Lebensmitteleinzelhandel konzentrieren, während kleinskalige, semikommerzielle Betriebe den Fokus auf die Direktvermarktung legen müssen. Unabhängig von der Größe ist eine Diversifizierung wichtig, und zudem sollte den Kunden beim Einkauf eine umfangreiche Customer Experience geboten werden. Die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Aquaponik bleibt weiterhin die Crux und in vielen Studien wird von unrentablen Fischzuchten berichtet. Auch in Mecklenburg-Vorpommern haben die für Aquaponik infrage kommenden Clarias-RAS u.a. aufgrund der niedrigen Verkaufspreise Probleme, wirtschaftlich zu produzieren.

Obwohl sich die Branche seit 2017 im Abbau befindet, stellt gerade der deutlich zu niedrige Verkaufspreis auch das größte Verbesserungspotential der Branche dar. Jede zehnpromtente Erhöhung des Verkaufspreises kann das Betriebsergebnis einer Anlage mit 300 m³ Produktionsvolumen (PV) ausgehend von einem Verkaufspreis von $2,2$ EUR/kg um 70 Tsd. EUR/Jahr steigern. Die Betriebsaufgabe einiger Clarias-Erzeuger und die damit zusammenhängende Verknappung des Angebots bei gleichzeitig reduzierter Konkurrenz kann sich ebenfalls vorteilhaft auf die überbleibenden Produzenten auswirken. Weiteres Potential besitzt die Clarias-Wirtschaft, da dem Fischmarkt allgemein ein Wandel zum Verkäufermarkt prognostiziert wird und die Produzenten in bessere Verhandlungspositionen kommen werden. Von steigenden Fischpreisen werden die Clarias-Erzeuger entweder direkt mitprofitieren oder indirekt, weil Verbraucher aufgrund gestiegener Preise anderer Arten nach günstigen Alternativen suchen.

Zu den wichtigsten Maßnahmen zählen bessere Vermarktungsstrategien, um den Clarias als attraktives Substitut im Bewusstsein der Konsumenten zu verankern und damit Nachfrage und Verkaufspreis zu erhöhen. Neue Anlagen sollten in einer Größe von 600 m³PV oder größer geplant werden um durch Skaleneffekte profitabel zu produzieren. Für eine profitable Produktion unter aktuellen Marktbedingungen sollten die variablen Produktionskosten bei Anlagen mit 300 m³PV unter $1,51$ EUR/kg liegen. Da in der Verarbeitung der größte Teil der Wertschöpfung in der Lebensmittelindustrie stattfindet, müssen betriebsintern die Produkte zu höheren Veredelungsstufen verarbeitet werden. Durch größere Absatzmengen an Lebensmitteleinzelhandel und Endverbraucher können die Umsätze weiter gesteigert werden. Die Versuche, ein Netzwerk der Clarias-Wirtschaft nachhaltig aufzubauen, sind bisher gescheitert, obwohl die Bildung eines Netzwerks großes Potential entfaltet und Synergien freisetzt.

Abstract

Sustainable food production systems, such as recirculating aquaculture systems (RASs) and Aquaponics, are assuming increasing importance in society in the context of rising fertiliser and feed prices and shortages, low rainfall, and crop shortfalls. However, both technologies face economic problems in Mecklenburg-Western Pomerania (MV). With the initialisation of the African catfish (*Clarias gariepinus*) economy in Germany, the economic viability of the investments was made dependent on government aid for bioenergy, instead of developing strategies for independently profitable fish production. Without adequate marketing strategies to create a demand, the quick production expansion of this niche product without corresponding demand led to a significant drop in prices and uneconomical production. In addition, the Renewable Energy Acts amendments have reduced or sometimes eliminated subsidies for bioenergy, so the former business concept is no longer viable. Since the sales price could not achieve a profitable level, the Clarias economy is facing serious problems. Meanwhile, facilities have terminated the business or are close to production cessation. The present work aims to contribute to the improvement of Clarias RASs and aquaponics in Mecklenburg-Western Pomerania and Germany. For this purpose, the growth of African catfish was investigated, new aquaponic subsystems were examined, the development and current situation of African catfish RAS and aquaponics in MV was analysed, and specific recommendations for action were derived.

In a *C. gariepinus* stocking density experiment, a more heterogeneous growth was observed in higher max. stocking densities of 180 kg/m³ (120 fish/m³) than in lower max. stocking densities of 50 kg/m³ (33 fish/m³) (stocking density per production volume). In addition, it was observed that the initially homogeneously graded fish had excellent feed conversion ratios and growth values. These figures also deteriorated progressively with increasing heterogeneity of the fish and increasingly deviated from standard values. The more pronounced heterogeneous growth in higher stocking densities resulted in 4.4% smaller (45.97 ± 4.72 cm) and 8.3% lighter (864.77 ± 319.18 g) fish after 155 days than in lower stocking densities (47.99 ± 4.09 cm; 943.06 ± 289.47 g). Therefore, lower stocking densities produce more resource efficiently but would lead to highly unprofitable production in RASs due to the high initial costs. Therefore, such densities should not be applied in RASs. Under current market conditions, production must be at maximum stocking densities of > 450 kg/m³ (> 300 fish/m³) for a better allocation of fixed costs. The heterogeneous growth in the intensive stocking densities and the subsequent deterioration in growth performance could be prevented by grading or other measures such as feeding protocols.

Plant cultivation is considered the key driver of economic success in aquaponics, with many open questions regarding the growth efficiency of different hydroponics subsystems. Therefore, the DRF (Dynamic Root Floating) system and aeroponics, which have never been used in aquaponics research, were investigated for their aquaponics suitability. The DRF system was developed to maintain root activity at high water temperatures (> 30 °C) by establishing an air space of a few centimetres between the shoots and the nutrient solution, inducing the formation of "aero-roots". In the FishGlasHouse of the University of Rostock, the water temperatures in the hydroponic tanks were, on average, 28 °C (max. 34.4 °C) during the midsummer trial, which enabled the DRF system to perform significantly better than the most commonly used NFT and DWC systems in aquaponics. The economically significant leaf biomass of basil was significantly higher in wet and dry weight in DRF (45.36 ± 13.53 g; 4.96 ± 1.57 g) compared to DWC/raft (34.94 ± 9.44 g; 3.74 ± 1.04 g) and NFT systems (grow pipes) (32.74 ± 9.84 g; 3.75 ± 1.22 g). Due to Northern Germany's climatic conditions, these high water temperatures do not occur frequently enough for the DRF system to be considered for commercial application for the year-round production of plants.

Aeroponics produced over 40% more leaf mass in wet and dry weight (28.53 ± 8.74 g; 4.26 ± 1.23 g) than DRF (20.19 ± 6.57 g; 2.83 ± 0.90 g) and DWC/Raft (20.35 ± 7.14 g; 2.84 ± 1.04 g) in its first aquaponic integration. DRF and DWC/Raft performed almost identically due to water temperatures in the optimal range of 26.2 °C (max. <30 °C). Since the roots grow in the air in aeroponics, and are sprayed with a nutrient solution by fine nozzles, the challenge is to clean the fish process water with suitable filter systems to prevent the nozzles from clogging. Due to the outstanding growth results, aeroponics can be seen as a suitable plant cultivation system for commercial aquaponics. The higher investment costs than conventional systems can be amortised by the higher yields.

Aquaponic integration involves several challenges, but if marketed well, it can generate additional income and increase the price of fish and plants through improved customer perception of aquaponic products. Commercial, large-scale farms should focus on food retail marketing, while small-scale/semi-commercial farms should focus on direct marketing. Regardless of size, diversification is important and customers should be offered a comprehensive customer experience when shopping. The economic viability of aquaponics remains the crux, and many studies have reported unprofitable fish farms. In Mecklenburg-Western Pomerania, the Clarias RAS that are eligible for aquaponics also have problems producing economically, partly due to low sales prices.

Although the industry has been in an economic slowdown since 2017, it is precisely the significantly underpriced sales price that represents the greatest improvement potential for the industry. Every ten percent increase in the sales price can increase the net returns of a system with a production volume of 300 m³PV by 70 thous. EUR/year, based on 2.2 EUR/kg sales price. Abandoning some Clarias-enterprises and the resulting drop in supply with reduced competition could also benefit the remaining producers. The Clarias economy has further potential, as the fish market is predicted to change into a seller's market, and producers will be in better negotiating positions. Clarias producers will either benefit directly from rising fish prices or indirectly, because consumers will look for cheaper alternatives due to increased prices of other species.

The most important measures include better marketing strategies to create awareness of Clarias among consumers as an attractive substitute, thus increasing demand and sales price. New systems should be planned in a size of 600 m³PV or larger to produce profitably through economies of scale. For profitable production under current market conditions, variable production costs should be below 1.51 EUR/kg for 300 m³PV systems. Since processing accounts for most of the value-added in the food industry, products must be processed internally to higher finishing stages. Through larger sales volumes to food retailers and end-consumers, sales can be further increased. Attempts to sustainably establish a network of the Clarias-industry have failed so far. Despite this setback, forming a network has great potential and generates synergies.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIV
Abkürzungsverzeichnis	XV
Publikationsverzeichnis für diese Schrift	XVIII
Beitrag des Autors zu den einzelnen Publikationen	XIX
1. Einleitung	1
1.1. Aquakultur-Wirtschaft.....	1
1.1.1. Aquakultur weltweit.....	1
1.1.2. Aquakultur in der EU	2
1.1.3. Aquakultur in Deutschland	3
1.2. Der Afrikanische Raubwels.....	4
1.2.1. Afrikanischer Raubwels in der Aquakultur	4
1.2.2. Besatzdichten des Afrikanischen Raubwelses	5
1.3. Rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS).....	7
1.3.1. Technologie	7
1.3.2. Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlicher Aquakultur	8
1.3.3. Besatzdichten in RAS.....	9
1.3.4. RAS-Wirtschaft.....	10
1.4. Aquaponik	10
1.4.1. Einführung.....	10
1.4.2. Skalierung	13
1.4.3. Hydroponische Subsysteme	15
1.4.4. Aquaponik Wirtschaft	19
1.5. RAS und Aquaponik in Mecklenburg-Vorpommern	21
1.5.1. Kurzportrait Mecklenburg-Vorpommern	21
1.5.2. Entwicklung der RAS in Mecklenburg-Vorpommern.....	22
1.5.3. Aktueller Stand ab 2020	27

1.6. Ziele und Methodik dieser Arbeit	30
1.7. Arbeitshypothesen	31
1.8. Struktur der Dissertation	32
2. Effects of Stocking Density of African Catfish (<i>Clarias gariepinus</i>) in RAS on Growth Performance and Profitability	33
2.1. Introduction.....	34
2.2. Materials and Methods	35
2.2.1. Experimental set-up	35
2.2.2. Fish Production and Feeding	36
2.2.3. Physicochemical water parameters	37
2.2.4. Mathematical and statistical analyses	37
2.3. Results	38
2.3.1. Physicochemical water parameters	38
2.3.2. Fish growth.....	39
2.3.3. Distribution of fish growth	42
2.3.4. Value calculation of possible harvest	44
2.4. Discussion	44
2.4.1. Water quality	44
2.4.2. Growth and Distribution.....	45
2.4.3. Value calculation of possible harvest	48
2.5. Conclusions	48
3. Growth of Basil (<i>Ocimum basilicum</i>) in DRF, Raft, and Grow Pipes with Effluents of African Catfish (<i>Clarias gariepinus</i>) in Decoupled Aquaponics	50
3.1. Introduction.....	51
3.2. Materials and Methods	52
3.2.1. Hydroponics Unit.....	52
3.2.2. Fish Production and Feeding	54
3.2.3. Plant Cultivation	54
3.2.4. Physicochemical Parameters	55
3.2.5. Mathematical and Statistical Analysis.....	55
3.3. Results	56
3.3.1. Fish Growth	56
3.3.2. Plant Growth.....	57

3.3.3. Physicochemical Parameters	60
3.4. Discussion	61
3.4.1. Fish Growth	61
3.4.2. Physio-Chemical Parameters	62
3.4.3. Plant Growth.....	63
3.5. Conclusions	66
4. Growth of Basil (<i>Ocimum basilicum</i>) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (<i>Clarias gariepinus</i>) in Decoupled Aquaponics (s.s.)	67
4.1. Introduction.....	68
4.2. Materials and Methods	69
4.2.1. Hydroponics Unit.....	69
4.2.2. Fish Production and Feeding	71
4.2.3. Plant Cultivation	71
4.2.4. Physicochemical Parameters	72
4.2.5. Mathematical and Statistical Analysis.....	72
4.3. Results	73
4.3.1. Fish Growth	73
4.3.2. Plant Growth.....	74
4.3.3. Physicochemical Parameters	76
4.4. Discussion	77
4.4.1. Fish Growth	77
4.4.2. Physicochemical Parameters	78
4.4.3. Plant Growth.....	78
4.5. Conclusions	80
5. Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (<i>Clarias gariepinus</i>) Aquaculture in Northern Germany	81
5.1. Introduction.....	82
5.2. Materials and Methods	83
5.2.1. African Catfish RAS—Initial Model	84
5.2.2. Entrepreneurial Decision Scenarios.....	86
5.2.3. Calculations	88
5.3. Results	88
5.3.1. Initial Model.....	88

5.3.2. Change in Costs and Prices	89
5.3.3. Entrepreneurial Decision Scenarios.....	92
5.4. Discussion	95
5.4.1. Initial Model with Price Variation	95
5.4.2. Entrepreneurial Decision Scenarios.....	97
5.5. Conclusions	100
6. Diskussion.....	102
6.1. Welswachstum.....	102
6.1.1. Teichzucht vs. RAS.....	103
6.1.2. Adultes Fischwachstum und Sortierung.....	105
6.1.3. Einteilung von Besatzdichten.....	106
6.2. Aquaponik mit Afrikanischem Raubwels.....	107
6.2.1. Hydroponische Subsysteme	107
6.2.2. Betriebswirtschaftliche Herausforderungen	110
6.2.3. Aquaponische Vermarktung	113
6.2.4. Skalierung	116
6.2.5. Aquaponik in MV und Deutschland	117
6.3. Clarias-Wirtschaft in MV	122
6.3.1. Status Quo	122
6.3.2. Verkaufspreis.....	125
6.3.3. Marketing	126
6.3.4. Wertschöpfung und Absatzkanäle.....	128
6.3.5. Forschung, Netzwerk und Zukunft.....	131
6.4. Zusammenfassung	134
6.5. Ausblick.....	136
7. Literaturverzeichnis.....	138
8. Eidesstaatliche Erklärung.....	161
9. Curriculum Vitae	162
10. Danksagung	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1. Produktionsmengen der wichtigsten Fischarten deutscher Aquakultur ab 1 Mio. kg im Jahr 2020 (Destatis, 2021).....	3
Tabelle 1.2. Produktionsmenge aller Aquakulturerzeugnisse und Anlagenanzahl aller Aquakultursysteme und der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) der meisterzeugenden Bundesländer im Jahr 2020 (Destatis, 2021).	4
Tabelle 1.3. Produktionsvolumen (m ³ PV), voraussichtliche Produktionsmenge (t) und Anzahl Mitarbeiter der privat betriebenen, aktiven rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Mecklenburg-Vorpommern in 2022.....	29
Table 2.1. Physicochemical nutrient water parameters (mean ± SD), measured in the inlets of the sedimenters of the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) during the experimental period of 155 days; different letters represent different groups (p < 0.05).....	38
Table 2.2. Comparison of individual fish growth parameters (mean ± SD, n) between the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) on the respective sampling days from day 1 (initial, June) until day 155 (final, November) of fish length (cm), fish weight (g), and condition factor (C); different letters represent different groups (p < 0.01).	40
Table 2.3. Comparison of fish growth parameters (mean ± SD, n = 3) calculated by tank biomasses between the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) on the respective sampling days from day 1 (initial, June) until day 155 (final, November) with total tank biomass development from day 1 to day 155 of tank mass (kg), growth per tank (kg, %), feed per tank (kg), feed conversion ratio (FCR), specific growth rate (SGR %/d) and survival rate (%); different letters represent different groups (p < 0.05).	41
Table 2.4. Economic information for African catfish reared for 155 days in the intensive aquaculture unit (IAU) and extensive aquaculture unit (EAU) in 1 m ³ tanks (n = 3). The values show the possible harvest per tank at that time.....	44
Table 3.1. Mean (± standard deviation (SD)) of the biological growth parameters of African catfish in different weight classes (class 1 = large fish, class 2 = medium fish, class 3 = small fish) held in the intensive aquaculture unit (IAU) during basil cultivation (36 days) under reduced feeding (25%). Different letters show different groups (p < 0.05).	56
Table 3.2. <i>Ocimum basilicum</i> growth parameters of wet and dry weights (means ± SD) and total weight parameters (sum of all individual plant weights) of the three experimental groups (dynamic root floating technique (DRF), floating raft culture (raft), grow pipes) at the end of the experiment (36 days). Different letters show different groups (p < 0.05, n = 21). Last part of the table shows total and leaf mass of <i>Ocimum basilicum</i> (wet and dry) produced by one system over the entire experiment period.....	58
Table 3.3. Means (±SD) of photosynthetic photon flux density (PPFD), illumination intensity (lx), and physico-chemical water parameters of the three subsystems measured in the sump of the three hydroponic subsystems during basil cultivation (36 days).	60
Table 4.1. Growth parameters (means ± SD) of African catfish of different weight classes (class 1 = large fish, class 2 = medium fish, class 3 = small fish) held in the intensive aquaculture	

unit (IAU) (49 days); different letters represent significant differences between the groups (p < 0.05). 73

Table 4.2. Growth parameters (means ± SD) wet and dry mass of *Ocimum basilicum* in the three hydroponic subsystems (dynamic root floating technique: DRF, floating raft culture: raft, aeroponics: AERO) at the end of the experiment (39 days); different letters represent significant differences between the groups (p < 0.05, n = 21). The third part of the table shows total and leaf mass of *Ocimum basilicum* (wet and dry) produced by one system over the experimental period without statistical comparison. The last two parts show the color differences of the plants from the colorimeter indexes L*a*b and the total color differences between the systems. 75

Table 5.1. Yearly revenues and costs of the initial model of an African catfish farm with 300 m³ production volume with a max stocking density of 450 kg/m³ (average 180 kg/m³) and an output of 320,288 kg/year. 89

Table 5.2. Change of key performance indicators for each ten percent change (±10%) in variable costs, investment costs and sales price. Returns (EUR/year), ROI (%) and Profit/Unit (EUR/kg) are total numbers. Percentage change of contribution margin (CM), variable costs (VC) and total costs (TC) shows the proportional change from the value of the initial model (EUR/year and EUR/unit). 90

Table 5.3. Impact of a ten percent reduction (-10%) in respectively one of the variable costs or investment costs or a ten percent increase (+10%) in the sales price on the key performance indicators (KPIs). The initial model is the calculation basis (CB) with annual returns of 0 EUR. 91

Table 5.4. Sales price, contribution margin per unit (CMU), variable costs per unit (VCU), total costs per unit (CPU) and profit per unit (PPU) of the respective products in the different scenarios. 92

Table 5.5. The impact of the different scenarios on the total investment costs (TIC), and yearly variable costs (VC), fixed costs (FC), revenues, returns and return on investment (ROI). In addition, the impact of a ten percent change (+10%) in the sales price of the respective production unit on the key performance indicators in the respective scenarios is calculated. In case of price variations, TIC, VC and FC remain unchanged. 93

Tabelle 6.1. Klassifizierung der unterschiedlichen Besatzdichten des Afrikanischen Raubwels in Teichwirtschaft und rezirkulierenden Aquakultursystemen (RAS).107

Tabelle 6.2. S.W.O.T (Strengths = Stärken; Weaknesses = Schwächen; Opportunities = Chancen und Threats = Risiken) Matrix der deutschen Clarias-RAS-Wirtschaft (nächste Seite).123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1. Verhältnis zwischen Besatzdichte und Wachstum von <i>C. gariepinus</i> in Erdteichen in der zentralafrikanischen Republik (Übersetzt aus Micha, 1976, zitiert auf FAO, 1996).....	6
Abbildung 1.2. Grundschemata einer RAS-Anlage mit den vier Hauptkomponenten.	7
Abbildung 1.3. Symbiotischer Aquaponikkreislauf.	11
Abbildung 1.4. a) FischGlasHaus (FGH) der Universität Rostock auf 1 000 m ² Gesamtfläche, b) Fischtanks der Aquakulturabteilung und c) Pflanzenwachstum durch Fischprozesswasser in hydroponischen Systemen. (Fotos von: AUF Uni-Rostock (2022); a) Prof. Dr. Harry Palm, b) M.Sc. Felix Nitschke, c) k.A.).....	14
Abbildung 1.5. Die zwei meistverwendeten kommerziellen hydroponischen Subsysteme in der Aquaponik: a) DWC (Floß-)System und b) NFT-System.	16
Abbildung 1.6. Luftwurzeln eines DRF-System bei Pak-Choi Pflanzen aus a) Silva et al. (2015) und b-c) Kao & Hsiang (1991).....	17
Abbildung 1.7. Entwicklung der Anzahl der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Deutschland (D) und Mecklenburg-Vorpommern (MV) im Verhältnis zu den Produktionsmengen ab 2008. Eine offizielle Statistik zu den Clarias-Anlagen in D und MV existiert erst ab 2012.	23
Abbildung 1.8. Preisentwicklung (EUR/kg) ausgewählter Aquakulturarten aus RAS in Deutschland ab 2014 bei Abgabe an den Großhandel, welcher die Fische größtenteils lebend aufkauft (BMEL, 2016-2021)	25
Abbildung 1.9. Umsatz- und Produktionsmengenentwicklung der in deutschen rezirkulierenden Aquakultursystemen (RAS) gezüchteten Arten Afrikanischer Raubwels (Clarias), Europäischer Aal, Europäischer Wels und Zander im Verhältnis zur produzierten Menge von 2014-2019 (2020).....	25
Abbildung 1.10. a) Anteil der Produktionsmengen (t) von Clarias in Mecklenburg-Vorpommern (MV) und b) Anteil von MV an der deutschen Clarias-Produktion in 2020 (Destatis, 2021).	28
Abbildung 1.11. Höhe der Zuflüsse der Europäischen Förderprogramme (EFF, EMFF und weitere) nach Mecklenburg-Vorpommern (MV: blau) und Deutschland (D: grau) von 2009-2019. Die Gelder setzen sich aus EU-Mitteln und Kofinanzierungen des Landes und Gemeinschaftsausgaben zusammen. Für das Jahr 2008 waren keine Angaben für MV vorhanden. Die Grafik wurde aus den Daten der Jahresberichte der Deutschen Binnenfischerei 2009-2019 erstellt (BMEL, 2011-2021).	29
Abbildung 1.12. Meilensteine der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Mecklenburg-Vorpommern.	30
Figure 2.1. Schematic view of the FishGlassHouse fish rearing units. Intensive Aquaculture Unit (IAU) with nine fish tanks (T1-T9), solid separation unit (Sedimenter: SE-I), and sump (SU-I) with biofilter (Trickling Filter: TF-I); Extensive Aquaculture Unit (EAU) with nine fish tanks (T1-T9), solid separation unit (Sedimenter: SE-E), and sump (SU-E) with biofilter (Trickling Filter: TF-E). The fishes for the experiment were integrated into a regular staggered production with three weight classes in the IAU and EAU: Juvenile experimental fish (T2*, T5*, T8*); medium weight class (T1, T4, T7); large weight class (T3, T6, T9).....	36

Figure 2.2. Development of the chemical water parameters of nitrate, ammonium, and nitrite in the intensive aquaculture unit (IAU) and extensive aquaculture unit (EAU) during the experimental period of 155 days. The grey shaded blocks 1-4 represent the respective fish life stages: block 1 from day 1-36, block 2 from day 36-68, block 3 from day 68-99, and block 4 from day 99-155.	39
Figure 2.3. Three fish of the same age from IAU on day 68 (August) with visible growth differences.	40
Figure 2.4. Development of A) fish length (cm), B) fish weight (g) and C) condition factor (C) of the IAU (blue) and EAU (grey) of day 36 (July), day 68 (Aug), day 99 (Sep), and the final day 155 (Nov). Different letters represent different groups ($p < 0.01$).....	42
Figure 2.5. Growth performance of <i>C. gariepinus</i> A) fish length, B) fish weight, and C) condition factor (C) of the intensive (IAU) and extensive (EAU) fish production units at the final day 155. IAU, n = 355; EAU, n = 98.	43
Figure 2.6. Transfer of the A) fish length (cm) and B) weight (g) data into density functions of the normal distribution. The graphics visualise the length and weight development of the IAU (blue lines) and EAU (black lines) on day 36 of the experiment in July, day 68 in August, day 99 in September, and the final day 155 in November.	43
Figure 3.1. Schematic illustration of the decoupled experimental hydroponics cycle with dynamic root floating (DRF), raft, and grow pipes hydroponic components in cabin 1_05 of the FishGlassHouse. The nutrient-enriched water from the aquaculture was pumped via a transfer tank into the decoupled hydroponics cabin.	53
Figure 3.2. Schematic illustration of the dynamic root floating system (DRF) with air space of 5 cm. I = Inflow, O = Outflow.	53
Figure 3.3. Examples of basil plants at the end of the experiment from DRF (left), raft (middle), and grow pipes (right).	59
Figure 3.4. <i>Ocimum basilicum</i> leaf number development per week in hydroponic subsystems DRF, raft, and grow pipes during the experiment over a period of 36 days.....	59
Figure 3.5. Electrical conductivity ($\mu\text{s}/\text{cm}$) and water temperature ($^{\circ}\text{C}$) over the experimental period.	61
Figure 4.1. Schematic illustration of the decoupled experimental hydroponics cycle with DRF, raft, and AERO hydroponic subsystems in cabin 1_05 of the FischGlasHaus. DF: drum filter; F: filter. Aquaculture effluent water from <i>C. gariepinus</i> production was pumped to the water transfer tank.....	70
Figure 4.2. Schematic illustration of the dynamic root floating (DRF) system with air space of 5 cm. I = inflow, O = outflow.	70
Figure 4.3. Schematic illustration of the aeroponics system (AERO). I = inflow, O = outflow.	71
Figure 4.4. Average basil plants at the end of the experiment with visibly longer and finer roots and similar shoot growth performance in DRF (left) and raft (middle). Short but compact root growth and a better shoot growth performance in AERO (right).	74
Figure 4.5. Weekly increase of (a) shoot axis length (cm) and (b) number of leaves of <i>Ocimum basilicum</i> in DRF, raft, and AERO hydroponic subsystems over the trial period (39 days). From the fourth week of the experiment, the AERO system showed increased growth performance.	74

Figure 4.6. Roots of *O. basilicum* at the end of the experiment: (a) DRF system with roots growing in 5 cm airspace; (b–d) roots of the aeroponics system are shorter and tangled but with more lateral roots. 76

Figure 4.7. Electric conductivity ($\mu\text{s}/\text{cm}$) and water temperature ($^{\circ}\text{C}$) increase during the experiment. ... 77

Figure 5.1. Illustration of the 300 m³ African catfish RAS initial model. The system is divided into four independent loops. 84

Abbildung 6.1. Verhältnis zwischen Besatzdichte und Wachstum von *C. gariepinus* in norddeutscher RAS (blau) und in Erdteichen in der zentralafrikanischen Republik (schwarz; eigene Darstellung, basierend auf Micha, 1976, zitiert auf FAO, 1996).103

Abbildung 6.2. Google Trends für den Suchbegriff „Aquaponik“ in Deutschland (Google, 2022).119

Abbildung 6.3. Die Hype-Zyklus Kurve von Gartner (orange) und die zwei Kurven, die sie kombiniert: Hype Level-Kurve (blau) und Entwicklung der Geschäftsreife S-Kurve (grün) (übersetzt aus Turnšek et al., 2020).120

Symbolverzeichnis

<	kleiner als, weniger als
\$	Dollar
%	Prozent
&	und
€	Euro
>	größer als, mehr als
±	Plus/Minus
=	entspricht
≤	kleiner oder gleich
≥	größer oder gleich
°C	Grad Celsius
µg	Mikrogramm
µm	Mikrometer
µS	Mikrosiemens
×	Mal

Abkürzungsverzeichnis

AERO	Aeroponik
ANOVA	analysis of variance, Varianzanalyse
AUF	Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
C	Konditionsfaktor (condition factor)
ca.	circa, ungefähr
Ca ²⁺	Calcium-Ion(en)
CB	Berechnungsbasis (calculation basis)
cm	Zentimeter
CM	Deckungsbeitrag (contribution margin)
CMU	Deckungsbeitrag pro Einheit (contribution margin per unit)
CO ₂	Kohlen(stoff)dioxid
D	Deutschland
DRF	Dynamic Root Floating
DWC	Deep Water Culture
e.g.	zum Beispiel (exempli gratia)
EAU	Extensive Aquaculture Unit
EC	elektrische Leitfähigkeit (electric conductivity)
Ed. / Eds.	Editor(en) bzw. Herausgeber
EEG	Erneuerbares-Energie-Gesetz
EMF	Europäischer Meeres- und Fischereifonds
EMFAF	Europäischer Meeres-, Aquakultur- und Fischereifonds
EMFF	Europäischer Meeres- und Fischereifonds
et al.	et alii, et aliae, et alia (und andere)
etc.	und so weiter (et cetera)
EU	Europäische Union
EUR	Euro
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FC	Fixkosten (fixed costs)
Fe ²⁺	Eisen
FGH	FischGlasHaus
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde (hour)
I	Einfluss (inflow)
i.d.R.	in der Regel
IAU	Intensive Aquaculture Unit
IMTA	Integrierte Multitrophische Aquakultur
K ⁺	Kalium-Ion(en)

kg	Kilogramm
km	Kilometer
KPIs	Leistungskennzahl (Key-Performance-Indicator)
kWh	Kilowattstunde
L	Liter
L.	Linné
lx	Beleuchtungsstärke (illumination intensity)
m	Meter
M.Sc.	Master of Science
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
m ³ PV	Kubikmeter Produktionsvolumen
max	maximal
mg	Milligramm
Mg ²⁺	Magnesium-Ion(en)
min	Minute(n)
min	mindestens
Mio.	Millionen
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mmol	Millimol
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N	Stickstoff (Nitrogen)
n	Anzahl (number)
Na ⁺	Natriumionen
NFT	Nutrient-Film-Technology
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium-Ion(en)
NH ₄ ⁺ -N	Ammonium Stickstoff (ammonium nitrogen)
NO ₂ ⁻	Nitrit-Ion(en)
NO ₂ ⁻ -N	Nitrit-Stickstoff (nitrite-nitrogen)
NO ₃ ⁻	Nitrat-Ion(en)
NO ₃ ⁻ -N	Nitrat-Stickstoff (nitrate-nitrogen)
O	Ausfluss (outflow)
o.V.	ohne Verfasser
p	Signifikanzniveau
p	Wahrscheinlichkeit (probability)
Pers. Komm.	persönliche Kommunikation
PO ₄ ³⁻ -P	Orthophosphat
PPFD	photosynthetische Photonenflussdichte (photosynthetic photon flux density)
PV	Produktionsvolumen
RAS	rezirkulierende(s) Aquakultursystem(e)
ROI	Kapitalrendite (Return on Investment)

s	Sekunde(n)
S.	Seite
s.	siehe
s.l.	sensu lato (im weiteren Sinne)
s.s.	sensu stricto (im engeren Sinne)
s.u.	siehe unten
S.W.O.T.	Strengths = Stärken; Weaknesses = Schwächen; Opportunities = Chancen und Threats = Risiken
SD	Standartabweichung (standard deviation)
SE	Sedimenter
SGR	spezifische Wachstumsrate (specific growth rate)
SO ₄ ³⁻	Sulphat
sog.	sogenannt(e)
sp.	Spezies, Art (species)
spp.	species pluralis (mehrere, nicht einzeln genannte Arten)
SU	Sumpf
t	Tonne(n)
T	Tanks
Tab.	Tabelle, Table
TAN	(total ammonia nitrogen)
TC	Gesamtkosten (total costs)
TDN	gelöster Gesamtstickstoff (total dissolved nitrogen)
TEUR	Tausend Euro
TF	Trickling Filter
thous.	Tausend (thousand)
TIC	Investitionskosten (total investment costs)
TON	gesamter oxidiertes Stickstoff (total oxidized nitrogen)
Tsd.	Tausend
u.a.	unter anderem/anderen
USA	United States of Amerika
usw.	und so weiter
VC	variable Kosten (variable costs)
VCU	variable Kosten pro Einheit (variable costs per unit)
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Publikationsverzeichnis für diese Schrift

- Pasch, J., Appelbaum, S., Knaus, U., Sandmann, P., Palm, H. P. (2022). Effects of Stocking Density of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in RAS on Growth Performance and Profitability. *Aquaculture Research*, eingereicht.
- Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, raft, and grow pipes with effluents of African catfish (*Clarias gariepinus*) in decoupled aquaponics. *AgriEngineering*, 3(1), 92-109.
- Pasch, J., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics (ss). *AgriEngineering*, 3(3), 559-574.
- Pasch, J., & Palm, H. W. (2021). Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany. *Sustainability*, 13(24), 13569.

Beitrag des Autors zu den einzelnen Publikationen

Pasch, J., Appelbaum, S., Knaus, U., Sandmann, P., & Palm, H. P. (2022). Effects of Stocking Density of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in RAS on Growth Performance and Profitability. *Aquaculture Research*, eingereicht.

J. Pasch: Experimentaldesign, Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -analyse, Statistische Auswertung, Schreiben, Editieren, Einreichen

S. Appelbaum: Editieren

U. Knaus: Statistische Auswertung, Editieren

P. Sandmann: Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -analyse

H. W. Palm: Experimentaldesign, Schreiben, Editieren

Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, raft, and grow pipes with effluents of African catfish (*Clarias gariepinus*) in decoupled aquaponics. *AgriEngineering*, 3(1), 92-109.

J. Pasch: Experimentaldesign, Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -analyse, Statistische Auswertung, Schreiben, Editieren, Einreichen

B. Ratajczak: Experimentaldesign, Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -analyse, Statistische Auswertung

S. Appelbaum: Editieren

H. W. Palm: Experimentaldesign, Schreiben, Editieren

U. Knaus: Experimentaldesign, Statistische Auswertung, Schreiben, Editieren

Pasch, J., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics (ss). *AgriEngineering*, 3(3), 559-574.

J. Pasch: Experimentaldesign, Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -analyse, Statistische Auswertung, Schreiben, Editieren, Einreichen

S. Appelbaum: Editieren

H. W. Palm: Experimentaldesign, Schreiben, Editieren

U. Knaus: Experimentaldesign, Statistische Auswertung, Schreiben, Editieren

Pasch, J., & Palm, H. W. (2021). Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany. *Sustainability*, 13(24), 13569.

J. Pasch: Modelldesign, Datenaufnahme und -analyse, Mathematische Berechnungen, Schreiben, Editieren, Einreichen

H. W. Palm: Modelldesign, Datenaufnahme und -analyse, Schreiben, Editieren

1. Einleitung

Die Weltbevölkerung ist im Jahr 2021 auf 7,89 Mrd. Menschen angestiegen und wird sich laut einer UN-Prognose bis 2050 auf 9,74 Mrd. und 2100 auf 10,87 Mrd. Menschen erhöhen (Statista, 2022a). Um die Versorgung von 10 Mrd. Menschen sicherzustellen, müsste unsere aktuelle Lebensmittelproduktion um etwa 50% gesteigert werden (WRI, 2019). Während in den Entwicklungsländern zukünftig vor allem die quantitative Versorgung mit Grundnahrungsmitteln im Vordergrund stehen wird, wird in Europa primär nach Möglichkeiten gesucht, hochwertige Lebensmittel ressourcensparend nachhaltig herzustellen und möglichst regional zu vertreiben. Zu einer der wichtigsten Nahrungsquellen zählt weltweit der Fisch, welcher den Menschen seit Jahrtausenden als wichtige Proteinquelle dient.

Mehr als 3,3 Mrd. Menschen decken mehr als 20% ihrer tierischen Proteinzufuhr mit Fisch und Meeresfrüchten ab und im globalen Süden stellt Fisch sogar die wichtigste Proteinquelle und Lebensgrundlage für 800 Mio. Menschen dar (FAO, 2020a). Der weltweite Fischkonsum 2021 betrug über 20 kg pro Kopf und Jahr, was in einem Gesamtkonsum von 157 Mio. t Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen resultierte (Statista, 2022b). In Deutschland lag der jährliche pro Kopf-Konsum 2020 bei 14 kg und der Gesamtverbrauch bei ca. 1,1 Mio. t (Statista, 2021a). Die wachsende Bevölkerung, im Zusammenhang mit dem zunehmenden Mittelstand in Asien, hat zu einer stark zunehmenden Nachfrage von Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen geführt, was wiederum den weltweiten Anstieg des Fischfangs förderte. Als Resultat sind mehr als ein Drittel aller Fischbestände bereits überfischt (FAO, 2020a). Der weltweite Fischfang stieg bis Ende der 80er Jahre stark an und befand sich bis 2017 auf einem stagnierenden Niveau um die 80-90 Mio. t, bis im Jahr 2018 mit 96,4 Mio. t. ein neues Rekordjahr gemeldet wurde und seitdem wieder stagniert (FAO, 2020a). Die Nachfragedifferenz aus Fischfang und weltweitem Konsum wird durch die Aquakultur befriedigt. Die gängigste Definition der Aquakultur kommt von der FAO und beschreibt diese als *„kontrollierte Aufzucht von aquatischen Organismen, wie Fischen, Muscheln, Krebstieren und aquatischen Pflanzen. Es finden produktivitätssteigernde Eingriffe in den Aufzuchtprozess statt, beispielsweise durch regelmäßige Besatzmaßnahmen, Fütterung, Schutz vor Raubtieren, etc. Die gezüchteten Organismen befinden sich zudem im Besitz von Personen oder Unternehmen.“* (Übersetzt aus FAO, 1988).

1.1. Aquakultur-Wirtschaft

1.1.1. Aquakultur weltweit

Das jährliche Wachstum der Aquakultur lag zwischen 2015-2020 zwischen 2,3-4,1%, (EUMOFA, 2020) und die weltweite Fischerzeugung in Aquakultur ist im vergangenen Jahrzehnt durchschnittlich jährlich um 6% gestiegen (BMEL, 2021), wodurch die Aquakultur immer noch der am schnellsten wachsende Sektor der Landwirtschaft bleibt (NASTAQ, 2020; Naylor et al., 2021). Im Jahr 2018 lag die weltweite Produktion von Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen (Fische und Meeresfrüchte) bei 178,5 Mio. t, wovon 96,4 Mio. t aus Fischerei kamen und 82,1 Mio. t aus Aquakultur (62,5% davon im Inland) (FAO, 2020a). Zusätzlich wurden in Aquakulturen 32,4 Mio. t aquatische Pflanzen und Algen hergestellt, was zu einer gesamten Aquakultur Produktion von 114,5 Mio. t führt und einen Anteil von 54,3% der weltweiten Produktion aquatischer Organismen darstellt. China stellt mit knapp 58% der globalen Produktion den mit Abstand größten Erzeuger von Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen dar (FAO, 2020a). Das Potenzial der Mollusken- (Weichtiere) und Algenzucht zur globalen Ernährung beizutragen, gilt aktuell als unzureichend ausgeschöpft (Naylor et al., 2021).

Für den Seafood Markt wird ein Wandel vom Käufer- zum Verkäufermarkt prognostiziert (Ibaaf, 2020, zitiert in EUMOFA, 2020), was bedeutet, dass die Nachfrage nach Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen

größer ist als das Angebot, sich Anbieter in besseren Marktpositionen befinden und dadurch Preise erhöht werden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Asiatische Lieferantenländer wie China selbst eine größer werdende Anzahl zahlungsbereiter Kunden besitzt, also zunehmend seinen eigenen Fischkonsum decken wird und weniger ins Ausland exportiert (WiWo, 2018; Ibaaf, 2020). Laut einer Schätzung wird sich von 2016 bis 2030 die Nachfrage um 20% erhöhen, während die Gesamtproduktion aus Fischerei und Aquakultur nur um 17,6% zunimmt (EUMOFA, 2020). Die Wandlung zum Verkäufermarkt und höhere Verkaufspreise machen auch die Investition in Aquakulturanlagen und verbesserte Aquakulturtechnologien wie RAS oder Aquaponik interessanter. Verbesserte Technologien führen wiederum zu einer Reduktion des Investitionsrisikos durch Produktionssicherheit (EUMOFA, 2020). Laut Forbes ist aktuell ein enormer Bedarf an Innovationen und Risikokapital notwendig, um die Aquakultur voranzutreiben und den weltweiten Bedarf gerecht zu werden (Forbes, 2019).

Da der intraregionale Handel in den wichtigen Lieferantenländern in Asien die kommenden Jahre zunehmen wird, müssen die Länder in den USA und Europa in neue Produktions- und Liefermodelle investieren um dem verringerten Angebot und steigenden Preisen entgegenzutreten und die eigene Nachfrage zu befriedigen (EUMOFA, 2020). Als neue Modelle können RAS und Aquaponik und nicht traditionelle Arten wie der Afrikanische Raubwels gewertet werden.

1.1.2. Aquakultur in der EU

Die Produktion in der Europäischen Union (EU) folgt nicht dem weltweiten Trend. Europa hat 2017 etwa 1,4 Mio. t Lebendgewicht aquatischer Organismen (Wert von 5,6 Mrd. EUR) produziert, was etwa 20% der EU Fischereiproduktion in 2008 und 2017 ausmachte und damit deutlich unter dem weltweiten Durchschnitt liegt (Eurostat, 2019). Dagegen lag der Wert der Aquakulturprodukte 2017 bei 41% des Gesamtwerts, einem Anstieg von über 7% im Vergleich zu 2008. Der Anteil der EU Produktion an der weltweiten Produktion aquatischer Organismen beträgt lediglich 1,2%. Unter den Mitgliedsstaaten generierte Spanien 2017 mit 315 Tsd. t knapp ein Viertel (23%) der EU-Produktion, gefolgt von England (222 Tsd. t, 16%) und Frankreich (189 Tsd. t, 14%) (Eurostat, 2019) und auf einem der hinteren Ränge rangierte Deutschland mit 40 Tsd. t, was lediglich 2,5% der EU-Produktion entspricht (BMEL, 2019). Bezüglich der Produktionsmengen machten Muscheln (42%), Lachs (15%) und Forelle (14%) mit 71% den Großteil der EU-Gesamtproduktion 2017 aus (EU Parlament, 2021)

Seit dem Jahr 2002 veröffentlicht die EU Strategiepläne zur Entwicklung der europäischen Aquakultur, welche durch europäische Fonds mitgetragen werden. Von 2008-2013 haben der Europäische Fischereifonds (EFF) und von 2014-2020 der Europäische Meeres- und Fischereifonds (EMFF) nachhaltige Aquakulturinvestitionen in großem Umfang subventioniert (EU Parlament, 2021). Von 2021 bis 2030 gelten die neuen strategischen Leitlinien (COM(2021) 239) für die strategische Ausrichtung der Aquakultur der EU, welche die „Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit der EU-Aquakultur“ sicherstellen sollen (EU Parlament, 2021). In Kombination mit den EU-Fördermitteln des neuen, von 2021 bis 2027 laufenden Europäischen Meeres-, Fischerei- und Aquakulturfonds (EMFAF) sollen somit die Herausforderungen und Chancen des EU-Aquakultursektors angegangen- und verbessert werden. Dazu stehen insgesamt Finanzmittel in Höhe von 6,1 Mrd. EUR bereit, wovon ein Teil für die „Entwicklung einer nachhaltigen, wettbewerbsfähigen Aquakultur als Beitrag zur Ernährungssicherheit“ ausgeschüttet wird (European Commission, 2021a). Die Mitgliedstaaten der EU sind zudem verpflichtet, orientiert an den strategischen Leitlinien der EU einen nationalen Strategieplan zu entwickeln. Daraus ergab sich für Deutschland der „Nationale Strategieplan Aquakultur für Deutschland 2021-2030“ (NASTAQ), der Strategien zum Ausbau und zur Förderung von ökologisch-, ökonomisch- und sozial nachhaltiger Aquakultur bereitstellt (NASTAQ, 2020).

1.1.3. Aquakultur in Deutschland

Obwohl die Aquakultur seit Jahren weltweit starke Wachstumsraten verzeichnet, stagnieren die Produktionszahlen in Deutschland bereits seit 2011 (NASTAQ, 2021). Die gesamte deutsche Aquakultur hatte im Jahr 2020 einen gemeldeten Output von ca. 32,2 Tsd. t (18,6 Tsd. t Fisch, 13,5 Tsd. t Muscheln, < 0,1 Tsd. t andere Produkte), was einem Rückgang von 15% zu 2019 (38,1 Tsd. t) entspricht (Destatis, 2020, 2021). Die deutsche Fischerei (Inlands- und Auslandsanlandungen und Binnenfischerei) hatte 2020 ein Fanggewicht von 247,4 Tsd. t, was einem Rückgang von 7% im Verhältnis zu 2019 (247,4 Tsd. t.) entspricht (BMEL-Statistik, 2020). Das Gesamtaufkommen der deutschen Binnenfischerei (inkl. Angelfischerei) und Binnen-Aquakultur im Jahr 2019 wurde auf 36 Tsd. t geschätzt, was etwa 2% unter dem Wert des Vorjahres liegt (BMEL, 2021). Die Anzahl der Aquakulturbetriebe ist 2020 ebenfalls um 9% auf 2 281 gesunken (Destatis, 2021). Der Trend der deutschen Aquakultur und Fischerei stagnierte demnach nicht nur, sondern zeigt hinsichtlich aller wichtigen Produktionskennzahlen trotz zunehmender Forderung nach regionaler Lebensmittelproduktion deutlich nach unten.

Bezüglich der produzierten Fische in Aquakultur (18,6 Tsd. t) hatten Forellenartige (Salmoniden) mit 56,5% (10,5 Tsd. t) den größten Anteil, gefolgt von Karpfenartigen (Cypriniden) mit 27,9% (4,8 Tsd. t.), Europäischem Aal mit 6,3% und Afrikanischem Raubwels mit 5,5% (Tab. 1.1) (Destatis, 2021).

Tabelle 1.1. Produktionsmengen der wichtigsten Fischarten deutscher Aquakultur ab 1 Mio. kg im Jahr 2020 (Destatis, 2021).

Fischart	Produktion (t)
Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	6 035
Gemeiner Karpfen (<i>Cyprinus carpio</i>)	4 788
Lachsforelle (<i>Salmo spp. & Oncorhynchus mykiss</i>)	1 798
Elsässer Saibling (<i>Salvelinus alpinus x fontinalis</i>)	1 525
Europäischer Aal (<i>Anguilla anguilla</i>)	1 187
Afrikanischer Raubwels (<i>Clarias gariepinus</i>)	1 025

Unter den Bundesländern dominierte Schleswig-Holstein im Jahr 2020 die deutsche Aquakultur durch die Muschelzuchten, wo 7 Anlagen insgesamt 11 702 Tsd. t Weichtiere (keine Angaben der Spezies) produzierten (Tab. 1.2) (Destatis, 2021). Bayern stand bei der Fischproduktion mit Salmoniden und Cypriniden unter den Bundesländern an der Spitze. Alleine zur Produktion von *C. carpio* stehen dort 1 216 Anlagen, meist kleinere Teiche. Die meisten RAS standen in Niedersachsen, wo 3 Anlagen mit 1 185 Tsd. t beinahe die gesamte Zucht des Europäischen Aals darstellten. Bezogen auf den Output pro Anlage war Mecklenburg-Vorpommern mit 61 t pro Anlage weit vor den anderen Bundesländern, was primär durch die Produktionsmenge drei großer Clarias-RAS erklärbar ist (Destatis, 2021).

Tabelle 1.2. Produktionsmenge aller Aquakulturerzeugnisse und Anlagenanzahl aller Aquakultursysteme und der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) der meisterzeugenden Bundesländer im Jahr 2020 (Destatis, 2021).

Bundesland	Gesamt		RAS	
	Produktion (t)	Anzahl Anlagen ¹	Produktion (t)	Anzahl RAS ¹
Schleswig-Holstein	11 948	31	-	-
Bayern	5 303	1 579	- ²	5
Niedersachsen	4 600	111	1 321	11
Baden-Württemberg	2 712	96	- ²	3
Sachsen	2 147	152	- ²	2
Nordrhein-Westfalen	1 126	109	31	3
Mecklenburg-Vorpommern	1 166	19	885	9

¹ Ohne Aquarien- und Zierarten, ohne Brut- und Aufzuchtanlagen. ² Produktionsmengen zu gering, Produktionsstillstand, oder keine Angabe.

1.2. Der Afrikanische Raubwels

Der Afrikanische Raubwels (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822), auch Clarias genannt, ist eine Süßwasserspezies, welche innerhalb der Ordnung der Welsartigen (*Siluriformes*) zur Familie der Kiemensackwelse (*Clariidae*) gehört (FishBase, 2018, FAO, 2020b). Sein ursprüngliches Verbreitungsgebiet ist Afrika und das vordere bis westliche Asien. In freier Wildbahn sucht sich der omnivore und nachtaktive Raubwels die Nahrung bevorzugt vom Gewässergrund und kann unter optimalen Bedingungen bis zu 1,70 m lang und 60 kg schwer werden (FishBase, 2020).

1.2.1. Afrikanischer Raubwels in der Aquakultur

Der Afrikanische Raubwels hat sich als attraktive Art für die Aquakultur erwiesen, da er als besonders tolerant und anpassungsfähig gilt (de Moor & Bruton, 1988; Hellmann et al., 2014) und ein ausgezeichneter Speisefisch mit guten Nährstoffwerten, rotem, festen Filet und wenig Gräten ist (Wasenitz et al., 2018). Der Clarias hat eine geringe Krankheitsanfälligkeit, wächst sehr schnell und hat selbst bei minderwertiger Wasserqualität eine ausgezeichnete Futtermittelverwertungsrate (FCR) (Bovendeur et al., 1987; Fatollahi & Kasumyan, 2006; Schram et al., 2010). Zudem besitzt *C. gariepinus* ein akzessorisches Atmungsorgan, wodurch er neben der Kiemenatmung zusätzlich über Maulatmung atmosphärischen Sauerstoff aufnehmen kann (Oellermann, 1995) und dadurch tolerant gegenüber Sauerstoffkonzentrationsschwankungen im Wasser ist. Für optimale Zuchtbedingungen sollte der Sauerstoffgehalt in den Fischzuchtbecken über 4 mg/l liegen, damit die Fische die Wasseratmung präferieren (Oellermann, 1995) und dadurch Energieverluste durch ständiges Aufsteigen zur Luftatmung vermieden werden (Vivekanandan & Pandian, 1977). Bezüglich weiterer physikochemischer Wasserparameter besitzt der Raubwels ebenfalls außergewöhnlich hohe Toleranzwerte, dennoch führt die Einhaltung folgender (Grenz-) Werte zu optimalen Mastbedingungen: Wassertemperatur 26-28 °C (Britz & Hecht, 1987; Ogunji & Awoke, 2017), bzw. 28-30 °C (Oellermann, 1995), pH 6,5-8 (de Moor & Bruton, 1988; FishBase, 2018), Nitrat < 1000 mg/l (Lekang, 2020), Nitrit < 0,6 mg/l (Roques et al., 2015), Ammoniak < 0,41 mg/l (bzw. 24 µM oder 0,34 mg NH₃-N/L) (Schram et al., 2010), Salinität < 7,5‰ (Britz and Hecht, 1989) und Redoxpotential < 300 mV (Lekang, 2020). Kurzfristig kann der Raubwels im Gegensatz zu gewöhnlichen Zuchtfischen auch Werte weit außerhalb des Optimums ertragen (de Moor & Bruton, 1988; Hellmann et al., 2014).

In Afrika und Asien wird der Fisch traditionell in Teichwirtschaften gezüchtet. Dazu werden die Brutteiche häufig gedüngt, um Zooplankton zu vermehren und damit das Larvenwachstum zu verbessern. Ab einer gewissen Größe werden die Fische mit pelletierten Futtermitteln oder landwirtschaftlichen Nebenprodukten gemästet. Durchschnittlich brauchen die Welse 7-10 Monate für ein Schlachtgewicht von 800 g, wodurch ein durchschnittlicher Teich von 0,1 Hektar in einem Produktionszyklus etwa 1,5-4 t erwirtschaftet (Aquakulturinfo, 2022).

Aufgrund der biologischen Eigenschaften des Afrikanischen Raubwelses und Studien aus den Neunzigerjahren, die dem Wels ausgezeichnete Wachstumsraten bei hohen Besatzdichten belegten (Huisman und Richter, 1987; Hogendoorn et al., 1983), hat die Produktion weltweit an Bedeutung gewonnen. Die globale Produktion ist seit der Jahrtausendwende stark angestiegen, so wurden laut der letzten offiziellen Zahlen aus dem Jahr 2019 mehr als 239 Tsd. t des Afrikanischen Raubwelses produziert (FAO, 2020b).

In Europa wurde der Clarias in den frühen 1980er Jahren in den Niederlanden als geeigneter Aquakulturfisch für rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS) bekannt und seit 1985 kommerziell gezüchtet (Aquaculture ID, 2022). Europa trug mit ca. 8 Tsd. t im Jahr 2016 nur geringfügig zur weltweiten Produktion bei, wobei der Großteil in rezirkulierenden Kreislaufanlagen (RAS) erzeugt wurde (FAO 2020b). Als Hauptproduzent in der EU gelten die Niederlande und Ungarn mit einer jährlichen Produktion von ca. 3 Tsd. t. Für die niederländischen Zuchten werden spezifische Wachstumsraten (SGR = specific growth rate) von 3,8 % und Futtermittelnutzungsraten (FCR = feed conversion ratio) von 0,8 berichtet (Hecht & Uys, 1997; Hossain et al., 1998; van de Nieuwegiessen et al., 2008, 2009).

Auch in Deutschland hat sich im letzten Jahrzehnt eine eigenständige Welsaquakultur mit einer gemeldeten Produktion in 2019 von 1 170 t (BMEL, 2021) bzw. in 2020 von 1 025 t (Destatis, 2021) entwickelt. In der Praxis unterteilen die Züchter die fünfmonatige Mast in zwei Hauptphasen: In der ersten Phase werden die Setzlingsbecken mit Jungtieren mit einem Gewicht von etwa 12 g besetzt und wachsen dort auf eine Größe von etwa 100-300 g. Anschließend werden die Fische nach Größe sortiert und wachsen in Mastbecken auf ein Schlachtgewicht von durchschnittlich 1,5 kg heran. Der Sortierzeitpunkt variiert je nach Züchter und gilt als ein ausschlaggebendes Kriterium zur Verhinderung eines ungewünschten heterogenen Fischwachstums und den damit verbundenen negativen Folgen. In norddeutscher Aquakultur wird bei maximalen Besatzdichten von 300 - 550 kg/m³ bei Schlachtung in 4 m³ großen Becken gezüchtet. Das entspricht 200-367 Fische/m³, bzw. einer durchschnittlichen Besatzdichte von 120-220 kg/m³.

1.2.2. Besatzdichten des Afrikanischen Raubwelses

Für den Afrikanischen Raubwels wurde in afrikanischer Teichzucht bereits vor einem halben Jahrhundert festgestellt, dass niedrigere Besatzdichten zu einem signifikant besseren Fischwachstum führen (Abb. 1.1). Auch in thailändischen Teichkäfigen wurden in einem Besatzdichteversuch die höchsten mittleren Fischgewichte bei den niedrigsten Besatzdichten (50 Fische/m³; 385,75 g) festgestellt, wobei die durchschnittlichen Endgewichte mit zunehmender Besatzdichte signifikant abnahmen (200 Fische/m³; 346,81 g) (Hengsawat et al., 1997). Obwohl die Fische in geringeren Besatzdichten besser wachsen, wurden für hohe Besatzdichten aufgrund der höheren Ernte bereits mehrfach eine Verbesserung der Rentabilität der Fischzuchten bestätigt (Hogendoorn und Koops, 1983; Islam et al., 2006; Oké und Goosen, 2019). In Teichkultur können bei einer Wasseraustauschrate von 25% Besatzdichten von bis zu 100 000 kg/ha (= 10 kg/m²) erzielt werden (Britz & Hecht, 1987). Besatzdichten von maximal 10 Fingerlingen/m² mit regelmäßigem Ausdünnen wurden empfohlen, um einen maximalen Bestand von 40 000 kg/ha nicht zu überschreiten und damit Stress und Krankheiten vorzubeugen (de Graaf et al., 1996).

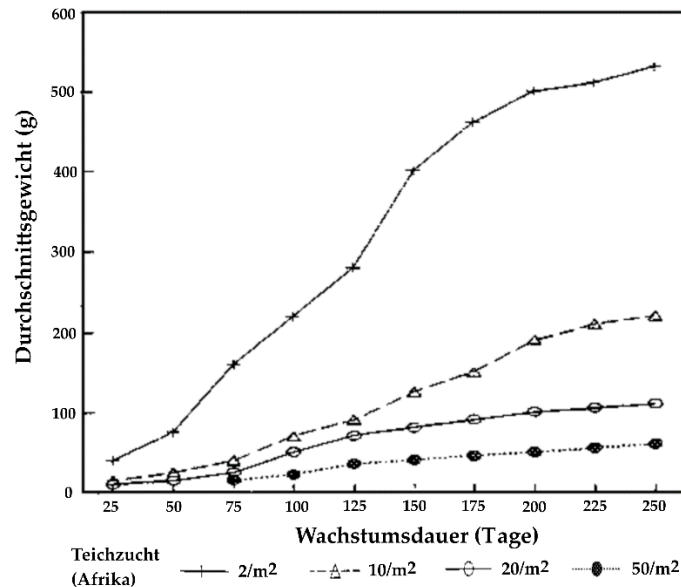


Abbildung 1.1. Verhältnis zwischen Besatzdichte und Wachstum von *C. gariepinus* in Erdteichen in der zentralafrikanischen Republik (Übersetzt aus Micha, 1976, zitiert auf FAO, 1996).

Die Besatzdichten des Afrikanischen Raubwels in RAS wurden nur in der Setzlingsaufzucht gut erforscht und die Forschungsergebnisse haben teilweise widersprüchlichen Aussagen. Beispielsweise wurde einerseits herausgefunden, dass höhere Besatzdichten bei Fingerlingen nicht zu höherem Kannibalismus führten, sondern sogar die nicht-kannibalistische Sterblichkeit verringerten (Haylor, 1991), juvenile Silberwelse einen besseren Metabolismus und weniger Stress hatten (Menezes et al., 2015) und juvenile Clarias besser wuchsen und weniger aggressiv waren (Almazan Rueda, 2004). Dagegen wurde in anderen Studien festgestellt, dass Kannibalismus von Clarias-Larven und Juvenilen positiv besatzdichteabhängig ist (Hecht und Appelbaum, 1988), am meisten Hautverletzungen bei hohen Besatzdichten der juvenilen Clarias vorkommen (van de Nieuwegiessen, 2008) und in mehreren Studien festgestellt, dass das Wachstum von Clarias-Fingerlingen negativ besatzdichteabhängig ist (Haylor, 1993, 1991; Hossain et al., 1998; Dai et al., 2011). Wissenschaftlicher Konsens besteht jedoch darin, dass die größte Schwierigkeit in der Setzlingsaufzucht des Afrikanischen Raubwelses darin besteht, das kannibalistische Verhalten von Larven und juvenilen Tieren zu unterdrücken (Kaiser et al., 1995; Al-Hafedh and Ali, 2004).

Studien, die die Auswirkungen unterschiedlicher Besatzdichten auf das Wachstumsverhalten adulter Afrikanischer Raubwelse in RAS beschreiben, sind kaum vorhanden. In einem Experiment in gestaffelter, semikommerzieller Produktion wurden für die geringsten Besatzdichten (max. 50 kg/m³; 35 Fische/m³) FCRs von 0,94-1,14 und Überlebensraten von 78-96% berichtet, für mittlere Besatzdichten (max. 100 kg/m³, bzw. 70 Fische/m³) FCRs von 0,89-1,01 und Überlebensraten von 89-97% und für die höchste Besatzdichte (max. 200 kg/m³, bzw. 140 Fische/m³) FCRs von 0,94-1,07 und Überlebensraten von 81-90% (Palm et al., 2018b). In einem weiteren RAS Besatzdichtenexperiment wurde bei homogen sortierten, ca. 1 kg schweren Fischen in vier Besatzdichten (67, 155, 244, und 333 Fische/m³) nach 28 Tagen keine Auswirkungen auf Wachstum oder Mortalität festgestellt (van de Nieuwegiessen, 2009). Weiterhin bestehen viele offene Fragen bezüglich der Abhängigkeit von Besatzdichte und Wachstumsperformance und -heterogenität der adulten Tiere.

1.3. Rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS)

Die Aquakultur, als der weltweit am schnellsten wachsende Sektor der Lebensmittelerzeugung (NASTAQ, 2020), mindert nicht nur die Probleme der Überfischung und Welternährung, sondern führt auch wie jede tierische Proteinproduktion zu Problemen. Seit der Jahrtausendwende wird intensiv über die Nachhaltigkeit von Aquakulturen diskutiert (Naylor et al., 2021). Zu den größten Kritikpunkten der Aquakultur zählen sowohl der Einsatz von Chemikalien und Antibiotika, die bei massiver Nutzung in offenen Aquakultursystemen wie Marikultur oder Durchflussanlagen in die Ökosysteme und Nahrungsketten gelangen aber auch Futterreste und Kot, welche zur Eutrophierung der umliegenden Gewässer führen können (Eng et al., 1989; Diana, 2009; Linh et al., 2022). Als Negativbeispiele sind den meisten Verbrauchern die Shrimp- und Pangasiuszuchten in Südost Asien bekannt, welche immer wieder in Zusammenhang mit zerstörten Ökosystemen oder belasteten Produkten gebracht werden. Um den Problemen der offenen Aquakulturanlagen zu begegnen, werden seit über 40 Jahren rezirkulierende Aquakultursystem-Technologien entwickelt (Matulic & Espinal, 2019)

1.3.1. Technologie

Unter einem rezirkulierenden Aquakultursystem (RAS) wird eine landbasierte Zucht von Fischen oder anderen aquatischen Organismen verstanden, welche den Wasserverbrauch durch Filterung, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung minimiert (EUMOFA, 2020). Derartige Systeme bestehen üblicherweise aus den vier Grundkomponenten (1) Fisch Tanks, (2) mechanischer Filter, (2) Biofilter und Gasaustauschvorrichtung (Abb. 1.2).

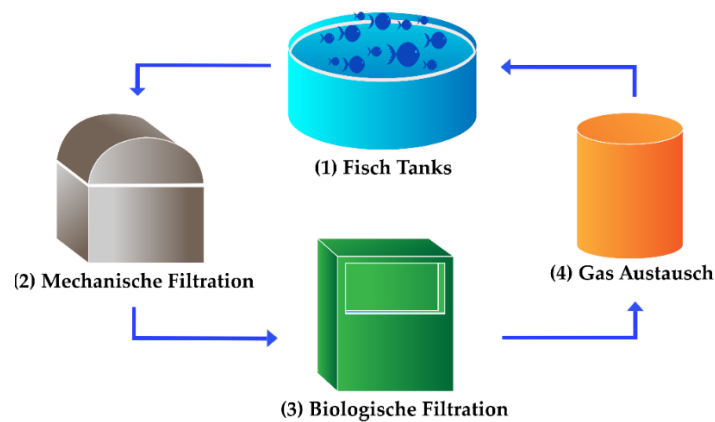


Abbildung 1.2. Grundschemata einer RAS-Anlage mit den vier Hauptkomponenten.

Das Grundprinzip der RAS funktioniert folgendermaßen: (1) Die aquatischen Organismen befinden sich in Produktionstanks und werden dort gefüttert; (2) das Wasser wird durch einen mechanischen Filter wie beispielsweise einen Trommelfilter oder ein Absatzbecken (Sedimenter) von Feststoffen befreit. Zu den Feststoffen zählen die Faeces der Fische, ungenutztes Futter und Bakterienflocken (Chen et al., 1994; Couturier et al., 2009). Häufig kommen mehrere Filtereinheiten im gleichen System zur Anwendung, um die Feststoffe unterschiedlicher Größe effizienter zu entfernen (Espinal & Matulic, 2019). Die aufgenommenen Eiweiße im Futter wandeln die Fische im Körper um und scheiden Stickstoffverbindungen über Kiemen und Kot wieder aus. Der ausgeschiedene Stickstoff liegt je nach pH-Wert in der Form von Ammonium (NH_4^+) bzw. in dem für Fische hochtoxischen Ammoniak (NH_3) vor (Losordo et al., 1998; Masser et al., 1999; MacIntyre et al., 2008). Bei einem pH-Wert ≤ 7 liegt der Großteil des Ammonium-Stickstoffs (TAN) als Ammonium vor und bei steigendem pH wird das

Dissoziationsgleichgewicht zwischen den zwei Verbindungen (NH_4^+ & NH_3) in Richtung Ammoniak verschoben (Losordo et al., 1998). (3) Ammonium und Ammoniak wird in einen Biofilter durch nitrifizierende Bakterien, den Nitrosomonas, zu Nitrit (NO_2^-) und durch Nitrobacter und Nitrospinas zu weniger schädlichen Nitrat (NO_3^-) oxidiert (Gutierrez-Wing and Malone, 2006). (4) Zuletzt werden Gasaustauschvorrichtungen benötigt, welche das von den Fischen ausgestoßene, gelöste CO_2 entfernen und/oder Sauerstoff einbringen, der von Fischen und nitrifizierenden Bakterien benötigt wird (Moran, 2010; Wagner et al., 1995). Der gelöste Sauerstoff gilt allgemein bei den meisten Fischarten als der wichtigste Wasserqualitätsparameter in intensiven Systemen (Espinal & Matulić, 2019), da zu geringe Werte innerhalb weniger Minuten zum Massensterben führen können. Technische Komponenten wie beispielsweise Tricklingfilter, vereinen biologische Filtration und Kohlenstoffdioxid Ausgasung in einer Komponente.

Je nach Bedarf kann RAS um verschiedene Technologien ergänzt werden. Zu den gängigsten Zusatzfunktionen gehören die Behandlung mit Ozon oder UV-Strahlung zur Wasserdesinfektion (Teitge et al., 2020, Atrtramadal et al., 2012), Eiweißabschäumung zur Entfernung organischer Abfallstoffe und angelagerter Substanzen v.a. in Salzwasser RAS (Susanto et al., 2021) und unter anaeroben Konditionen betriebene Denitrifizierungssysteme zur Entfernung des akkumulierten Nitrats (Kiani et al., 2020).

1.3.2. Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlicher Aquakultur

Im Vergleich zu herkömmlicher mariner Aquakultur in offenen Netzkäfiganlagen und in Durchlaufanlagen können in geschlossenen¹ Kreislaufsystemen wie RAS die Kulturbedingungen vollständig kontrolliert und Ausscheidungen und Faeces herausgefiltert werden (FAO, 2015). Ein weiterer Vorteil ist, dass gezüchtete Individuen nicht in angrenze Ökosysteme fliehen und dort als nicht einheimische Art (invasive Neozoen) die Biodiversität gefährden und irreparable Schäden anrichten können. Die beidseitige Übertragung von Krankheiten und Parasiten der Spezies aus Aquakultur und freier Wildbahn (Palm & Bischoff, 2016) ist in RAS-Systemen bei Einhaltung von Hygieneregeln ebenfalls nicht möglich. Durch die kontrollierten Aufzuchtbedingungen und das Wasserreinigungsmanagement, kann in RAS-Systemen eine hohe Produktivität pro Flächeneinheit erzielt werden. Außerdem sind RAS-Anlagen standortunabhängig und können an jedem Ort gebaut werden, an dem Zugang zu Wasser und Energie besteht. Durch diese Form der landbasierten, ressourcenschonenden Aquakultur können RAS-Anlagen die aquatischen Organismen nah am Verbraucher bzw. den Absatzmärkten züchten, was die Lieferketten und -kosten minimiert und gleichzeitig den Kohlendioxid-Verbrauch verringert. Ein grundsätzlicher Vorteil von in RAS produzierten Fischen gegenüber der Produktion anderer tierischer Proteine, ist der deutlich reduzierte Wasserverbrauch. Während die Produktion von Rind beispielsweise 15 500 l/kg, Schwein 4 800 l/kg oder Huhn 3 900 l/kg verbraucht, benötigt die Produktion von Fisch mit durchschnittlich 400 l/kg nur einen Bruchteil (Joyce et al., 2019a).

Als Nachteile der RAS-Anlagen sind primär die hohen Investitions- und Betriebskosten zu nennen. Der Großteil der RAS-Anlagen steht in geschützten Hallen, zusätzlich führen teure Wasseraufbereitungssysteme, Tanks und Verrohrungen zu hohen Anschaffungskosten. Im Vergleich zu herkömmlicher Aquakultur hat RAS einen höheren Energieverbrauch und benötigt einen qualifizierten Anlagenmanager, der sich mit der Technik, der Fischzucht und dem physikochemischen Wassermanagement auskennt. Ein weiterer Nachteil ist, dass im Gegensatz zu offenen Aquakultursystemen unbemerkte Technikmängel wie Ausfälle von Pumpen oder der Sauerstoffzufuhr zu

¹ „Die Bezeichnung „offenes“ oder „geschlossenes“ Produktionssystem bezieht sich auf den Austausch von Wasser und Exkreten der Tiere zwischen der Umgebung und der Anlage. Offene Systeme stehen im direkten Austausch mit ihrer Umgebung [...]“ (Palm & Bischoff, 2016).

einem Massensterben führen können (EUMOFA, 2020). In einer Studie zu den Managementproblemen und -herausforderungen von RAS wurden zu den Risikofaktoren technische Schwierigkeiten, unpassendes Systemdesign, Wasserqualitätsprobleme und mechanische Probleme gezählt (Badiola et al., 2012). Außerdem konnte festgestellt werden, dass zwischen Erzeugern keine Kommunikation und kein Informationsaustausch existierte. Weitere Hauptprobleme seien die schlechte Auslegung der Systeme und ihr schlechtes Management, das vor allem darauf zurückzuführen war, dass keine qualifizierten Personen eingestellt waren, die die Verantwortung für die Wasserqualität und mechanische Probleme übernahmen. Der ebenfalls von Badiola et al., 2012 vor 10 Jahren festgestellte Forschungsmangel bezüglich RAS in kommerziellen Maßstab ist für die meisten Fischarten bis heute gültig. Für die Clarias-RAS sind bis auf Pasch & Palm, 2021 keine ökonomischen Forschungsdaten vorhanden. In einer neueren Studie aus dem Jahr 2020 zu den Herausforderungen und Möglichkeiten von RAS wurden als aktuelle Hauptprobleme der RAS-Industrie erneut das schlechte Management und mangelndes technologisches Wissen bestätigt und zudem die hohen Investitionen und das Auftreten von Krankheiten und Krankheitserregern genannt (Aich et al., 2020).

1.3.3. Besatzdichten in RAS

Eine der wichtigsten Fragen bezüglich des Systemdesigns ist die Auswahl der Besatzdichte. Die maximale Besatzdichte ist ein maßgeblicher Faktor, welcher über den Output und damit die Profitabilität der Anlage bestimmt. Geringe Besatzdichten haben den Vorteil, dass sich die Wasserwerte besser kontrollieren und steuern lassen. Außerdem wurde bei Fischarten wie beispielsweise beim Wolfsbarsch (*Dicentrarchus labrax*) (Gornati et al., 2004), Forelle (*Oncorhynchus mykiss*) (Ellis et al., 2005), Lachs (*Salmo salar*) (Calabrese et al., 2017) und Meerbrasse (*Sparus aurata*) (Montero et al., 1999) nachgewiesen, dass hohe Besatzdichten das Fischwohl und/oder Fischwachstum negativ beeinflussen. Bezüglich Tierschutz und -ethik sind hohe Besatzdichten bei Fischen bereits häufig diskutiert worden (Baldwin, 2011; Lymbery, 2002; Turnbull et al., 2008) und die sehr hohen Besatzdichten der Clarias-RAS stoßen bei Tierschutzorganisationen wie PETA auf großen Widerstand (PETA, 2014). Das Hauptziel der Animal-Welfare (Tierwohl) Forschung in RAS bestand daher darin, Systeme zu entwickeln, die die Produktivität maximierten, aber gleichzeitig Stress und Sterblichkeit minimierten (Espinal & Matulić, 2019). Eine signifikante Verbesserung von Produktivität und Fischwohl in RAS konnte beispielsweise durch einen Futtersuch mit der Tonmineralmischung Montmorillonit-Illit/Muskovit (1g577) beim Afrikanischen Raubwels erzielt werden (Palm et al., 2022, eingereicht). Durch die Zugabe von 0,5% 1g577 in das kommerzielle Clarias-Futter wurden die Wachstumsleistung der Fische erhöht, die Größenvarianz verringert und das Wohlergehen der Fische unter verschiedenen kommerziellen Aquakulturbedingungen gefördert.

Die höchste Produktivität je m³ Produktionsvolumen (m³PV) wird in RAS grundsätzlich durch hohe max. Besatzdichten erzielt. Die Wahl der richtigen Besatzdichte hängt maßgeblich von der Fischart und dessen Verhalten und Größe ab, sowie der Wasseraufbereitungskapazität der Anlage durch mechanischen- und Biofilter. Hohe Besatzdichten verlangen zudem vermehrte Kontrollen der physikochemischen Wasserwerte und erfordern ein höheres Knowhow des Anlagenmanagers. Bei einer neuen Anlage oder einem neuen Anlagenbetreiber wird empfohlen, die Anlage zu Beginn bei 50% der maximalen Besatzdichte zu fahren (Ebeling & Timmons, 2012). Da durch die Prozesswasseraufbereitung sehr hohe Besatzdichten der aquatischen Organismen möglich sind, wird RAS oft in Verbindung mit gemindertem Tierwohl gebracht. Dieser Kritikpunkt kann jedoch nicht allgemein für RAS angewendet werden, da für bestimmte Fischarten wie Seesaibling (*Salvelinus alpinus*) (Jørgensen et al., 1993) eine bessere Futteraufnahme und

schnelleres Wachstum belegt und dem Afrikanischem Raubwels eine hohe Widerstandsfähigkeit bestätigt wurden (Huisman und Richter, 1987; Hengsawat et al., 1997; Hossain et al., 1998).

1.3.4. RAS-Wirtschaft

Die Aquakulturproduktion in RAS hat sich trotz der Vielzahl der Probleme als sehr widerstandsfähig erwiesen und in den letzten Jahren neue Technologien und Möglichkeiten hervorgebracht, wodurch auch zukünftig ein Wachstum der Branche bezüglich Produktionsmenge und Artenvielfalt erwartet werden kann (EUMOFA, 2020). Obwohl in den Jahresberichten der Deutschen Binnenfischerei seit vielen Jahren von unprofitablen RAS-Anlagen berichtet wird (BMEL, 2010-2021), bleibt das Interesse an dieser ressourcenschonenden Methodik der Nahrungsmittelproduktion aufgrund der steigenden Nachfrage nach regional produziertem Fisch, sowie der limitierten Ressourcen und des negativen Impacts von herkömmlicher Aquakultur weiterhin groß. Besonders in Europa nahm die Anzahl der RAS-Anlagen in den letzten Jahren zu (Espinal & Matulic, 2019).

Die wirtschaftliche Tragfähigkeit von RAS hängt eng mit den hohen Investitions- und Betriebskosten zusammen. Mehrfach wurde bestätigt, dass größer skalierte Anlagen zu einer besseren Rentabilität führen als kleine Anlagen (De Ionno et al., 2006, Ngoc et al., 2016), Anlagen mit einem Output von weniger als 100 t/Jahr wurden als nur geringfügig profitabel eingestuft (De Ionno et al., 2006). Anlagen mit einem Output von mehreren Tsd. t können ihre Produktionskosten weiter senken, indem Verarbeitungsanlagen, Brutereien oder Futtermühlen in den Betrieb integriert werden (Ebeling & Timmons, 2010). In einer Modellstudie für atlantischen Lachs (*Salmo salar*) wurde berechnet, dass eine RAS-Anlage einen Output von 3 300 t/Jahr erzeugen muss, um die gleichen Produktionskosten wie eine Netzgehege-Aquakultur in derselben Größenordnung zu erzielen (Liu et al., 2016). Durch die deutlich höheren Investitionskosten der RAS-Anlagen haben sie jedoch trotz eines Preisaufschlags eine doppelte so lange Investitionszeit wie Netzgehege.

Zu einem Teilgebiet der rezirkulierenden Aquakultur Technologien gehört die Aquaponik, welche die RAS um ein hydroponisches System erweitert und diese entweder als ein zusätzliches Wasserfiltrationssystem ergänzt und/oder die Produktpalette des Unternehmens diversifiziert (Espinal & Matulic, 2019). In den meisten Fällen wird RAS jedoch als Teilsystem der Aquaponik bezeichnet. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von RAS und Aquaponik sind sehr ähnlich. Beide Technologien sind höchst kapitalintensiv, technisch anspruchsvoll, erfordern breites Fachwissen des Betreibers und benötigen Skaleneffekte, um profitabel zu wirtschaften (Espinal & Matulic, 2019).

1.4. Aquaponik

1.4.1. Einführung

Die Aquaponik ist technisch und begrifflich eine Kombination der zwei Lebensmittelproduktionstechniken Aquakultur und Hydroponik. Der Begrifflichkeit nach beinhaltet ein klassisches System also die integrierte Zucht aquatischer Organismen in Aquakultur (FAO, 1988) und Pflanzen in Hydroponik. Während die herkömmliche Hydrokultur Mineraldünger benötigt, um die Pflanzen mit den notwendigen Nährstoffen zu versorgen, nutzen die Aquaponik-Systeme das vorhandene Fischwasser, das reich an Pflanzennährstoffen ist, als Basis für das Pflanzenwachstum (Goddek, 2017). In einem hydroponischen System wachsen die Pflanzen in einer erdelosen Umgebung, in der die Wurzeln entweder von einem anorganischen Substrat wie beispielsweise Sand, Bimsstein oder Kies umgeben sind, oder können direkt der Nährlösung ausgesetzt sein. Der Hauptvorteil der Hydrokultur gegenüber Bodenkultur liegt darin, dass die Nährlösung genau kontrolliert und die Zusammensetzung bestimmt

werden kann. Außerdem sind gute Böden nicht überall verfügbar und die Zucht in Erde macht die Pflanzen anfälliger für Krankheiten (Goddek et al., 2015). Der vermarktungstechnische Nachteil der erdelosen Zucht besteht aktuell noch darin, dass die Pflanzen selbst bei ausschließlicher Verwendung biogener Düngemittel nicht als „Bio“ Produkte verkauft werden dürfen.

Das Grundprinzip der Aquaponik hat eine lange Tradition und basiert auf der integrierten Zucht und positiven Wechselwirkung von aquatischen Organismen und Pflanzen. Zu den bekanntesten historischen Systemen zählen die künstlichen Inseln („Chinampas“) der Azteken im alten Mexiko (1150-1350 v. Chr.), welche auf flachen Seen erschaffen wurden und als hochproduktive Anbausysteme die damals stark wachsende Bevölkerung versorgen konnten (Turcios & Papenbrock, 2014). Die ca. 2 000 Jahre alten Fisch-Reis Systeme wurden in Asien mit Karpfen in Reisfeldern betrieben (Renkui et al., 1996) und gelten heute als bedeutendes landwirtschaftliches Kulturerbe (Lu & Li, 2006). Die moderne Aquaponik wurde Mitte der 1970er Jahre von der RAS Forschungsgemeinschaft entwickelt (Naegel, 1977; Love et al., 2014), wobei das bekannteste Modell 1980 an der Universität der Virgin Islands (Jungferninseln, USA) entstand (Rakocy, 1988).

In der aquaponischen Wissenschaft wurde bis heute viel über eine allgemeingültige Nomenklatur gestritten. Während Aquaponik im Wesentlichen die Fisch- und Pflanzenproduktion kombiniert, ist die Anwendung des Begriffs "Aquaponik" sehr vielfältig, und zahlreiche Technologien beanspruchen die Verwendung des Namens (Lennard & Goddek, 2019). In der modernen Aquaponikforschung hat folgende Definition der Nomenklatur von Palm et al., 2018a die breiteste Verwendung gefunden: *"Aquaponik ist ein Produktionssystem für aquatische Organismen und Pflanzen, bei dem der Großteil (> 50%) der Nährstoffe für ein optimales Pflanzenwachstum aus Ausscheidungen und Abfällen stammt, die bei der Fütterung der aquatischen Organismen anfallen"*. Eine gängige Definition von Lennard (2015) wurde dadurch so erweitert, dass Aquaponik nicht mehr nur mit Fischen in Tanks, sondern mit allen aquatischen Organismen und Pflanzen betrieben werden kann. Des Weiteren wurde eine Messgröße für die Nährstoffströme beigefügt. Die Nomenklatur unterteilt Aquaponik zudem in die erdelose Aquaponik s.s. (sensu stricto = im engeren Sinne) und die Aquaponik s.l. (sensu lato = im weiteren Sinne), die Zucht mit Erde (Palm et al., 2018a).

Ein klassisches Aquaponiksystem besteht aus drei Einheiten: (1) der Aquakultureinheit, in welcher die Zuchtbecken der aquatischen Organismen stehen, (2) dem mechanischen und/oder biologischen Filtrationssystem mit Bakterien zwecks Wasseraufbereitung und (3) der Hydroponikeinheit zur Pflanzenproduktion (Abb. 1.3).

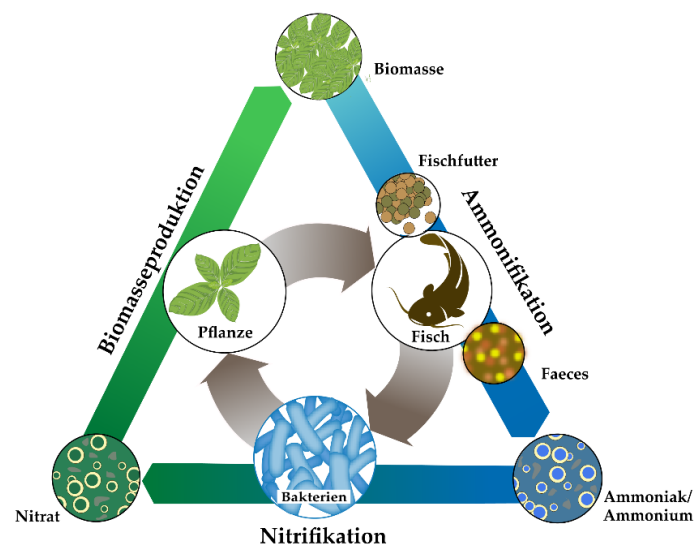


Abbildung 1.3. Symbiotischer Aquaponikkreislauf.

Die Aquaponik ist ein synergetisches Zusammenspiel, in dem die jeweiligen ökologischen Schwächen von RAS und Hydroponik in Stärken umgewandelt werden, da auf der Fischproduktionsseite die Abfallproduktion und in der Pflanzenproduktion der Nährstoffbedarf minimiert werden (Goddek, 2017). In einer herkömmlichen Aquaponik ist Fischfutter der einzige Inputfaktor, welcher durch die Aufnahme der Fische zu Wachstum und Bildung tierischer Proteine führt (Proteinbiosynthese). In der Fischzucht wird das Prozesswasser durch Fischausscheidungen (Faeces, Urin, Atmung) und das nicht aufgenommene Futter mit den wichtigsten Pflanzennährstoffen Stickstoff, Phosphor, Kalium (N, P, K) und weiteren Makro- und Mikropflanzennährstoffen angereichert. Das Prozesswasser aus der Fischzucht wird durch Filtersysteme gereinigt und die Stickstoffverbindungen mithilfe von Bakterien in das am besten pflanzenverfügbare Nitrat (NO_3) umgewandelt (Kapitel 1.3.1). Die in der Fischproduktion erzeugten Ausscheidungen bzw. Pflanzennährstoffe werden durch die Pflanzen aus dem Kreislaufwasser gefiltert und in Biomasse umgewandelt. Den Mikrobiota der einzelnen Systeme, sowie ihrem Zusammenspiel kommt eine zentrale Bedeutung zu, da ihre Zusammensetzung und Gesundheit direkte Auswirkungen auf die Qualität und Gesundheit der Fische und Pflanzen haben (Joyce et al., 2019b). Diesbezüglich besteht noch großer Forschungsbedarf.

Die Hydroponik und die Aquakultur können als ein einzelner Kreislauf betrieben werden (Abb. 1.3), in dem das Wasser zwischen den zwei Systemen rezirkuliert. Dann wird sie als geschlossene oder gekoppelte Aquaponik bezeichnet (Tran, 2015). Nach Palm et al., 2019 besteht die Hauptaufgabe der gekoppelten Aquaponik in der Reinigung des Prozesswassers der Aquakultur durch die Integration von Pflanzen, die der aquaponischen Unternehmung durch Verkauf weiteren Nutzen stiften. Zudem kann die symbiotische Gemeinschaft von Fischen, Pflanzen und Bakterien zu höheren Erträgen als die alleinige Fischproduktion und/oder Pflanzenzucht führen (Palm et al., 2019). Die Hauptvorteile der gekoppelten Aquaponik sind die effiziente Nutzung der Ressourcen Futter (u.a. Phosphor), Energie und Wasser sowie die Verbesserung des Wohlbefindens der Fische (Palm et al., 2019). Nachteilig ist, dass nicht gleichzeitig für Fische und Pflanzen optimale Produktionsparameter gewährleisten werden können, da diese u. a. unterschiedliche pH-Werte benötigen (Kloas et al., 2015; Goddek & Keesmann, 2018).

Alternativ sind Fisch- und Pflanzenzucht jeweils einzelne rezirkulierende Systeme, wobei die Wasserzuführung nur von der Aquakultur- zu der Hydroponikeinheit erfolgt, was als entkoppelte Aquaponik bezeichnet wird (Goddek, 2015). Der Vorteil der entkoppelten Variante ist, dass mehr Kontrolle der einzelnen Systeme möglich ist und beide Kreisläufe auf die Zuchtorganismen und Mikroorganismen angepasste physikochemische Wasserbedingungen erhalten können (Eck et al., 2019), wodurch ein Produktionsoptimum ermöglicht wird. Dies wiederum führt zu einem deutlich höheren Output und macht damit die entkoppelte Variante zur geeigneteren Technik zum kommerziellen Anbau. Nachteilig in entkoppelten Systemen ist, dass das Wasser vor der Übergabe in die Hydroponikkabinen von Schwebstoffen befreit werden muss, um ein Verstopfen der Hydroponiksysteme zu verhindern und dass durch diesen Filterprozess hohe Nährstoffverluste (v.a. Phosphor) entstehen (Goddek et al., 2019a). Die Abkopplung der zwei Kreisläufe ist ein jüngeres Forschungsgebiet mit vielen offenen Fragestellungen, wobei ein Fokus darin liegt, geeignete Fisch-Pflanzen Kombinationen zu finden.

Besonders geeignet für die Aquaponik sind Pflanzen mit hohem Wachstumspotenzial, hoher Marktnachfrage und hohem Preis, wie z. B. Küchenkräuter (Rakocy, 2012), die gleichzeitig nur einen geringen Platzbedarf haben. Basilikum (*Ocimum basilicum*) ist eine Pflanze, auf die all diese Eigenschaften zutreffen, weshalb bis zu 81% der Aquaponikproduzenten auf dieses Kraut zurückgreifen (Love et al., 2015a). Der wirtschaftliche Vorteil von schnell wachsenden und Platz sparenden Kräutern wie Basilikum im Gegensatz zu fruchtbildenden Pflanzen wie Tomaten oder Gurken wurde schon mehrfach bestätigt (Rakocy et al., 2006; Savidov et al., 2007). Auch in der aquaponischen Forschung wurde Basilikum bereits

mehrfach angewandt und in verschiedenen Aquaponik- und Hydroponikversuchen eingesetzt (Saha et al., 2016; Ferrarezi & Bailey, 2019, Knaus et al., 2020a). In der aquaponischen Produktion konnte Basilikum mit 1,8 kg/m² deutlich mehr Biomasse produzieren als Basilikum in Bodenkultur mit nur 0,6 kg/m² (Rakocy et al., 2004). In Kombination mit *C. gariepinus* und *Tilapia (Oreochromis niloticus)* zeigte Basilikum (*O. basilicum*) in einem extensiven gekoppelten Ebbe-Flut-Kiessubstrat-System gute Wachstumsleistungen (Palm et al., 2014a). In einem weiteren Experiment konnte die Kombination Afrikanischer Raubwelse und Basilikum zu herausragenden Wachstumsergebnissen von Fisch (FCR 0,74-0,91) und Pflanze führen, welche nach 41 Tagen in den drei getesteten Systemen zwischen 360-425 g Feuchtmasse, 36-38 g Trockenmasse und 494-518 Blätter ausbilden konnten (Knaus et al., 2020a). Die Kombination dieser zwei unkomplizierten, schnell wachsenden Zuchtorganismen hat sich demnach aus produktionstechnischer Sicht als vielversprechende Kombination herausstellen können.

1.4.2. Skalierung

Aquaponikbetriebe können in verschiedene Größenklassen unterteilt werden. Der folgende Abschnitt bezieht sich vollständig auf Palm et al. (2018a), welche die Aquaponik in Industrieländern in drei übergeordnete Größenklassen unterteilen: (1) heimische Aquaponik (domestic), (2) kleinskalige/semikommerzielle Aquaponik (small-scale/semi-commercial) und (3) mittel- bis großskalige, kommerzielle Aquaponik (intermediate/large-scale commercial for business and industry).

Heimische Aquaponik hat eine Fläche von ≤ 50 m² und kann weiter in die drei Untersysteme Mini- (< 2 m²), Hobby- (2-10 m²) und Backyard- (=Hinterhof, bzw. Garten) (10-50 m²) Aquaponik unterteilt werden. In den Foren und Internetseiten zum Thema Aquaponik wird ersichtlich, dass diese Größenklassen die meistverwendeten Formen der Aquaponik darstellen und der Selbstversorgung der Anwender dienen. Bei der Auswahl der Zuchtorganismen und des Systemdesigns sind den Anwendern keine Grenzen gesetzt (Palm et al., 2018a). Die aquaponische Forschung der Universität Rostock konzentrierte sich in den Anfangsjahren auf Ebbe- und Flut Kiessubstrat (Kapitel 1.4.3) Backyard-Systeme. Beispielsweise wurde erforscht, welchen Einfluss Systemaufbau und chemisch-physikalische Parameter (Palm et al., 2014b), verschiedene Fisch- und Pflanzenkombinationen (Palm et al., 2014a), die Hydroponikeinheit (Palm et al., 2015) und Herbstkräuter und Polyponik ² (Knaus et al., 2018) auf die ökonomische Nachhaltigkeit haben. Bei weiteren Studien in dieser Skalierung wurde der Niltilapia (*Oreochromis Niloticus*) mit dem Karpfen (*Cyprinus carpio*) oder dem Clarias kombiniert und das Pflanzenwachstum zu verschiedenen Jahreszeiten in Norddeutschland untersucht (Knaus & Palm, 2017a, b). Weitere Beschreibungen zur heimischen-, bzw. Backyard-Aquaponik findet sich in Kotzen & Appelbaum (2010), Morgenstern et al., (2017) und Lobillo-Eguíbar (2020).

Kleinskalige und semikommerzielle Aquaponik hat eine Fläche von 50- \leq 100 m² und zeichnet sich durch eine technische Erweiterung der Komponenten und Produktionsflächen im Vergleich zur heimischen Aquaponik aus. Zur Produktionssteigerung sind sowohl mechanischer-, als auch Biofilter obligatorisch. Um die Energiekosten bei kleinskaligen Systemen zu minimieren ist die Produktion in der nördlichen Hemisphäre aufgrund der geringen Größe und niedriger Investitionskosten hauptsächlich auf die Zeit zwischen Frühling und frühen Herbst beschränkt. Unter der Voraussetzung, dass günstige Energiequellen vorliegen, kann auch ganzjährig produziert werden. Aufgrund ihres technisch relativ einfachen Aufbaus, in dem meist einfache hydroponische Subsysteme wie DWC (deep water culture = Tiefwasserkultur), NFT (nutrient film technique = Nährstoff-Film-Technik) oder Substrat-Systeme

² Polyponik = Kombination von mehreren aquatischen Organismen in einem einzelnen aquaponischen System (Palm et al., 2019).

verwendet werden, können kleinskalige Systeme auch von Nicht-Profis errichtet werden und sind daher in der Forschung die meist verbreitetsten (Villarrol et al. 2011; Simeonidou et al. 2012; Kasozi et al., 2021; Benjamin et al., 2021). Semikommerzielle Anlagen heben sich von kleinskaligen Systemen durch die Anwendung von Gewächshäusern und einen allgemein höheren Technisierungsgrad ab, was bessere Fähigkeiten der Mitarbeiter erforderlich macht. Zusätzliche hydroponische Subsysteme wie Tröpfchen-Bewässerung, Ebbe- und Flut Tische oder auch Aeroponik können angewandt werden. Durch die höhere Produktivität wird bei semikommerzieller Produktion, je nach Größe, meist der regionale Einzelhandel, aber auch der Großhandel beliefert (Palm et al. 2018a).

Großskalige (bzw. mittelgroße) kommerzielle Aquaponik hat eine Fläche von $> 500 \text{ m}^2$ (bzw. $> 100 \leq 500$). Kommerzielle Aquaponikbetriebe streben eine maximale Produktionsleistung von Fischen und Pflanzen durch hohe Besatz- und Pflanzdichten an. Sie erfordern hohe Investitionskosten und Managementfähigkeiten und haben einen hohen Technisierungs- und Automatisierungsgrad, einschließlich der Überwachungssysteme für die Wasserparameter. Die klimatisierten Gewächshäuser ermöglichen eine ganzjährige Produktion und haben aufgrund des hohen Energieverbrauchs meist Zugang zu alternativen Energiequellen. Groß skalierte Aquaponik wird in der Regel entkoppelt betrieben und das Fischprozesswasser wird mit konventionellen hydroponischen Düngern mit Nährstoffen angereichert, wobei mindestens 50% der zum Wachstum benötigten Nährstoffe bereits im überführten Prozesswasser enthalten sein müssen (Palm et al. 2018a). Zu den bekanntesten großskaligen aquaponischen Forschungseinrichtungen zählt neben dem UVI-System (University of the Virgin Islands, Racoky, 2012) mit über 500 m^2 Produktionsfläche, das FischGlasHaus (FGH) der Universität Rostock mit einer Gesamtfläche von $1\,000 \text{ m}^2$ (Abb. 1.4).



Abbildung 1.4. a) FischGlasHaus (FGH) der Universität Rostock auf $1\,000 \text{ m}^2$ Gesamtfläche, b) Fischtanks der Aquakulturabteilung und c) Pflanzenwachstum durch Fischprozesswasser in hydroponischen Systemen (Fotos von: AUF Uni-Rostock (2022); a) Prof. Dr. Harry Palm, b) M.Sc. Felix Nitschke, c) k.A.).

Im FGH stehen auf 300 m^2 Fläche insgesamt drei Aquakultureinheiten zur Zucht unterschiedlicher Besatzdichten (extensiv, semi-intensiv, intensiv) mit insgesamt über 30 m^3 Produktionsvolumen. Die Pflanzenabteilung ist ein modernes, 600 m^2 großes Venlogewächshaus, welches in 6 separate Aufzucht-kabinen untergliedert ist. Zwischen Aquakultur und Gewächshaus stehen auf einer 100 m^2 Fläche die Übergabetanks, welche zur Zirkulation des Prozesswasser zwischen den Einheiten dienen. Das Ziel des FischGlasHauses besteht darin, die kommerzielle Fischzucht und die Aquaponik als ökologisch nachhaltiges Produktionsverfahren in Deutschland und besonders in Mecklenburg-Vorpommern zu fördern (Palm et al., 2016). Das FGH ist seit 2015 in Betrieb und seitdem sind diverse wissenschaftliche Beiträge zu unterschiedlichen Disziplinen der (semi-) kommerziellen Aquaponik erschienen.

Beispielsweise wurde in Fish Welfare- (Fischwohl) Versuchen festgestellt, dass bei Afrikanischen Raubwelsen in Aquaponik signifikant weniger Hautverletzungen auftraten und sich die integrierte Produktion daher vorteilhaft auf das Wohlergehen der Fische auswirkt (Baßmann et al., 2017). In einer weiteren Studie konnte festgestellt werden, dass auch die Pflanzbesatzdichte einen Einfluss auf das

Fischwohl hat. So wurden bei einer hohen Basilikum-Pflanzdichte signifikant reduziertes agonistisches (konkurrierendes) Verhalten und weniger Hautverletzungen im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Basilikumpflanzen festgestellt (Baßmann et al., 2020). Umgekehrt konnte in einem Pflanzenwachstumsversuch auf Ebbe- und Flut Tischen festgestellt werden, dass ebenfalls die Fischbesatzdichten Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben. Minzpflanzen, die mit Prozesswasser aus der intensiven Clarias-Aquakultur (140 Fische/m³; max. 200 kg/m³) versorgt wurden, bildeten fast doppelt so viel geschnittene, oberirdische Biomasse (31,8 ± 13.8 g/Pflanze) und deutlich größere Blattfläche (10.9 ± 2.5 cm²), wie Minze, die das Prozesswasser aus der extensiven (35 Fische/m³; max. 50 kg/m³) Zucht (17.4 ± 4.7 g/Pflanze; 5.6 ± 2.1 cm²) oder Nährlösung mit Flüssigdünger (11.2 ± 5.3 g/Pflanze; 5.7 ± 2.2 cm²) erhielten (Knaus et al., 2020b). In einem Nährstoffkonzentrations-Versuch wurde beobachtet, dass die Nährstoffdynamik disproportional durch unterschiedliche Besatzdichten (max. 50 kg/m³, max. 100 kg/m³, max. 200 kg/m³) beeinflusst wird (Palm et al., 2018b). Die Wartungsintervalle, das Futtermittelverhältnis und der daraus resultierende Sauerstoffgehalt veränderten die Konzentrationen der gelösten Nährstoffe, wobei die höchsten Konzentrationen bei intensiver Besatzdichte, mittlerem Futtereinsatz und Sauerstoff > 6 mg/l und die niedrigsten bei halbintensiver Besatzdichte, hohem Futtereinsatz und Sauerstoff > 6 mg/l gemessen wurden. Weiterhin wurde erforscht, wie sich Ortho-Phosphat- (PO₄³⁻-P) auf das Fischwohl auswirkt. Dabei wurde festgestellt, dass Konzentrationen zwischen 40-80 mg/l keine Auswirkungen auf das Fischwohl haben, dieses jedoch ab Werten von 120 mg/l beeinträchtigt wird, was wichtige Hinweise auf die Verwendung von Pflanzendüngern in geschlossenen Systemen lieferte (Strauch et al 2019). In einer weiteren Studie wurde festgestellt, dass das in der Fischproduktion erzeugte Prozesswasser bei Wiederverwendung in Hydrokulturen einen Mangel der Makronährstoffe Kalium, Nitrat und Phosphor und des Mikronährstoffes Eisen verglichen mit den allgemeinen Empfehlungen zur Pflanzennährstoffversorgung aufwies (Strauch et al., 2018). Die Kenntnis aller Nährstoffkonzentrationen und der Auswirkungen, die Besatzdichte, Wartung und Fütterung auf diese Werte haben, sind für ein aquaponisch effizientes, kommerzielles Anlagenmanagement von höchster Relevanz (Maucieri et al., 2019). Weitere Forschungsarbeiten im FGH beschäftigten sich mit der Wachstumsperformance diverser Pflanzen in unterschiedlichen hydroponischen Subsystemen der Aquaponik in (semi-) kommerzieller Skalierung.

1.4.3. Hydroponische Subsysteme

In der Aquaponik kommen diverse hydroponische Subsysteme zur Anwendung. Zum einen die Substratsysteme, in denen Materialien wie Kies, Sand, Perlit, Bims, Steinwolle, etc. verwendet werden. Substratsysteme werden häufig als Ebbe- und Flut Systeme betrieben, bei denen sich das Substrat in Rinnen oder Becken befindet und in bestimmten Intervallen mit Prozesswasser geflutet wird und wieder abläuft (Palm et al., 2018a, 2019). Des Weiteren können Ebbe- und Flut Tische zum Einsatz kommen, auf welchen die Pflanzen in Töpfen mit Erde wachsen (Aquaponik s.l.) und periodisch geflutet werden (Palm et al., 2018a). Die meistverwendeten Substratsysteme in der Aquaponik sind Kiessubstratsysteme, diese finden jedoch eher in heimischer und kleinskaliger Aquaponik Anwendung (Palm et al., 2018). In einem Ebbe- und-Flut Kiessystem konnten Palm et al. (2014b) auf einer Produktionsfläche von 25 m² in ca. 3 Monaten eine signifikante Anzahl Basilikum, Gurken und Tomaten züchten. Nachteilig ist bei Kies der Mehraufwand in Handhabung, Transport und Reinigung, da dieser unhandlich und schwer ist und dadurch auch die maximale Fläche der Pflanzenproduktion begrenzt ist (Racoky, 2006). Sand als Substrat hat exzellente Wachstumseigenschaften bei einigen Pflanzen gezeigt, ist aber ebenfalls schwer und unpraktikabel und führt zur Verstopfung der Systeme (McMurty et al., 1990, 1997; Racoky 2012).

Substratsysteme werden allgemein eher in heimischer Aquaponik angewendet und nehmen dort eine Doppelfunktion aus Pflanzenanbausystem und Biofilter ein (Rakocy et al. 2006; Tyson et al. 2008), da sich in den verwendeten Substraten Biofilme mit nitrifizierenden Bakterien bilden und die Mineralisierung und Wiederverwendung von organischen Verbindungen durch Kompostierung stattfinden kann (Somerville et al., 2014). Weitere Vorteile sind der verhältnismäßig geringe Energieverbrauch (Palm et al., 2018a) und die Nährstoffanreicherung von z.B. Phosphor im Substrat (Palm et al., 2015). Für kommerzielle Systeme sind Substratsysteme eher ungeeignet, da Aufbau und Reinigungs- und Instandhaltungsarbeiten mit erheblichem Mehraufwand im Vergleich zu aquatischen Systemen verbunden sind.

Zu den kommerziell meistverwendeten Hydroponiksystemen in der Aquaponik gehören a) DWC (deep water culture = „Tiefwasserkultur“) und b) NFT (nutrient film technique = Nährstoff-Film-Technik) (Love et al., 2015a) (Abb. 1.5).

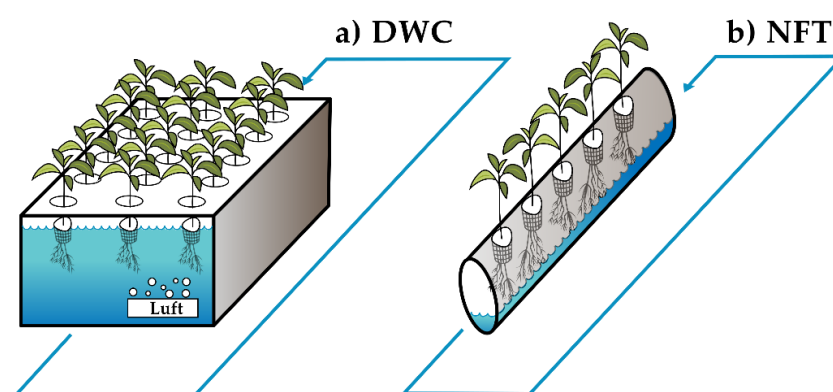


Abbildung 1.5. Die zwei meistverwendeten kommerziellen hydroponischen Subsysteme in der Aquaponik: a) DWC (Floß-)System und b) NFT-System.

Das DWC System (a) zählt als die meistverwendete und eine der am längsten verwendeten Aquaponiktechniken (Love et al., 2015a; Zweig, 1986), in der verhältnismäßig viel Wasser im Kreislauf benötigt wird, was sie im Vergleich zu anderen Systemen relativ schwer macht. Die gängigste Technik ist, die Pflanzen in Gitternetztopfen auf Styroporplatten, dem Raft-System (= Floß-System) in ca. 30 cm tiefen, mit Nährlösung gefüllten Rinnen/Tanks/Becken schwimmen zu lassen (Goddek, 2017). Die Nährlösung zirkuliert hier ebenfalls, muss jedoch zusätzlich mit Sauerstoffeinströmern aktiv mit Luft bereichert werden (Silva et al., 2015).

Das NFT-System (b) ist eine lang etablierte, einfache und kostengünstige Hydrokulturtechnik, die sich für kommerzielle und nicht-gewerbliche Anwendung eignet, mit vergleichsweise wenig Wasserbedarf im Kreislauf (Cooper 1979; Lennard & Leonard 2006; Somerville et al., 2014). Dort wachsen die Pflanzen in leicht geneigten Rinnen oder Röhren und die Wurzeln werden von einem konstanten, flach fließendem Wasserstrom mit der Nährstofflösung versorgt (Somerville et al., 2014). Der Nachteil hierbei ist, dass die Pflanzen von der Funktion der Pumpe abhängig sind und bei Ausfall durch Wasserunterversorgung Schaden erleiden oder absterben können. Die Belüftung ist in diesem System passiv und erfolgt durch die Zirkulation des Wassers (Silva et al., 2015).

Vergleichende Untersuchungen zum Pflanzenwachstum in verschiedenen hydroponischen Subsystemen sind eines der wichtigsten Vorhaben in der Aquaponik (Maucieri et al., 2018), da nicht alle Pflanzen in allen hydroponischen Subsystemen mit dem gleichen Ertrag kultiviert werden können (Palm et al., 2019). In einem aquaponischen Versuch mit Murray Cod (*Maccullochella peelii peelii*) und Gartensalat (*Lactuca sativa*) hat das NFT System signifikant weniger Biomasse erzeugt als Raft- und Kiessubstrat-

Systeme (Lennard & Leonard, 2006). In einem Versuch mit Tomaten (*Solanum lycopersicum*) und Tilapia (*Oreochromis niloticus*) war der durchschnittliche kumulative Ertrag an vermarktbareren Früchten bei einem Tropfbewässerungssystem am besten (18,3 kg) im Vergleich zu NFT (17,2 kg) und Raft (16,9 kg) (Schmautz et al., 2016). Von der Verwendung des Raft-Systems zur Tomatenzucht raten die Autoren aufgrund milderer Fruchtqualität und möglicher anoxischer Bedingungen in den Becken ab. In einem Vergleich des Raft-Systems mit einem Substratsystem in einer integrierten Zucht von süßem Basilikum (*Ocimum basilicum nufar*) und Getüpfeltem Gabelwels (*Ictalurus punctatus*) hatte das Raft-System beim Ertrag, der feuchten Blattmasse und der vegetativen (nicht wurzelnden) Biomasse die besten Werte (Dunwoody, 2013). Wurde das Basilikumwachstum (*Ocimum basilicum*) in integrierter Zucht mit Afrikanischem Raubwels (*Clarias gariepinus*) in unterschiedlichen hydroponischen Systemen verglichen, hatte Gravel nach 41 Tagen die höchsten Pflanzen (101,8 ± 8,3 cm), verglichen mit Growpipes (NFT; 96,7 ± 7,0 cm) und Raft (DWC; 94,8 ± 8,6 cm) (Knaus et al., 2020a). Dagegen konnten im Folgeversuch mit grüner Minze (*Mentha spicata*), die Pflanzen in den Growpipes deutlich mehr Blätter (770,0 ± 224,4) ausbilden als in Gravel (499,8 ± 228,4) und die durchschnittliche frische Biomasse war in Raft (1275,6 ± 33,4 g) signifikant höher als in Growpipes (1042,0 ± 35,8 g) und im Kiessubstrat (686,3 ± 98,2 g) (Knaus et al., 2021). Es wurde ersichtlich, dass die Performance des hydroponischen Subsystems maßgeblich von der Auswahl der Kulturorganismen abhängt und umgekehrt der Pflanzenertrag entscheidend durch die Auswahl des hydroponischen Subsystems beeinflusst wird.

Es gibt noch weitere hydroponische Subsysteme, die in aquaponischen Forschung wenig oder nicht untersucht wurden. Dazu zählen beispielsweise Algaeponik, Aeroponik, Aeroaquaponik, Mariponik, Haloponik, Biofloc Technologie, Vertikale Aquaponik (Kotzen et al., 2019) und die DRF-Technik (Dynamic Root Floating = „dynamisch treibende Wurzeln“) (Kao & Hsiang, 1991; Silva et al., 2015). Obwohl einige dieser Subsysteme seit einigen Jahren erprobt wurden, bestehen in den meisten Fällen noch große Wissenslücken bezüglich der möglichen Produktionsvorteile und des Systemdesigns in aquaponischer Kopplung (Kotzen et al., 2019).

Die DRF-Technik ist ein in der Aquaponik kaum bekanntes Subsystem und aus der Hydrokultur für den Anbau von Blattgemüse und süßem Basilikum unter tropischen asiatischen Klimabedingungen bekannt (Kao & Hsiang, 1991; Remy et al., 2005; Wattanapreechanon & Sukprasert, 2012). Die Technik hat ihren Ursprung in Taiwan, wo sie 1986 als eine Lösung für die Produktionsprobleme in den besonders heißen Monaten zur ganzjährigen Produktion von Blattgemüse entwickelt wurde (Kao & Hsiang, 1991). Der untere Abschnitt der Wurzel schwimmt in DRF im Wasser, während der Wurzelansatz dauerhaften Kontakt zur Luft hat, indem er wenige Zentimeter über der Wasseroberfläche angebracht wird (Kao & Hsiang, 1991) (Abb. 1.6). Dadurch entwickeln sich sogenannte „Luftwurzeln“ oder „Haarwurzeln“, welche den Vorteil haben, bei hohen Wassertemperaturen (> 30 °C) eine bessere Wurzelaktivität aufzuweisen als Wurzeln in herkömmlichen Systemen, die völlig vom Wasser bedeckt sind. Dadurch wird die Sauerstoffversorgung der Pflanzen verbessert.

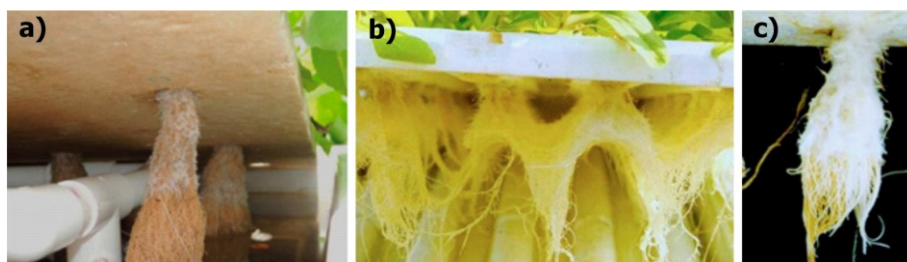


Abbildung 1.6. Luftwurzeln eines DRF-Systems bei Pak-Choi Pflanzen aus a) Silva et al. (2015) und b-c) Kao & Hsiang (1991).

In einem hydroponischen Vergleich zwischen DRF, DFT („Deep Flow Technique“ = DWC) und NFT mit Pak-Choi (*Brassica rapa chinensis*) haben alle drei Systeme bei Wassertemperaturen zwischen 25-30 °C ähnlich gute Biomassen produziert (Kao & Hsiang, 1991). Stieg die Wassertemperatur auf 30-35 °C, nahm die Wurzelaktivität in DFT und NFT ab und führte zu reduzierter Biomasseproduktion, während diese Verschlechterung nur minimal bei DRF war. Bei steigenden Temperaturen (35-38 °C) war auch dieser Effekt stärker ausgeprägt (Kao & Hsiang, 1991). Neben der Aufrechterhaltung der Wurzelaktivität wird als weiterer Vorteil der reduzierte Energieverbrauch im DRF-System beschrieben, da die Wurzeln passiv belüftet werden und keine aktive Sauerstoffzufuhr mit beispielsweise Einströmern wie im DWC-System benötigen (Silva et al., 2018). Im Vergleich zu einem Raft-System hat die Studie eine Einsparung der Energiekosten von 11,4% in DRF feststellen können.

Die Aeroponik wurde ursprünglich in den 1920er Jahren als Anbausystem zur Untersuchung des Wurzelwachstums entwickelt (Buckseth et al., 2016). Das Prinzip der modernen Aeroponik besteht darin, die Pflanzen in einer geschützten Umgebung zu züchten, wobei die Wurzeln dauerhaft oder periodisch durch Düsen mit einer nährstoffreichen Lösung besprüht werden (Barak et al., 1996; Mbiyu et al., 2012; Buckseth et al., 2016). Die NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) hatte die Aeroponik aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften als mögliches Lebensmittelversorgungssystem für interplanetare Raumfahrt identifiziert und weiterentwickelt (NASA, 2006). Die NASA beschreibt die Aeroponik als ein Verfahren, bei dem Pflanzen in der Luft ohne Erde oder Nährböden wachsen, was eine saubere, effiziente und schnelle Nahrungsmittelproduktion ermöglicht. Als weitere Vorteile nennt die NASA, dass Pflanzen das ganze Jahr lang ohne Unterbrechung und ohne Kontamination durch Erde, Pestizide und Rückstände gepflanzt und geerntet werden können und der Wasserverbrauch könne um 98%, der Düngerverbrauch um 60% und der den Einsatz von Pestiziden um 100% reduziert werden. Zuletzt nehmen Pflanzen, die in aeroponischen Systemen angebaut werden, nachweislich mehr Mineralien und Vitamine auf, was die Pflanzen gesünder und potenziell nahrhafter macht (NASA, 2006). Dem NASA Bericht zufolge stellt die Aeroponik produktionstechnisch viele Vorteile gegenüber anderen Systemen dar. Das Systemdesign der Aeroponik kann je Kultivierungsintention stark variieren und die Wachstumsleistung der Pflanzen wird erheblich durch die richtige Kombination aus Druck, Düsen und damit Tröpfchengröße, Vernebelungsintervallen und Wurzelzonenvolumen beeinflusst (Salachas et al., 2015, Li et al., 2018).

Als besonders vorteilhaft hat sich die Aeroponik zur Zucht von Sämlingen und zur Stecklingsvermehrung erwiesen und von Pflanzen, in denen die Wurzel der essbare Pflanzenteil ist. Für die Sämlinge ergeben sich die Vorteile, dass sie sich (1) während der Wurzelbildung nicht dehnen oder verwelken, (2) leicht und ohne Transplantationsschock verpflanzen lassen und (3) das Wachstum beschleunigt wird, was zu kürzeren Erntezyklen und damit zu einer höheren Jahresproduktion führt (Kotzen et al., 2019). Aufgrund der schnellen Wurzelinduktion gilt Aeroponik als geeignete Technik zur Stecklingsvermehrung von Pflanzen wie u.a. Tomaten (*Solanum lycopersicum*), Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) und Paprika (*Capsicum spp.*) sowie diversen Heilpflanzen (Ekren et al., 2012; Texeira & Ten Tuschner, 2019; Valle-Echevaria et al., 2019). Wegen der unkomplizierten und sauberen Zucht und Ernte und der besseren Größenkontrolle hat sich die Aeroponik nicht zuletzt für die Zucht von Wurzelgemüse wie Kartoffeln, Süßkartoffeln und Ingwer als besonders geeignet herausgestellt (Farran & Mingo-Castel, 2006; Mbiyu et al., 2012; Li et al., 2018).

Über die aeroponische Zucht von Pflanzen, von denen der oberirdische Teil der Pflanze als Nahrungsmittel dient, liegen nur wenige Erkenntnisse vor. In einem Versuch mit Baldrian (*Valeriana officinalis*) ergab das aeroponische System ein geringeres Frischgewicht von Blättern und Wurzeln sowie eine geringere Blattfläche als „floating media“-System (deutsch: Floß-System) und eine geringere

Konzentration an ätherischen Ölen (Tabatabaei, 2008). Im Gegensatz dazu konnte in einem Versuch mit Tomaten die Aeroponik 25% höhere Erträge (40 kg/m²) als ein Steinwollsystem (32 kg/m²) und 11% mehr Erträge als herkömmliche Erd-Kultivierung (36 kg/m²) erzielen (Phan Hui, 1994). Für aeroponisch gezüchteten Salat wurde festgestellt, dass Wurzelatmungsraten und Photosyntheseraten der Pflanze signifikant zugenommen haben, jedoch kein Unterschied von Wachstum und Erntequalität festgestellt werden konnte (Hikosaka et al., 2014). Doch auch in diesem Versuch wurde der reduzierte Wasserverbrauch und die einfachere Handhabung im Vergleich zu konventioneller Hydrokultur bestätigt. In einem Review Paper (Übersichtsartikel) über moderne Pflanzenanbautechnologien in der Landwirtschaft unter kontrollierten Bedingungen wurde Aeroponics als die beste Pflanzenanbaumethode für Ernährungssicherheit und nachhaltige Entwicklung herausgestellt (Lakhiar et al., 2018). Eine weitere Studie konnte in aeroponisch angebauten Basilikumpflanzen eine höhere Nährstoffqualität nachweisen (Salachas et al., 2015). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Pflanzenwachstumsparameter nicht nur von der gewählten Pflanzen- oder Fischart, sondern auch von der Wahl des hydroponischen Subsystems beeinflusst werden. Daher besteht die Notwendigkeit, das effizienteste hydroponische Subsystem für jede kultivierte Pflanzenart zu identifizieren, um den Ertrag der aquaponischen Produktion zu maximieren.

1.4.4. Aquaponik Wirtschaft

Die Relevanz der Aquaponik als nachhaltige Lebensmittelproduktionstechnologie und damit einhergehend der Output an naturwissenschaftlichen Veröffentlichungen ist in den letzten Jahren weiter angestiegen (Baganz et al., 2020) und in fast allen europäischen Ländern wurden Aquaponik Start-Ups gegründet (Turnšek et al., 2020). Das ökonomische Wissen über praktizierende großskalierte Aquaponik ist jedoch nach wie vor gering. Viele Versuche zu größeren Produktionssystemen werden von privaten Forschungszentren oder Unternehmen durchgeführt und sind als vertrauliche Ergebnisse für Dritte unzugänglich. Nach wie vor besteht ein Mangel an Forschung, die konkrete ökonomische Fragestellungen beantwortet und den Unternehmen praxisorientierte wirtschaftliche Lösungen anbietet. Die neuesten Erhebungen zeigen, dass die Aquaponik-Produktion in Europa immer noch gering ist und nur sehr wenige Unternehmen wirtschaftlich überlebensfähig sind (Turnšek et al., 2020). Außerdem wurden in der Anfangsphase der Aquaponik-Wirtschaft eine Reihe unrealistischer Aussagen über die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der Aquaponik verbreitet (Turnšek et al., 2019). Viele Arbeiten zu groß- und kleinskaliger Aquaponik deuten darauf hin, dass die Fischzucht aufgrund hoher Produktionskosten häufig der unrentable Unternehmensteil ist und dass eine Rentabilität der Aquaponik primär durch die Pflanzenproduktion realisiert wird (Bailey et al. 1997; Holliman et al., 2008; Baker, 2010; English, 2015; Tokunaga et al. 2015; Benjamin et al., 2020).

Die erste Peer-Review (Kreuzgutachten) Erhebung kommerzieller Aquaponikbetriebe stammt aus dem Jahr 2015 und zeigte auf, dass von 257 befragten Aquaponik-Farmen, von denen 188 als "kommerziell" eingestuft wurden, weniger als ein Drittel im vergangenen Jahr vor der Erhebung profitabel war (Love et al., 2015a). Fraglich ist jedoch die begriffliche Einteilung in „kommerziell“, da die durchschnittliche Größe der Anlagen in dieser Studie nur 100 m² Anbaufläche und ein Wasservolumen von 10,3 m³ betrug, wonach der Großteil der Befragten nach Palm et al. (2018a) eher als kleinskalig/halbkommerziell (≤ 100 m²) eingestuft worden wäre. In der Erhebung wurde festgestellt, dass Bruttoumsatz und Rentabilität derjenigen Anlagen höher waren, die ihre Einnahmequellen mit dem Verkauf von Non-Food-Produkten, Dienstleistungen oder Schulungen diversifizierten. Eine zweijährige Studie in einem kleinskaligen Aquaponiksystem mit Tilapia und diversen Kulturpflanzen ergab, dass die Pflanzenzucht Gewinne erwirtschaften konnte, während die Tilapia-Zucht unprofitabel war (Love et al., 2015b). Eine Studie zur Aquaponik in den USA zeigte, dass 75% der Anlagen kleine Unternehmen mit weniger als 25 Tsd. EUR

Umsatz/Jahr waren (Engle, 2015). Konsens herrscht darüber, dass größere Anlagen durch Skaleneffekte grundsätzlich profitabler sind (Kloas et al., 2015; König et al., 2016; Turnšek et al., 2019; Baganz et al., 2020). Nach König et al., 2016 wird Aquaponik erst ab einer Pflanzenanbaufläche von mindestens 1 000 m² profitabel. In einer Modellstudie hatte eine Aquaponikanlage mit 3 m³ Produktionsvolumen (PV) und 142 m² Gewächshausfläche, Investitionskosten von 1 067 EUR/m² Zuchtfläche, welche bei mittelgroßer Aquaponik (10 m³PV, 469 m²) auf 650 EUR/m², und bei einem knapp hundertfach größeren, kommerziellen System (300 m³PV, 12 250 m²) auf 302 EUR/m² reduziert werden konnten (Morgenstern et al., 2017). Bei dem kleinen und mittleren System ständen Verluste von 19 Tsd. EUR/Jahr und 24 Tsd. EUR/Jahr zu Buche, während die kommerzielle Anlage Gewinne von 209 Tsd. EUR/Jahr erzielen könnte. Für US-amerikanische Aquaponiksysteme liegen die Investitionskosten je m³PV (Produktionsvolumen) und m² Zuchtfläche zwischen 190 USD/m² (76 m³PV, 1 142 m², Tokunaga et al., 2015), 226 USD/m² (4 Tanks, 100 m², Bailey et al., 1997) und 240 USD/m² (19 m³PV, 120 m², Adler et al., 1997). Grundsätzlich sind die Investmentkosten von Aquaponiksystemen von zu vielen Faktoren abhängig, um sie pauschalisieren zu können, jedoch schätzten Turnšek et al. (2019) die Kosten in Europa auf mindestens 250 EUR/m² Zuchtfläche.

In MV existierte eine kommerzielle Aquaponikanlage der Müritzfischer in Waren, für die eine wirtschaftliche Analyse aus realen Produktionsdaten zwischen 2017-2018 erstellt wurde. Die Investitionskosten dieser Halle lagen bei 449 Tsd. EUR. für 26,4 m³PV für Fische und 320 m² Netto-Gewächshausfläche (Baganz et al., 2020). Als Berechnungsgrundlage wurden Preise von 3,50 EUR/kg Tomate und 2,50 EUR/kg Clarias verwendet. Im Berichtsjahr hat die Anlage in der Fisch- und Pflanzenzucht Verluste von jeweils 4 Tsd. EUR und 15 Tsd. EUR gemacht, konnte diese jedoch mit dem Verkauf von Strom des integrierten Blockheizkraftwerks (BHKW) um 12 Tsd. EUR schmälern. Bei theoretischer maximaler Auslastung berechnen die Autoren für die gleiche Anlage in der Fischzucht Gewinne von 7 Tsd. EUR und in der Pflanzenzucht immer noch Verluste von 3 Tsd. EUR. Zusammen mit den Einnahmen des BHKW hätte sich die Anlage erst nach 27 Jahren amortisiert. In einem weiteren Szenario wurde bei größerer Nettoanbaufläche (1 100 m²) und gleichbleibender Fischzucht eine Amortisationszeit von 12 Jahren berechnet (Baganz et al., 2020). Der Betrieb dieser Anlage wurde Anfang 2022 aufgrund ihrer Unwirtschaftlichkeit eingestellt. Die einzig kommerziellen Anlagen in Deutschland sind die ECF-Farm in Berlin, welche v.a. durch die Produktion großer Mengen Basilikum (>1 Tsd. Töpfe/Tag) bekannt ist (ECF Farm, 2022) und die Stadtfarm in Berlin, welche durch einen hohen Diversifikationsgrad auffällt (Stadtfarm, 2022). Als größte Aquaponikanlage in Europa zählt NerBreen aus Spanien mit 6 000 m² Zuchtfläche (2 Mio. EUR), wovon jeweils 3 000 m² zur Zucht von Tilapia und diversen Pflanzen verwendet werden (Turnšek et al. 2019). Für diese Anlage haben Goddek & Keesman (2018) einen Zusatzbedarf externer Nährstoffe von 40-60% angegeben, wodurch die Nährstofffrachten aus der Aquakultur im Grenzbereich von 50% der aquaponischen Definition nach Palm et al. (2018a) liegen.

Neben den hohen Anforderungen an das Fachwissen der Anlagenbetreiber zu Aquakultur und Pflanzenbau (Bosma et al. 2017) gelten die hohen Investitions- und Betriebskosten (v.a. Fischfutter, Arbeit und Energie) als Haupthindernisse kommerzieller Aquaponik (König et al., 2016). Die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Anlagen bleibt demnach weiterhin die Crux. In Deutschland liegen bisher keine Informationen zu kommerzieller Aquaponik vor, die die Profitabilität einer nicht modellierten aquaponischen Fischzucht belegen. Die Aufgabe der Forschung und daher das Ziel dieser Arbeit ist, (1) hochproduktive Pflanzenanbausysteme zu entwerfen, welche als Hauptmotor für die ökonomische Nachhaltigkeit stehen und (2) die Fischzucht profitabler zu gestalten, indem konkrete ökonomische Fragestellungen zu RAS beantwortet und Lösungsansätze aufgezeigt werden. Ein wirtschaftlich nachhaltiger Erfolg in der Fischzucht stellt die Grundlage dar, um diese ökologisch nachhaltigen Systeme in Zukunft kommerziell anwendbar und überlebensfähig zu machen.

1.5. RAS und Aquaponik in Mecklenburg-Vorpommern

1.5.1. Kurzportrait Mecklenburg-Vorpommern

Mecklenburg-Vorpommern (MV) konnte sich nach der Umbruchphase in den 90er Jahren durch vielfältige Investitionen und Subventionen bezüglich vieler wichtiger Wirtschaftsparameter dem Bundesdurchschnitt annähern, zählt aber immer noch zu den strukturschwachen Regionen der Bundesrepublik (Politik MV, 2018). Die Bevölkerungszahl hat von 1990 (1,9 Mio.) bis 2020 (1,6 Mio. Menschen) stetig abgenommen und MV ist damit das am dünnsten besiedelte Bundesland (Statista, 2021c, 2022c). Das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf 2020 lag in MV bei 28,7 Tsd. EUR/Kopf (BIP in MV: 46 Mrd. EUR), was deutlich unter dem Bundesdurchschnitt von 40,1 Tsd. EUR/Kopf lag, aber sich dennoch im Verhältnis zu 1991 (7,5 Tsd. EUR/Kopf) knapp vervierfacht hat (Statista, 2022c). Die registrierte Arbeitslosigkeit 2022 (7,6%) lag weiterhin über dem Bundesdurchschnitt (5,1%), hat aber seit 2006 (20,8%) stark abgenommen (Regierung MV, 2022a; Arbeitsagentur, 2022). MV stellt mit einer der ältesten Universitäten der Welt und 5 Hochschulen einen Bildungsstandort dar und hat durch insgesamt 13 Hafenstandorte mit einem Umschlag von 35 Mio. t (brutto) und zwei internationale Flughäfen einen exzellenten Zugang zum globalen Handel und Tourismus (Regierung MV, 2022b).

In MV existiert eine moderne und leistungsstarke Landwirtschaft. Vom Land wird mehr als die Hälfte der Fläche (1,34 Mio. ha) von 4,7 Tsd. Betrieben mit über 25 Tsd. Beschäftigten bewirtschaftet. Insgesamt werden 100 000 ha zum Anbau nachwachsender Rohstoffe verwendet und der Bau und Betrieb von Biogasanlagen stellt dabei einen wichtigen Wirtschaftszweig dar (Regierung MV, 2022c). Trotz dieser landwirtschaftlichen Strukturen in MV wird deutlich mehr Einkommen in der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte verdient und Windkraft, Biomasse und Sonnenenergie sollen die Hauptmotoren für wirtschaftliches Wachstum in MV werden (Politik MV, 2018). Zu einem der wichtigsten Industriezweige in MV zählt, neben Tourismus und Gesundheitswirtschaft, die Ernährungsindustrie mit einem Jahresumsatz von 4,5 Mrd. EUR und 14 Tsd. Mitarbeitern in den 88 Betrieben mit mehr als 50 Mitarbeitern (Regierung MV, 2022d). Innerhalb dieses Industriezweiges zählen u.a. Fisch-, Fleisch-, Milchverarbeitung zu den bedeutendsten Bereichen. Auf der Internetpräsenz der Landesregierung wird die landwirtschaftliche Prägung des Landes beworben: *„Verarbeitung und Veredelung von Agrarerzeugnissen aus der Region sind ein Qualitätsmerkmal der Ernährungsindustrie in unserem Land“* (Regierung MV, 2022d). Das wichtigste Branchennetzwerk ist die Marketinggesellschaft der Agrar- und Ernährungswirtschaft Mecklenburg-Vorpommern e.V., welche das Ziel hat, die Wettbewerbsfähigkeit der Agrar- und Ernährungsbranche durch bessere Vermarktung zu stärken (Ernährung MV, 2022). Die Veredelungsintensität und damit die Wertschöpfung sollen erhöht werden und die Vernetzung innerhalb der Unternehmen soll, unter Einbezug wissenschaftlicher Einrichtungen, gestärkt werden (Ernährung MV, 2022).

In der Tierproduktion sind Rinder- und Schweinezucht die wirtschaftlichen Treiber und die Fischwirtschaft stellt dagegen einen kleinen, aber traditionellen Wirtschaftszweig dar, in den zwischen 1991 bis 2014 mehr als 392 Mio. EUR investiert wurden (davon ca. 235 Mio. EUR Fördergelder) (Regierung MV, 2022e). Mit 177 Mio. EUR (ca. 49 Mio. EUR Fördergelder) floss der Großteil der Investitionen in die Fischverarbeitungsindustrie und 29 Vorhaben der Aquakultur wurden gefördert (Regierung MV, 2022e).

1.5.2. Entwicklung der RAS in Mecklenburg-Vorpommern

Die Daten dieses Abschnittes entstammen aus den beiden großen Statistiken zur deutschen Aquakultur. Zum einen den Jahresberichten zur deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2007-2019 des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL, 2009-2021), welche sich auf die Angaben der Fischereibehörden der Bundesländer und die Aquakulturstatistik zur Erzeugung in Aquakulturbetrieben des deutschen statistischen Bundesamtes 2012-2019 beziehen (Destatis, 2013-2020). Zum anderen direkt aus der Aquakulturstatistik zur Erzeugung in Aquakulturbetrieben von 2012-2020 (Destatis, 2013-2021). Da die Fischereibehörden und das statistische Bundesamt bezüglich der Datenaufnahme unterschiedliche Ansätze haben, haben sie auch bezüglich einiger Angaben unterschiedliche Zahlen. Der Großteil der Zahlen entstammt den Jahresberichten und damit den Angaben der Fischereibehörden. Ab 2012 wurden die Daten bezüglich der Anzahl der deutschen Kreislaufanlagen sowie der Produktionsmengen den Aquakulturstatistikerhebungen des statistischen Bundesamtes entnommen. Dort wird der Begriff „Kreislaufanlage“ enger eingrenzt, wodurch Warmwasser-Durchlaufanlagen und in Teichen befindliche Kreislaufanlagen nicht mehr einbezogen werden, dafür aber Forschungseinrichtungen mitgezählt werden. Da die Daten der beiden Quellen teilweise starke Unterschiede bezüglich gleicher Angaben (bspw. Produktionsmengen einzelner Fischarten) aufweisen, sollten die unten aufgeführten Zahlen nicht als gesicherte Größen interpretiert werden, sondern eine Übersicht über für die historische Entwicklung der deutschen- und mecklenburgischen RAS- und Clarias-Wirtschaft geben. Alle Grafiken wurden ebenfalls aus den jeweiligen Daten der Jahresberichte 2008-2019 und den Aquakulturstatistikerhebungen 2012-2020 erstellt.

Zitat aus den Jahresberichten des BMEL (2009-2021): *„Die angegebenen Werte resultieren aus Schätzungen und kaum validierbaren persönlichen Informationen und sind daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Hinzu kommen Geheimhaltungspflichten in der amtlichen Statistik. Bei den summarischen Angaben für Deutschland in den Tabellen der Kapitel zur Erwerbsfischerei sowie Aquakultur ist zu beachten, dass der ausgewiesene Wert nicht immer der Summe der Einzelangaben der Werte für die einzelnen Bundesländer entspricht. Ursache dafür sind statistische Geheimhaltungsfälle, die zu Leerstellen für einzelne Bundesländer führen, jedoch in den summarischen Gesamtwert für Deutschland einfließen.“*.

Im Jahr 2007 wurden in MV noch keine Produktionszahlen für Afrikanische Raubwelse gemeldet, jedoch lief die Produktion der Tessiner Edelfisch GmbH aus Selpin mit 300 m³PV (4 Kreisläufe x 75 m³PV) als erste Clarias-RAS in MV an. Trotz viel diskutierter Wirtschaftlichkeit von Kreislaufanlagen stand die Clarias-Wirtschaft vielerorts in der Planungsphase. Erhöhte Einspeisevergütungen für Strom aus Biogasanlagen, wenn die Abwärme u.a. zur Fischproduktion genutzt wird, bedingt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Kombination mit einer Förderung nachhaltiger Aquakulturinvestitionen von bis zu 50% durch den Europäischen Fischereifonds (EFF), galten als Hauptmotivation der Investoren (BMEL, 2009, 2010). Zusätzliche Boni bei der Verwendung von hofeigener Gülle in den Biogasanlagen steigerten zudem die Attraktivität einer entsprechenden Investition (BMEL, 2010). Im Jahr 2007 wurde die Erzeugergemeinschaft Fischgut Nord eG mit dem Ziel gegründet, Verarbeitung, Herstellung und Vermarktung von Aquakulturerzeugnissen zusammen mit Dienstleistern zentral zu gestalten. Weiterhin sollte sie zu besseren Vertragsbedingungen durch gemeinsame Beschaffung von Setzlingen und Futter führen und als Fortbildungszentrum dienen.

Im Sommer 2008 ging die zweite große Clarias-Produktionsanlage in MV von der Bioenergie Lüchow GmbH aus Altkalen mit 225 m³PV (3 Kreisläufe x 75 m³PV, ca. 1,6 Mio. EUR) in Betrieb, meldete aber für dieses Jahr noch keine Produktionszahlen. Die Produktion aller deutschen Kreislaufanlagen machte im Jahr 2008 mit 1 431 t etwa 4% der gesamten deutschen Aquakultur aus (BMEL, 2010). In den insgesamt 30

Kreislaufanlagen wurden zu 52% Aale, jeweils 14% Europäischer Wels und Stör, 13% Karpfen sowie Streifenbarsch, Barsch und Zander (<2%) produziert. Der Clarias-Anteil betrug mit 54 t/Jahr 4% und wurde zu diesem Zeitpunkt ausschließlich in Brandenburg und Sachsen erzeugt.

Im Jahr 2009 konnte die neu errichteten Anlagen in Selpin und Altkalen erste Raubwelse produzieren und machten mit 246 t bereits 16% der deutschen RAS-Produktion aller Fischarten von 1 494 t aus (Abb. 1.7) (BMEL, 2011). Das Missverhältnis zwischen Kosten und Ertrag der teuren Kreislaufanlagen blieb jedoch weiterhin ein viel diskutiertes Thema und hatte zu damaliger Zeit bereits mehrfach zu Betriebsaufgaben geführt. Weiterhin problematisch war, dass die Raubwelse ein Nischenprodukt mit geringer Nachfrage waren, bei welchem höhere Produktionsmengen schnell zu einem Preisverfall führen (BMEL, 2011). Da die Produktionskapazitäten der Clarias-Anlagen der MV-Produzenten damals erst zu einem Bruchteil ausgelastet waren, wurde die Rentabilität der Anlagen trotz der EEG-Vergütungen und Boni weiter kritisch betrachtet, besonders bei alleiniger Rentabilitätsbetrachtung der Fischzucht.

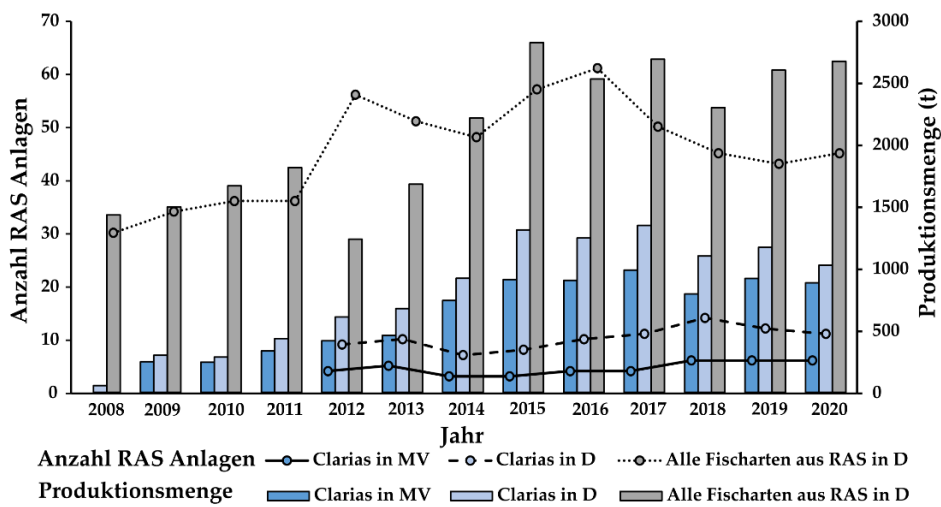


Abbildung 1.7. Entwicklung der Anzahl der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Deutschland (D) und Mecklenburg-Vorpommern (MV) im Verhältnis zu den Produktionsmengen ab 2008 ³. Eine offizielle Statistik zu den Clarias-Anlagen in D und MV existiert erst ab 2012.

Im Jahr 2010 blieb die gemeldete Clarias-Produktion in MV weiter auf dem Vorjahresniveau (242 t), während in Sachsen zwei neue Anlagen zur Clarias und Tilapia Produktion in Betrieb gingen. In Altkalen hat die Bioenergie Lüchow eine Großanlage zur Fischverarbeitung von über 2 000 t/Jahr (ca. 2 Mio. EUR) errichtet, parallel dazu wurde die Welsmeister Vertriebs GmbH & Co.KG in Lüchow gegründet. Die Verfahrenstechnik der RAS-Anlagen hatte zu diesem Zeitpunkt für robuste Fischarten wie Clarias einen beherrschbaren Stand erreicht (BMEL, 2012).

Anfang des Jahres 2011 wurde der Lehrstuhl für Aquakultur und Sea-Ranching an der Uni Rostock besetzt. Hier rückte durch das aufkeimende Interesse norddeutscher Biogaserzeuger der Afrikanische Raubwels in den Fokus der Forschungsarbeiten. Der Großteil der produzierten Fische aus den

³ Die Daten entstammen den Jahresberichten zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur und damit den Angaben der Fischereibehörden der Bundesländer aus den Jahren 2008-2019 (BMEL, 2010-2021). Die Daten der gesamten RAS Produktion in Deutschland entstammen von 2012-2020 der Aquakulturstatistik des Deutschen Statistisches Bundesamtes (Destatis, 2013-2021), welche Warmwasserdurchlauf- und in Teichen befindliche Kreislaufanlagen ausgrenzen und Forschungseinrichtungen inkludieren. Die Daten aus 2020 entstammen der Aquakulturstatistik, da der Jahresbericht für 2020 noch nicht erschienen war.

Kreislaufanlagen wurde 2011 und die Jahre davor lebend an den Großhandel angegeben, in dem signifikant geringere Verkaufspreise erzielt werden (BMEL, 2013). Daher gab es seit 2007 vermehrte Bemühungen, neue Absatzkanäle zu finden und größere Mengen an Lebensmitteleinzelhandel und Endverbraucher abzugeben. Besonders für den Clarias wurde versucht, neue Absatzwege zu schaffen. Als Haupthindernis der Errichtung weiterer RAS-Anlagen in Deutschland wurden neben finanziellen Unabwägbarkeiten auch rechtliche Gründe bezüglich Bau- und Abwassergenehmigung genannt, welche den Ausbau des Sektors limitierten (BMEL, 2013). Ende 2011 wurde die Fischzucht Abtshagen GmbH & Co.KG in Wittenhagen mit einem vergleichsweise geringen Kreislaufvolumen von ca. 15 m³PV gegründet. Hauptziel war, Satzische zur regionalen Jungtierversorgung heranzuziehen. In den Hochzeiten wurden dort bis zu 700 000 Setzlinge von etwa 10-12 g produziert (Wenzel, 2022, pers. Komm.), daneben bezogen die Erzeuger zusätzlich Setzlinge aus den Niederlanden von Fleuren & Nooijen BV (Nederweert).

Im Jahr **2012** stieg die Clarias-Produktion in MV auf 416 t an (BMEL, 2014). In Sukow wurde eine neue Anlage für 1,4 Mio. EUR mit 300 m³PV (4 Kreisläufe x 75 m³PV) durch die Sukower Bioenergie & Welsfarm GmbH & Co.KG errichtet, welche damit die dritte in MV und die fünfte im Nordosten Deutschlands war und einen Output von 375 t/Jahr plante (Fischmagazin, 2012). In Hohen Wangelin begannen in der 2011 fertiggestellten Zanderanlage (220 m³PV, geplante 40 t/Jahr ab 2015, 6,7 Mio. EUR inkl. Versuche & Personal) der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA) ein Jahr später die Forschungsarbeiten zum gesamten Produktionszyklus des Edelfisches (Arndt, 2022, pers. Komm.). In Born wurde die ab 2009 gebaute Kreislaufanlagenhalle zur Zucht und Erforschung von Baltischem Stör, Ostseeschnäpel, Regenbogenforelle, Meerforelle, Zander, Barsch und Garnelen (ca. 100 m³PV angegliedert an Durchflussanlagen und Teich, min 3,7 Mio. EUR) fertiggestellt (Arndt, 2022, pers. Komm.). Während die (Clarias-) RAS-Wirtschaft in MV stetig wuchs, war der Trend in Baden-Württemberg gegenläufig und die letzten von ehemals sechs Clarias-Anlagen wurden komplett stillgelegt (BMEL, 2014).

Im folgenden Jahr **2013** wurde berichtet, dass trotz des Bemühens neue Betriebswege zu erschließen, beide Welsarten zu 80-100% in Niedersachsen und Sachsen über den weniger lukrativen Großhandel abgesetzt wurden. In Altkalen wurde eine zweite Halle der Bioenergie Lüchow GmbH & Co.KG mit 225 m³PV gebaut (3 Kreisläufe x 75 m³PV, ca. 1,6 Mio. EUR), wodurch der dortige Betrieb die bis heute größte Clarias-RAS in MV darstellt, welche aus 6 Teilkreisläufen mit jeweils 75 m³ Produktionsvolumen (= 450 m³PV) in zwei Hallen besteht. In Sachsen erreichte die Clarias-Produktion mit 196 t ihren bis heute gültigen Peak und in Bayern wurden die zwei ersten Clarias-Anlagen erbaut (BMEL, 2015).

Die Clarias-Produktion in MV konnte im Jahr **2014** mit 740 t (Deutschland 919 t) noch einmal deutlich zulegen (Abb. 1.7) (BMEL, 2016). Die kleine, nicht vom EFF geförderte Welsfarm LAW in Reckentin lief in diesem Jahr an (30 m³PV, geplante 30 t, 0,3 Mio. EUR) (Welsfarm LAW, 2018). Zudem ging die erste Garnelen RAS in MV (Grevesmühlen, 400 m³PV, geplante 15 t, 1,7 Mio. EUR) der Garnelen Farm Grevesmühlen GmbH & Co.KG (Cara Royale) in Betrieb (Fischmagazin, 2014). Während die Branche in MV weiter wuchs, nahm die Zahl der Anlagen in Deutschland ab, was u.a. auf die Unrentabilität der Anlagen sowie das Auslaufen des Europäischen Fischerei Fonds (EFF) zurückzuführen war (BMEL, 2016). Aus dem Jahr 2014 stammen auch die ersten sichereren Quellen zu den Abgabepreisen der in RAS erzeugten Fischarten an den Großhandel (Abb. 1.8), an welchen die Raubwelse weiterhin zu 80-100% abgegeben wurden. Für 1 kg Rundfisch (lebender oder toter ganzer Fisch, nicht ausgenommen) hat der Großhandel im Jahr 2014 und 2015 lediglich durchschnittlich 1,06 EUR und der Endverbraucher 1,73 EUR/kg gezahlt, was ein deutliches Indiz für eine zu geringe Nachfrage war und wodurch nicht annähernd kostendeckend produziert werden konnte (BMEL, 2016, 2017). Der Europäische Wels konnte dagegen mit 5,56 EUR/kg und 10,40 EUR/kg vielfach bessere Preise erwirtschaften.

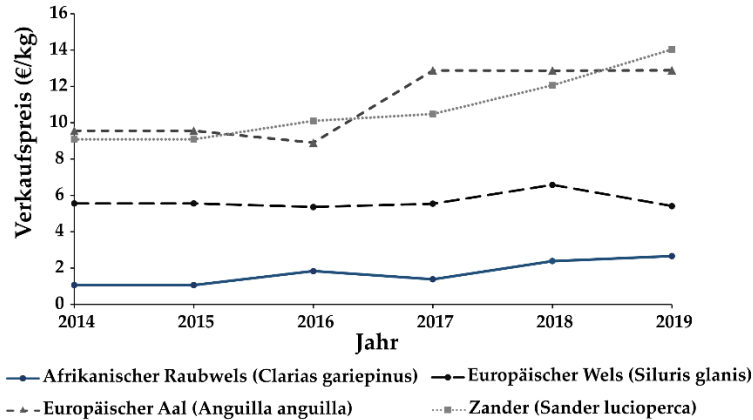


Abbildung 1.8. Preisentwicklung (EUR/kg) ausgewählter Aquakulturarten aus RAS in Deutschland ab 2014 bei Abgabe an den Großhandel, welcher die Fische größtenteils lebend aufkauft (BMEL, 2016-2021)

Ein Jahr später **2015** wurde das FischGlasHaus (2,5 Mio. EUR) der Universität Rostock fertiggestellt, was bis heute als modernste Aquaponik-Forschungseinrichtung Europas gilt. Dort wird seitdem in drei Fischkreisläufen mit jeweils etwa 10 m³PV und 600 m² Gewächshausfläche u.a. Clarias- und Aquaponikforschung betrieben. Die Clarias-Produktion in MV hat mit 908 t durch die neue Anlage in Selpin stark zugenommen. Die Gesamte Clarias-Produktion in Deutschland (1 309 t) ist durch die neuen Anlagen in Bayern (120 t) und Thüringen (100 t) um knapp 400 t ebenfalls stark angestiegen und hat in Kombination mit den anderen Fischarten zu einem bis heute gültigen Spitzenwert von 2820 t der deutschen RAS Zucht geführt (BMEL, 2017; Destatis, 2016). Der Raubwels konnte in diesem Jahr den Aal mengenmäßig als wichtigste Art aus deutscher RAS Produktion ablösen (Abb. 1.9).

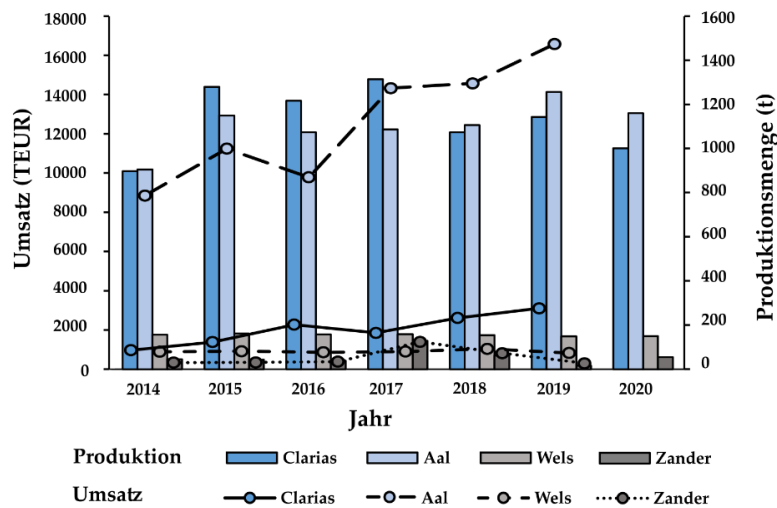


Abbildung 1.9. Umsatz- und Produktionsmengenentwicklung ⁴ der in deutschen rezirkulierenden Aquakultursystemen (RAS) gezüchteten Arten Afrikanischer Raubwels (Clarias), Europäischer Aal, Europäischer Wels und Zander im Verhältnis zur produzierten Menge von 2014-2019 (2020).

⁴ Zur Umsatzberechnung wurde die Annahme getroffen, dass die einzelnen Produktionsmengen zu 100% an den Großhandel abgegeben wurden und zeigen daher den Mindestwert an. Die Werte von 2014-2019 entstammen den Jahresberichten zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL, 2016-2021). Die Produktionsmengen aus 2020 entstammen der Aquakulturstatistik des Deutschen Statistisches Bundesamtes (Destatis, 2021).

Als wichtigste Erzeugerländer galten und gelten mit großem Abstand MV mit Clarias und Niedersachsen mit Europäischen Aal (*Anguilla anguilla*), wo mehr als 99% der Gesamtproduktion des Aals stattfindet. In MV ging die zweite Garnelenfarm der FLUX2 GmbH & Co.KG ebenfalls in Grevesmühlen (360 m³PV, geplante 15 t/Jahr, 1,7 Mio. EUR) in Betrieb, wo trotz hoher Nachfrage aufgrund von schweren Meinungsverschiedenheiten der zwei Geschäftsführer und zu geringen Produktionszahlen bereits ein Jahr später nicht mehr produziert und das Insolvenzverfahren eröffnet wurde (Fischmagazin, 2016a).

Durch die Novellen des EEG in den Jahren 2014 und 2016 wurden die Vergütungen durch Strom und Abwärme aus Biogasanlagen deutlich reduziert und führten neben der ausbleibenden Wirtschaftlichkeit zu einem sinkenden Interesse von Investoren an rezirkulierenden Aquakultursystemen (BMEL, 2017). Das gesunkene Interesse spiegelt sich auch sichtbar an der ab 2015 nicht mehr signifikant veränderten Produktion der wichtigsten Fischarten aus deutscher Warmwasser RAS wieder (Abb. 1.9). Der steigende Mindestumsatz ist durch die gestiegenen Abgabepreise an den Großhandel erklärbar, an welchen die zwei Welsarten und der Aal bis zu 90% abgegeben werden. Das Jahr 2015 kann produktions- und interessenmäßig als Höhepunkt der deutschen RAS-Wirtschaft bewertet werden.

In **2016** wurde die bis dato höchste Anzahl an RAS-Anlagen in Deutschland (61) gezählt (Abb. 1.7). Der mittlere Abgabepreis von Clarias an den Großhandel (1,83 EUR/kg) und Endverbraucher (2,87 EUR/kg) stieg in diesem Jahr signifikant an, wogegen der Preis für Europäischen Wels entsprechend auf 5,36 EUR/kg und 7,27 EUR/kg gesunken ist (Abb. 1.8) (BMEL, 2018). Dies ist ein deutlicher Hinweis, dass sich die öffentliche Wahrnehmung des auf deutschen Märkten relativ neu gehandelten Fisches stark verbessert hat und die zwei Produkte ab diesem Zeitpunkt von den Verbrauchern zunehmend als Substitut gesehen wurden (Destatis, 2017). Im Jahr 2016 hat die Sukower Bioenergie und Welsfarm eine eigene Verarbeitungstrecke aufgebaut und sich dadurch von der Filetierung durch „Filetas“ der Fischgut Nord eG gelöst (Fischmagazin, 2016b). In Waren, Müritz MV öffnete die erste kommerzielle Aquaponikanlage in MV (26 m³PV und 352 m² Gewächshaus, 0,5 Mio. EUR) zur Clarias- und Tomatenproduktion durch die Müritzfischer im Rahmen des INAPRO Projektes (Baganz et al., 2020).

Die Produktionsmengen von Clarias in MV und Deutschland, sowie aller Fischarten in Deutschland sind 2016 leicht gesunken (BMEL, 2018; Destatis, 2017). Das BMEL sah die Stagnation der deutschen RAS-Wirtschaft dieses Jahres im Zusammenhang mit dem im Vorjahr ausgelaufenen EFF, was jedoch eher unwahrscheinlich ist, da der EFF nahtlos durch den Europäischen Meeres- und Fischereifonds (EMFF 2014-2020) mit gleichen Fördermöglichkeiten ersetzt wurde. Die ausbleibende Wirtschaftlichkeit und die reduzierten Boni waren die wahrscheinlicheren Wachstumsbremsen.

Das Jahr **2017** war das Rekordjahr der mecklenburgischen- (985 t) und deutschen (1 345) Clarias-Zucht (Abb. 1.7) (BMEL, 2018). Die Abnahmepreise von Großhandel und Endverbraucher waren mit 1,38 EUR/kg und 2,18 EUR/kg jedoch wieder deutlich gesunken, was durch gestiegene Produktionsmengen und zu geringe Nachfrage hervorgerufen sein worden könnte. In Sukow wurde ein erstes Netzwerktreffen „Afrikanischer Wels in Kreislaufanlagen“ organisiert, mit dem Hauptziel, die Verbraucherwahrnehmung zu verbessern (Fischmagazin, 2017), und die PAL Aquakultur wurde neu firmiert. Ein gegenläufiger Trend war in Deutschland zu beobachten, wo die Anlagenanzahl auf 50 gesunken ist und auch die Produktionsmenge aller anderen Fischarten aus RAS-Anlagen stagnierte (Destatis, 2018). Aus verschiedenen Bundesländern wurde erneut berichtet, dass höhere Vermarktungsanteile an Einzelhandel und Endkunden (erfolgreich) angestrebt wurden, dies jedoch mit hygiene- und genehmigungsrechtlichen Schwierigkeiten behaftet war (BMEL, 2019). In NRW wurde über mehrere Jahre von aufkeimendem Investitionsinteressen in RAS-Anlagen berichtet, dessen Umsetzung jedoch wiederholt an mangelhaften Wirtschaftlichkeitsberechnungen scheiterten (BMEL, 2019).

Im Folgejahr **2018** hat die gesamte deutsche RAS-Wirtschaft bezüglich fast aller wichtigen Kenngrößen deutlich eingebüßt. In MV wurde die Anlage der Tessiner Edelfisch GmbH & Co.KG durch einen Krankheitsausbruch vollständig stillgelegt, wodurch die MV Produktion um knapp 200 t auf 794 t schrumpfte (BMEL, 2020). Die RAS-Wirtschaft in Deutschland ging um knapp 400 t auf 2 294 t zurück und die Anzahl der Anlagen lag nur noch bei 45 (Destatis, 2019). Die Verknappung des Angebots hat in diesem Jahr jedoch zu einem starken Preisanstieg geführt (Abb. 1.8). So stiegen die Großhandelspreise von Clarias um ganze 72% auf 2,38 EUR/kg, des Europäischen Welses um 19% auf 6,58 EUR/kg und des Zanders, dessen Produktion sich von 132 auf 64 t mehr als halbiert hat, um 15% auf 12,06 EUR/kg (BMEL, 2020). Der Aal hat in diesem Jahr mengen- und preismäßig das Vorjahresniveau gehalten.

Im Jahr **2019** ist die Clarias-Produktionsmenge in MV wieder auf 918 t angestiegen, wodurch auch die deutsche Produktion auf 1 170 t anstieg (BMEL 2019). Die Produktion in Bayern (80 t), Brandenburg (100 t) und Thüringen (10 t) war dagegen von 2015-2019 sehr konstant, wogegen die Clarias-Produktion in Sachsen seit 2013 (196 t) jährlich abgenommen hat und sich 2019 bei nur noch 61 t befand (BMEL, 2021). Besonders war dieses Jahr, dass der Clarias trotz gesteigerter Produktionsmengen einen weiteren Preisanstieg im Großhandel um 12% auf 2,66 EUR/kg verzeichnen konnte. Der Anlagenbauer PAL Aquakultur GmbH aus Abtshagen, MV wurde in diesem Jahr nach einem Insolvenzverfahren liquidiert. Der Großteil der gesamten deutschen RAS-Produktion (2 598 t) wurde weiterhin an den Großhandel abgegeben, die in Bayern produzierten Garnelen konnten jedoch mehrheitlich hochpreisig über Online Plattformen vertrieben werden (BMEL, 2021, Destatis, 2020). Das Land MV konnte seit 2015 insgesamt 46 Mio. EUR Fördergelder aus dem EMFF abrufen, wovon, laut des zuständigen Fischerei-Referenten im Schweriner Landwirtschaftsministerium für EMFF-Anträge aus Mecklenburg-Vorpommern, 2019 jedoch lediglich 5 Mio. EUR aufgrund enormer bürokratischer Hürden ausgezahlt wurden (Deutschlandfunk, 2019)

Der bei der Erstellung dieser Dissertation letzte Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2019 nennt die folgenden Hauptgründe für die Stagnation des Sektors: Zum einen haben die EEG Novellen zu signifikanten Vergütungseinbußen oder -ausfällen geführt, was Investitionen in Warmwasseranlagen weniger attraktiv machte. Außerdem stellten genehmigungsrechtliche Probleme weitere bürokratische Hürden dar, und zuletzt hat die ausbleibende Rentabilität aufgrund zu geringer Preise oder mangelnden Absatzes zu Betriebsaufgaben geführt oder Investoren abgeschreckt (BMEL, 2021).

1.5.3. Aktueller Stand ab 2020

Aus dem Jahr **2020** stammen die letzten offiziellen Zahlen der Aquakulturstatistikerhebung des Statistischen Bundesamtes bei Erstellung dieser Arbeit (Destatis, 2021). In MV wurde die Aquakultur klar von der Clarias-Zucht dominiert, bzw. in Deutschland wurde die Clarias-Zucht von MV dominiert (Abb. 1.10); in MV produzierte die Aquakultur 1 166 t Fisch, davon waren 76% Clarias (883 t), und von der deutschen Clarias-Produktion (1 025 t) kamen 86% aus MV (883 t).

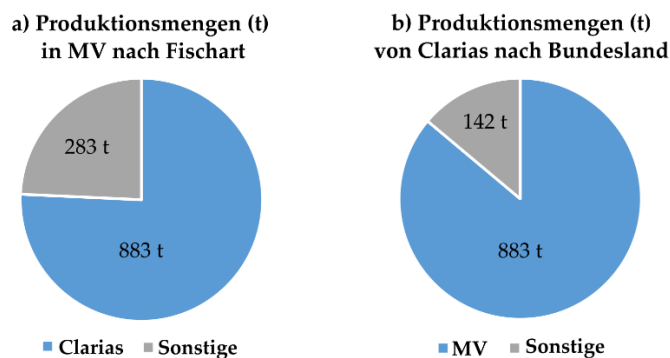


Abbildung 1.10. a) Anteil der Produktionsmengen (t) von Clarias in Mecklenburg-Vorpommern (MV) und b) Anteil von MV an der deutschen Clarias-Produktion in 2020 (Destatis, 2021).

Die Clarias-Produktion in Deutschland ist aufgrund des starken Rückgangs in anderen Bundesländern im Vergleich zu 2019 um 145 t zurückgegangen (Abb. 1.7) (Destatis, 2021). Die RAS-Produktion in Deutschland ist leicht gestiegen und betrug 2 669 t in 45 gelisteten Betrieben. In 2020 investierten zwei existierende Clarias-Produzenten in MV größere Summen (2,4 Mio. EUR) in Ausbau und Modernisierung, welche zu 49% durch den EMFF und das Land MV gefördert wurden. Die Bioenergie Lüchow GmbH & Co.KG erhielt 770 Tsd. EUR für den Aufbau einer Satzfishproduktion und die Verbesserung der Filtertechnik und die Tessiner Edelfisch GmbH & Co.KG bekam 430 Tsd. EUR für Umbaumaßnahmen der Fischverarbeitung und Optimierung der Prozesswasseraufbereitung (Fischmagazin, 2020). Im gleichen Jahr übernahm Hansegarnelen die seit mehreren Jahren leerstehenden Garnelenproduktionshallen von FLUXX2 in Grevesmühlen für unternehmerische Forschungszwecke (Northdata, 2022). Die Zander Forschungsanlage in Hohen Wangelin hat sich vollständig auf die Zucht von Satzfishen (10-15 g) spezialisiert und züchtete im Projektzeitraum von 07.2020 bis 01.2022 ca. 127 000 Setzlinge zu einem Verkaufswert von 1,10 EUR/Stück, wovon der Großteil außerhalb von MV vertrieben wird (Arndt 2022, pers. Komm.; Heidemann, 2022 pers. Komm.). Für Krebstiere (Garnelen) wurden trotz gelisteter Betriebe von 2015-2020 keine oder zu geringe Angaben zur erzeugten Menge gemacht (Destatis, 2016-2021), daher wurde auf die Angabe verzichtet.

Im Jahr **2021** wurde die Fischzucht Abtshagen GmbH & Co.KG aufgrund des Ausscheidens des Geschäftsführers liquidiert. Das Folgejahr **2022** wird weiter an der Umsetzung einer der teuersten und größten Projekte der deutschen RAS-Wirtschaft gearbeitet: In Neustadt-Gleve, MV, soll für ca. 10 Mio. EUR eine Zanderanlage der Deutschen Edelfisch DEG GmbH & Co. II KG zur geplanten Zucht von 500-700 t/Jahr des hochpreisig gehandelten Raubfisches entstehen (Deutsche Edelfisch, 2022). Daneben konnte die 0,8 Mio. EUR teure Anklamer Garnelen RAS der Fraktal GmbH (495 m³PV, geplante 15 t/Jahr, 0,8 Mio. EUR) nach langen Anlaufproblemen die ersten Garnelen in den Handel bringen (pers. Komm. Lorenzen 2022; Nordkurier, 2022). In Bergen auf Rügen entsteht zeitgleich ein neuer Produktions- und Forschungsstandort zur Zucht von Clarias, Zander und weiteren aquaponischen Erzeugnissen. Die Produktion der Aquaponikanlage in Waren wurde Anfang des Jahres stillgelegt. In MV existieren Anfang des Jahres 2022 zusammengefasst 4 kommerzielle RAS-Anlagen zur Clarias-Zucht mit einem gesamten Produktionsvolumen von 1 080 m³PV (Tab. 1.3). Von einer Farm davon wird berichtet, dass die Produktion heruntergefahren wird. Zur Clarias- und Aquaponikforschung stehen 27 m³PV und 1 000 m² Gewächshausfläche im FischGlasHaus der Universität Rostock zur Verfügung. In Born (100 m³PV) und Hohen Wangelin (220 m³PV) stehen Kreisläufe zur Erforschung weiterer RAS-Kulturorganismen. Zur Shrimp Produktion stehen in 3 Anlagen insgesamt 1 255 m³PV zur Verfügung. Die Clarias-Setzlinge werden 2022 nicht mehr aus den Niederlanden bezogen, sondern zunehmend von den Züchtern selbst

großgezogen oder von einem österreichischen Lieferanten erworben. In Hohen Wangelin werden vom LAF Zander Setzlinge herangezogen, mit welchen zukünftig der regional entstehende Bedarf der neuen Anlage in Neustadt-Gleve versorgt werden soll. Zur aquaponischen Forschung und Produktion stehen in zwei Anlagen 1 352 m² Gewächshausfläche zur Verfügung. Eine aquaponische Produktion oder Wirtschaft ist Anfang 2022 in MV nicht existent.

Tabelle 1.3. Produktionsvolumen (m³PV), voraussichtliche Produktionsmenge (t) und Anzahl Mitarbeiter der privat betriebenen, aktiven rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Mecklenburg-Vorpommern in 2022.

RAS	m ³ PV	Produktion (t)	Mitarbeiter
Tessiner Edelfisch	300	ca. 250 ¹	10 ²
Bioenergie Lüchow	450	geplant 600	14 ²
Sukower Bioenergie und Welsfarm	300	k.A.	10 ²
Welsfarm LAW	30	27,5	1,5
Garnelen Farm Grevesmühlen	400	ca. 3-6 ³	ca. 2.5 ³
Hansegarnelen Grevesmühlen	360	geplant 6	2,5
Garnelen Farm Fraktal	495	geplant 15	ca. 3 ³

¹ Schätzwerte bei einer max. Besatzdichte von 350 kg/m³. ² Mitarbeiter in Welszucht und Bioenergie. ³ Schätzwerte.

In Abbildung 1.11 wird ersichtlich, dass in der Wende des ersten Jahrzehnts sehr große Förderbeträge des Europäischen Fischereifonds (EFF inkl. Kofinanzierung) in die MV Binnenfischerei und Aquakultur geflossen sind. In den Jahren 2009 und 2010 gingen mit je 53% (6 029 Tsd. EUR) und 54 % (6 785 Tsd. EUR) überdurchschnittlich viele Anteile der gesamten deutschen Förderung nach MV.

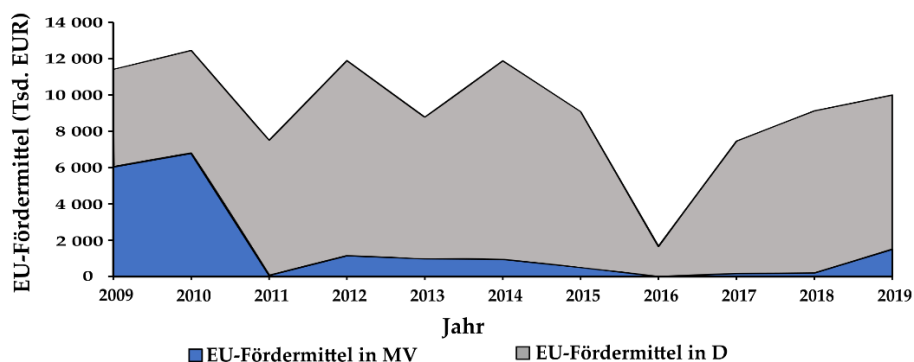
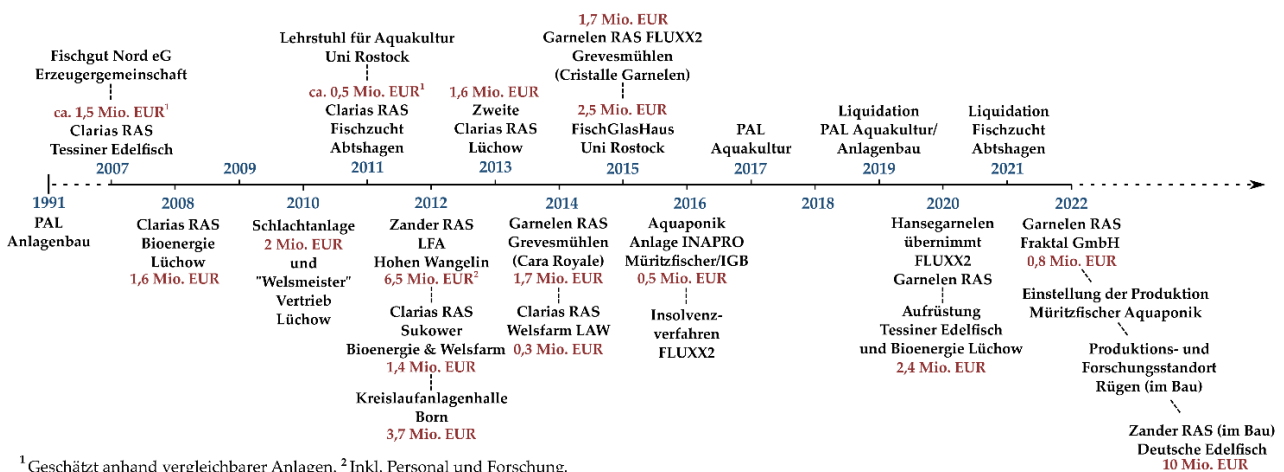


Abbildung 1.11. Höhe der Zuflüsse der Europäischen Förderprogramme (EFF, EMFF und weitere) nach Mecklenburg-Vorpommern (MV: blau) und Deutschland (D: grau) von 2009-2019. Die Gelder setzen sich aus EU-Mitteln und Kofinanzierungen des Landes und Gemeinschaftsausgaben zusammen. Für das Jahr 2008 waren keine Angaben für MV vorhanden. Die Grafik wurde aus den Daten der Jahresberichte der Deutschen Binnenfischerei 2009-2019 erstellt (BMEL, 2011-2021).

Im Folgejahr 2011 ist der Anteil von MV an der gesamtdeutschen Förderung auf weniger als 1% (60 Tsd. EUR) gesunken. Zwischen 2012 und 2015 bewegte sich MV mit 6-11% im Verhältnis zur Landesgröße passenden Bereichen, bis im Jahr 2016 gar keine Gelder mehr flossen. Nach dem produktionsmäßigen Rekordjahr 2017 der MV Clarias-Zucht (Abb. 1.7) gingen nicht nur die Produktionsmengen zurück, sondern auch die Fördermittel durch den Europäischen Meeres- und Fischereifonds (EMFF) blieben in den folgenden Jahren 2017-2018 mit jeweils 2% (159 Tsd. EUR und

194 Tsd. EUR) unterdurchschnittlich gering. Im letzten gemeldeten Förderjahr 2019 flossen mit 1 493 Tsd. EUR noch einmal größere Zuwendungsmittel nach MV und durch die Ausbauten der Bioenergie Lüchow und des Tessiner Edelfisch dürften die Anteile auch 2020 weiterhin höher sein. Im Jahr 2008 betrug der Anteil der Aquakultur an den gesamten Fördermitteln 36%, danach sank er 2010 auf 5% und im Anschluss schwankte er zwischen 12-19%. Weitere Fördermittel waren beispielsweise Biotopverbesserungen, Besatzmaßnahmen, Fischereibiologische Untersuchungen etc. Sollte die Zanderzucht in Neustadt-Gleve in vollem Umfang gefördert werden, wird der Anteil von MV allein durch Aquakultur um 5 Mio. EUR im Jahr der gemeldeten Auszahlung ansteigen.

Die wichtigsten Meilensteine der RAS in MV sind in Abbildung 1.12 zusammengefasst.



¹ Geschätzt anhand vergleichbarer Anlagen. ² Inkl. Personal und Forschung.

Abbildung 1.12. Meilensteine der rezirkulierenden Aquakultursysteme (RAS) in Mecklenburg-Vorpommern.

Zusammen ergibt sich eine gesamte Investitionssumme von mindestens 16 Mio. EUR in RAS Produktionsanlagen, wovon ca. 7,7 Mio. EUR durch EU- und Landesmittel gefördert wurden. Daneben wurden mindestens 12,7 Mio. EUR in Forschungseinrichtungen investiert, wobei eine genaue Aufschlüsselung mit den zugrunde liegenden Daten nicht möglich ist, da auch Personal und Forschung mit den 6,5 Mio. EUR in Hohen Wangelin finanziert wurden. Auch ohne Berücksichtigung des Zeitwertes des Geldes der Gesamtinvestitionen in MV seit 2007 verdeutlicht die Summe von 10 Mio. EUR in die neue Zander RAS in Glücksstadt für 500-700 t Zander/Jahr die Dimension dieser neuen Investition. Im neuen Standort auf Rügen (Bergen) wurden die Fisch- und Pflanzenproduktionsanlagen günstig aus der Liquidation der Fischzucht Abtshagen erworben und von der Uni Rostock bereitgestellt.

1.6. Ziele und Methodik dieser Arbeit

Bis heute hat sowohl die deutsche-, als auch die mecklenburgische Clarias-RAS-Wirtschaft ökonomisch nicht nachhaltig gewirtschaftet und rein kommerziell betriebene Aquaponikanlagen sind in MV nicht mehr existent. Aus Wissenschaft und Praxis ist bekannt, dass aquaponische Anlagen Schwierigkeiten haben profitabel zu wirtschaften, wobei in den meisten Fällen die RAS als eigenständiger Betriebszweig betrachtet der unprofitable Teil der Aquaponik ist. Bis heute lagen noch keine Forschungsarbeiten zu konkreten ökonomischen Fragestellungen der Clarias-RAS vor, welche aufgrund der aktuellen Unwirtschaftlichkeit die Grundlage für weitere Überlegungen zur Aquaponik mit Clarias bilden sollten. Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation ist, die Clarias-RAS- und Aquaponik-Wirtschaft in MV zu analysieren und konkrete Handlungsempfehlungen zu geben. Dazu werden das Wachstumsverhalten der Fische untersucht, neue aquaponische Subsysteme erforscht und die

Entwicklung und aktuelle Situation der Afrikanischen Raubwels-RAS analysiert. Mit den Forschungsergebnissen sollen Verbesserungsmöglichkeiten der Clarias-RAS aufgezeigt werden, um dieses System zukünftig für kommerzielle aquaponische Integrationen interessant zu machen. Die Unterziele gliedern sich wie folgt auf:

Eine Wissenslücke betrifft das Wachstumsverhalten des Afrikanischen Raubwelses. Bisher wurden nur kurze Wachstumsperioden, speziell in der juvenilen Phase genauer untersucht. Eine umfassende Untersuchung zum Wachstum Afrikanischer Raubwelse in RAS über einen längeren Zeitraum war noch nicht vorhanden. Eine weitere Zielstellung ist daher, durch ein Besatzdichtenexperiment über die gesamte Wachstumsphase herauszufinden, ob und wie sich verschiedene Besatzdichten auf die Wachstumsperformance des Afrikanischen Raubwelses in RAS auswirken und was die Ergebnisse operativ und ökonomisch für eine Welszucht und für eine mögliche aquaponische Anwendung in MV bedeuten.

Forschungsansätze im FischGlasHaus der Universität Rostock haben gezeigt, dass der Afrikanische Raubwels in der Aquaponik für die gemeinschaftliche Produktion von Fisch und Pflanzen geeignet ist. Die aquaponische Produktion konnte bisher gute Ergebnisse in speziellen Fisch-Pflanzen Kombinationen erzielen, jedoch besteht noch ein Mangel an hochproduktiven System-Kombinationen. Ein Ziel dieser Arbeit ist, hydroponische Systeme für die kommerzielle aquaponische Anwendung zu entwickeln und zu vergleichen. Dazu wurde zum einen das sog. „Dynamic Root Floating-System“ und das in der Aquaponik noch nie verwendete „Aeroponik“- Pflanzenabausystem mit einer intensiven Welsaquakultur gekoppelt und mit konventionellen Systemen verglichen.

Zudem haben die großen Welszuchten in MV bzw. Deutschland seit der Initialisierung der Clarias-Wirtschaft vor 15 Jahren Schwierigkeiten, ökonomisch nachhaltig zu agieren. Die dritte Zielstellung dieser Arbeit ist, die Kosten einer Welsaquakultur aufzuschlüsseln und daraus Empfehlungen herzuleiten, um eine Farm aber auch die Welsaquakultur in MV zu unterstützen und nachhaltig profitabel zu gestalten.

Die Ergebnisse dieser Studien werden mit der Entwicklung, aktuellen Zahlen und Trends der Aquakultur und der RAS- und Aquaponik Wirtschaft in MV und Deutschland zusammengeführt und kritisch betrachtet. Daraus werden konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet und eine Prognose für die zukünftige Entwicklung erstellt.

1.7. Arbeitshypothesen

1. Clarias-RAS in Norddeutschland kann wegen hoher Fix- und Energiekosten nur bei hohen Besatzdichten profitabel produzieren.
2. Besatzdichten haben Einfluss auf das Wachstum Afrikanischer Raubwelse in RAS.
3. Das DRF System erzielt in der Aquaponik bei hohen Wassertemperaturen bessere Pflanzenwachstumsergebnisse als konventionelle hydroponische Subsysteme.
4. Die Aeroponik ist ein hochproduktives Anbausystem, das sich zur kommerziellen aquaponischen Anwendung in der Aquaponik eignet.
5. Die Voraussetzung für eine kommerzielle Aquaponik mit Afrikanischen Raubwels ist eine ökonomisch nachhaltige Clarias-RAS.
6. Afrikanische Raubwels-RAS in Mecklenburg-Vorpommern haben Schwierigkeiten, unter aktuellen Marktbedingungen nachhaltig zu wirtschaften.
7. Die Clarias-Wirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern hat das Potential ein profitabler Wirtschaftssektor zu sein.

1.8. Struktur der Dissertation

Kapitel 1 gibt einen Überblick über die historische Entwicklung, die wichtigsten Informationen, Forschungsarbeiten und Trends des Afrikanischen Raubwelses, rezirkulierender Aquakultursysteme (RAS) und der Aquaponik. Anschließend wird ein Überblick zu den wichtigsten wirtschaftlichen Kennzahlen der weltweiten Fischereiwirtschaft gegeben, wobei der Fokus über Europa und Deutschland nach MV gelenkt wird. Die Entwicklung der Warmwasser RAS-Wirtschaft in MV wird anschließend detailliert dargestellt. Im letzten Abschnitt werden die Ziele, Methodik und Arbeitshypothesen dieser Arbeit beschrieben.

Kapitel 2 enthält die Bewertung des Wachstumsverhaltens des Afrikanischen Raubwelses in verschiedenen Besatzdichten in einer semi-kommerziellen RAS. Dazu wurde das Wachstum über 155 Tage in 5 verschiedene Wachstumsphasen unterteilt und sowohl einzeln, als auch in der Gesamtbetrachtung analysiert. Zusätzlich wurde eine kurze Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher Besatzdichten gegeben. (Pasch et al. 2022, eingereicht)

Kapitel 3 beschreibt die vergleichende Anwendung von drei hydroponischen Subsystemen in der Aquaponik. Verglichen wurden zwei bekannte System, Raft und NFT („Growpipes“) mit einem wenig bekannten System, der „Dynamic Root Floating“ Technik (DRF), in welchem der Wurzelansatz der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist. (Pasch et al., 2021a)

Kapitel 4 beschreibt die vergleichende Anwendung von drei hydroponischen Subsystemen in der Aquaponik. Verglichen wird das bekannte System, Raft mit DRF und dem noch nie in der aquaponischen Forschung verwendeten hydroponischen Subsystem „Aeroponik“, bei welchen die Wurzeln in Rinnen wachsen und mit feinen Düsen besprüht werden. (Pasch et al., 2021b)

Kapitel 5 bietet eine wirtschaftliche Analyse der Clarias-Zuchten in MV. Die Hauptkosten und Erträge einer Modellfarm mit 300 m³ Produktionsvolumen werden aufgeschlüsselt und die Auswirkungen von möglichen Preisschwankungen analysiert. Ein weiterer Fokus liegt auf möglichen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsszenarien und ihren monetären Auswirkungen auf wichtige Betriebskennzahlen. (Pasch & Palm, 2021)

Kapitel 6 enthält die Diskussion der Ergebnisse der experimentellen Ergebnisse aus Kapitel 2-4, der Modellstudie aus Kapitel 5 im Zusammenhang mit der Analyse der RAS-Wirtschaft in MV. Dabei werden die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick über den künftigen Forschungsbedarf erstellt, der erforderlich ist, um die (Clarias-) RAS und Aquaponik Wirtschaft in MV weiterzuentwickeln.

Kapitel 7 listet die in dieser Dissertation verwendeten Literaturnachweise auf.

Kapitel 8 beinhaltet die Eidesstaatliche Erklärung.

Kapitel 9 beinhaltet den Lebenslauf des Autors dieser Dissertation.

Kapitel 10 dankt den Personen, die den Autor bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

2. Effects of Stocking Density of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in RAS on Growth Performance and Profitability ⁵

Abstract

The present study assessed the effects of stocking densities, in an intensive aquaculture unit (IAU: 120 fish/m³) and an extensive aquaculture unit (EAU: 33 fish/m³), on the growth performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) in various life stages in recirculating aquaculture systems (RAS) for 155 days. The fish from the IAU showed a reduced length from day 36 on and a reduced weight from day 99 compared with those from the EAU. After 155 days, *C. gariepinus* in the IAU (45.97 cm) was 4.4% shorter than in the EAU (47.99 cm), and the final weight in the IAU (864.77 g) was 8.3% less than in the EAU (943.06 g). For the initially homogeneously sized catfish (IAU 30.76 ± 2.04 g; EAU 30.75 ± 1.84 g), similar FCRs (IAU 0.69; EAU 0.67) and SGRs (IAU 4.42%/d; EAU 4.52%/d) were recorded during the first growth period (day 1-36). With increasing age, the size heterogeneity increased (IAU 506.95 ± 166.78 g; EAU 539.46 ± 141.36 g), and the FCR (IAU 1.45; EAU 1.11) and SGR (IAU 0.85%/d; EAU 0.83%/d) increasingly deviated from standard values in each size class, being most evident in the IAU due to significantly higher heterogeneous growth. Survival rates were very high in both systems (> 98%) and were not influenced by stocking densities or growth heterogeneity. The profit per fish in the IAU (0.68 EUR) was 25% lower than in the EAU (0.91 EUR), resulting in a higher resource efficiency of African catfish in RAS under extensive stocking conditions.

Keywords

African catfish; aquaculture; economy; extensive; intensive; resource efficiency; RAS; stocking density

⁵ Dieser Artikel wurde im Januar 2022 eingereicht bei *Aquaculture Research* unter: Pasch et al. (2022).

2.1. Introduction

Aquaculture is the fastest growing sector in the agricultural industry worldwide (Naylor et al., 2021). However, its growth is stagnating in many European countries (European Commission, 2013; FAO, 2020a) because of high production costs and restrictive legislation due to environmental and animal health concerns (Asche et al., 2013; Badiola et al., 2012; Palm et al., 2018b). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) are considered to be a special form of aquaculture. After initial high investment costs, other production variables, such as reduced water consumption, higher stocking densities, and better control of nutrient and wastewater release, can be improved (Badiola et al., 2012; Martins et al., 2010).

The African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) is particularly suitable for RAS cultivation. This species can breathe underwater and atmospheric oxygen (Oellermann, 1995), has a low disease susceptibility, grows very quickly, and has an excellent feed conversion (FCR), even in reduced water quality (Bovendeur et al., 1987; Fatollahi & Kasumyan, 2006; Schram et al., 2010). Economically and scientifically, catfish production has gained importance in recent years and is currently at a worldwide level of over 200 k tons (FAO, 2020b). In Europe, RASs for African catfish have been developed since the 1980s (FAO, 2020b), with much of the development taking place in the Netherlands and also increasingly in Mecklenburg Western Pomerania, Germany (Palm et al., 2018b). The combination of alternative energy and warm water sources, such as biogas plants (Schmidt-Puckhaber, 2010), has increased the annual production to 1025 tons in Germany, of which 883 tons are produced in Mecklenburg Western Pomerania (Destatis, 2021). The African catfish can be kept in RASs at high stocking densities due to its robust nature (van de Nieuwegiessen et al., 2009).

When producing African catfish inside an RAS, special attention is given to the stocking density, because high stocking densities can reduce the costs per unit of production, thus resulting in higher profits. In addition, profitability is influenced by stocking densities because they directly affect fish growth, survival, behaviour, health, water quality, and feeding (Oké and Goosen, 2019). From an animal welfare and ethical perspective, high stocking densities in fish have been frequently debated (Lymbery, 2002; Turnbull et al., 2008; Baldwin, 2011) and can negatively affect fish welfare in species such as sea bass (*Dicentrarchus labrax*) (Gornati et al., 2004), trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Ellis et al., 2005), salmon (*Salmo salar*) (Calabrese et al., 2017), and seabream (*Sparus aurata*) (Montero et al., 1999). In contrast, high stocking densities can result in better feed intake and faster growth, and low densities can lead to depressed food intake and growth rates in species such as the Arctic Charr (*Salvelinus alpinus*) (Jørgensen et al., 1993). Similarly, rapid growth and a great resilience towards high stocking densities has been repeatedly confirmed for African catfish (Huisman and Richter, 1987; Hengsawat et al., 1997; Hossain et al., 1998) with a specific growth rate (SGR) of more than 2%/day over the production time of only five months and an excellent FCR of regularly less than one (van de Nieuwegiessen et al., 2009; Palm et al., 2018b). From a purely production-oriented perspective, commercial African catfish farms are recommended to harvest at stocking densities of 350 kg/m³ (Palm et al., 2018b), whereby stocking densities of up to 500 kg/m³ showed no adverse effects on growth, mortality, or welfare indicators (van de Nieuwegiessen et al., 2009). In a stocking density experiment with juvenile African catfish (10 g), growth performance and physiological and behavioural data showed little evidence of impaired welfare, although an increase in skin lesions was detected at the highest stocking densities (3000 and 2375 fish/m³) and signs of chronic stress were detected at the highest and lowest stocking densities (3000 and 500 fish/m³) (van de Nieuwegiessen et al., 2009). One of the main obstacles of rearing African catfish larvae and juveniles are high rates of cannibalism (Kaiser et al., 1995; Al-Hafedh and Ali, 2004). It was demonstrated that increased stocking densities did not increase cannibalism, and in fact, higher stocking densities resulted in less non-cannibalistic mortality (Haylor, 1991). Juvenile silver catfish, reared at stocking densities of 16 to 32 kg/m³, were better maintained in terms of energy metabolism

and stress processes than those kept at the lowest density of 8 kg/m³ (Menezes et al., 2015). Another study stated that the highest stocking density (2500 fish/m³) of juvenile African catfish reduced the FCR and aggression and increased growth compared to the lower stocking density (250 fish/m³) (Almazan Rueda, 2004).

Several studies described growth as negatively density-dependent (Haylor, 1991, 1993; Hossain et al., 1998; Dai et al., 2011) and cannibalism as positively density-dependent (Hecht and Appelbaum, 1988). In a study with juvenile African catfish (32 g), the highest mean fish weight was observed after eight weeks at the lowest stocking density of 50 fish/m³ and decreased with increasing stocking density (max 200 fish/m³) (Hengsawat et al., 1997). An aquaponic experiment showed that at very low stocking densities of 1.6 kg/m³, juvenile African catfish with an initial weight of 3.92 g were able to achieve good growth performance with an FCR of 0.62 (Knaus and Palm, 2017a), while adult *C. gariepinus* of 480.23 g at the stocking density of 6.72 kg/m³ had an FCR of 1 (Palm et al., 2014a). Comparable growth was found in a study comparing intensive (140 fish/m³) and extensive (35 fish/m³) cultured African catfish, where the fish had an initial weight of 275 g. A feeding rate of 80% in a commercial farm led, after 156 days, to FCRs and SGRs of 0.94 and 1.09%/day (intensive) and 0.96 and 1.07%/day (extensive), respectively (Knaus et al., 2020b). Still, studies on the effects of African catfish stocking density larger than fingerlings are scarce.

Along with the studies on extensive cultivation of African catfish in RAS, commercial extensive production is particularly common in African and Asian pond systems. In a stocking density experiment in Thai pond cages, the highest mean fish weights were found at the lowest stocking densities (50 fish/m³; 385.75 g), with mean weights decreasing significantly with increasing densities (max 200 fish/m³; 346.81 g) (Hengsawat et al., 1997). Daily instantaneous growth rates and mortality were unaffected by stocking density, while total harvests and production estimates increased with increasing stocking density (Hengsawat et al., 1997). A study in earthen ponds (3 × 10 × 1 m, each) in Benin showed that the final weight, specific growth rate, and weight gain were affected by stocking densities (Oké and Goosen, 2019). The highest profitability index (net return per total production cost) was obtained at the medium stocking density (7 fish/m²), while the highest stocking density (10 fish/m²) resulted in the highest net return, but poor water quality and higher environmental costs led to trade-offs between short-term profits and ensuring long-term sustainability (Oké and Goosen, 2019). Present data demonstrate that fish growth performance and farm profitability are highly dependent on fish species and other husbandry conditions, such as the choice between RAS or pond culture and high (intensive) or low (extensive) stocking densities, and results can also vary widely depending on fish age.

We herewith describe, for the first time, the growth performance of African catfish (> 30 g) during five different life cycle stages over a total period of 155 days. The fish were kept under two different stocking densities in a semi-commercial RAS. The effects of the stocking densities on the water parameters and different growth parameters and the possible effects of the different individual growth performances on the calculated profitability are discussed.

2.2. Materials and Methods

2.2.1. Experimental set-up

The experiment was conducted from 15 June 2020 to 17 November 2020 (155 days) in the FishGlassHouse of the University of Rostock (Northern Germany), Faculty of Agriculture and Environmental Sciences (AUF, latitude: 54.075714, longitude: 12.096591). The aquaculture site of the experimental facility has a total area of 300 m² and is divided into three autonomously functioning recirculating aquaculture systems (RASs) of 100 m² each, allowing different stocking densities (intensive, semi-intensive, extensive) of African

catfish (*Clarias gariepinus*). Then intensive and the extensive RAS unit were used for this experiment. Each RAS has the same fish tank size of 1 m³, which are arranged in triplicate groups with the same pumps, lights, automatic feeders and connecting pipes (Figure 2.1). The intensive aquaculture unit (IAU) and extensive aquaculture unit (EAU) differ in terms of the sizes of the filters and sumps, and the water exchange rate: the settling tanks (sedimenters) have 1.7 m³ (IAU); 1.2 m³ (EAU) filled with filter material (FAP 627) volumes of 1.03 m³ (IAU); 0.66 m³ (EAU) with tube size of 54 mm and effective surface area of 105 m²/m³, resulting in total effective surface areas of 108 m² (IAU); 69 m² (EAU). The sumps' volumes are 4 m³ (IAU); 1.7 m³ (EAU), and the biofilters (trickling filter) have volumes of 11.8 m³ (IAU); 2.9 m³ (EAU) with channel openings of 2 x 20 mm (crossflow structure) and a specific surface area of 125 m²/m³, resulting in total surface areas of 1474 m² (IAU); 369 m² (EAU). The total system volumes are 16,9 m³ (IAU); 13.9 m³ (EAU) (Palm et al., 2018b). The average daily water exchange rate was < 10% in IAU and < 5% in EAU. The sedimenter was drained and cleaned at least once a week.

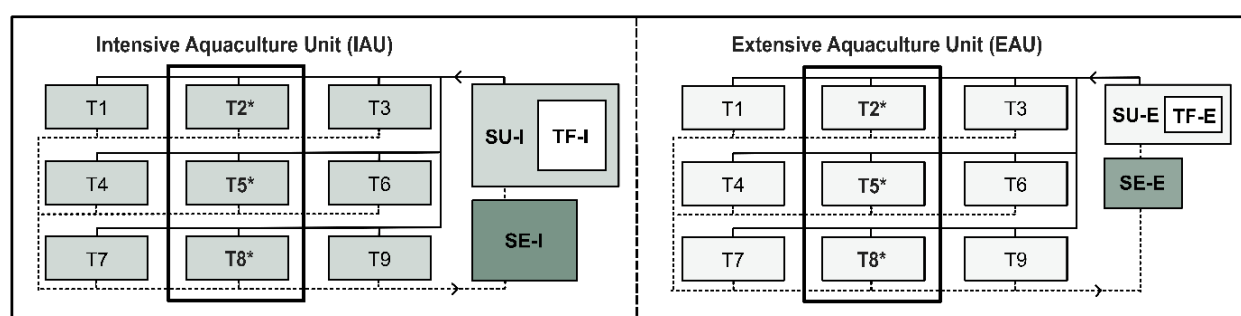


Figure 2.1. Schematic view of the FishGlassHouse fish rearing units. Intensive Aquaculture Unit (IAU) with nine fish tanks (T1-T9), solid separation unit (Sediment: SE-I), and sump (SU-I) with biofilter (Trickling Filter: TF-I); Extensive Aquaculture Unit (EAU) with nine fish tanks (T1-T9), solid separation unit (Sediment: SE-E), and sump (SU-E) with biofilter (Trickling Filter: TF-E). The fishes for the experiment were integrated into a regular staggered production with three weight classes in the IAU and EAU: Juvenile experimental fish (T2*, T5*, T8*); medium weight class (T1, T4, T7); large weight class (T3, T6, T9).

2.2.2. Fish Production and Feeding

The RASs were stocked with African catfish (*Clarias gariepinus*) from a local juvenile breeder (PAL Aquakultur Abtshagen GmbH, Wittenhagen, MV, Germany) and integrated into a staggered production system of an intensive aquaculture unit (IAU) and an extensive aquaculture unit (EAU) (Figure 2.1). The intensive tanks T2, T5, T8 were each stocked with 120 fish/m³ with an average initial length of 17.10 ± 0.51 cm, weight 30.76 ± 2.04 g (3.69 kg/m³), and condition factor of 0.62 ± 0.04. The extensive tanks T2, T5, T8 were each stocked with 33 fish/m³, with an average initial length of 17.10 ± 0.52 cm, weight 30.82 ± 2.06 g (1.01 kg/m³), and condition factor of 0.62 ± 0.04. The juveniles were fed with SPECIAL PRO EF 3.0 mm (Alltech Coppens BV, Leende, The Netherlands) with 48% crude protein, 13% crude fat, 1.3% fibre, 9.0% ash, 1.28% phosphorus. After 28 days, the feed was changed to SPECIAL PRO EF 4.5 mm (Alltech Coppens BV, Leende, The Netherlands) with 42% crude protein, 13% crude fat, 1.5% fibre, 7.6% ash and 1.08% phosphorus. The fish were fed according to the feeding protocol of PAL Anlagenbau GmbH (Abtshagen, Germany) with 80% of the maximum recommended feeding quantity. After each sampling, the new tank masses, average weights, and fish numbers were entered into the system computers, which automatically calculated the new feed rates for each day of the respective period. Initial feeding rates were 4.33 ± 0.02%/biomass (IAU); 4.34 ± 0.02%/biomass (EAU). On day 36, they were 2.48 ± 0.06%/biomass (IAU); 2.43 ± 0.01%/biomass (EAU), on day 68, they were 1.83 ± 0.04%/biomass (IAU); 1.75 ± 0.09%/biomass (EAU), and on day 99, they were 1.59

$\pm 0.09\%$ /biomass (IAU); $1.50 \pm 0.04\%$ /biomass (EAU). The final feed rates were $1.35 \pm 0.14\%$ /biomass (IAU); $1.17 \pm 0.05\%$ /biomass (EAU).

2.2.3. Physicochemical water parameters

The physical and chemical water parameters were measured in the inlet of the sedimenters (SE-I; SE-E, Figure 2.1), where the mixed effluents from the individual fish tanks gathered. The physical water parameters of oxygen saturation (mg/L), oxygen concentration (%), water temperature ($^{\circ}\text{C}$), pH value, conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$), redox potential (mV), and salinity (‰) were measured daily around 13:30 using a HQ40d multimeter (Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Germany). When the pH dropped below 5.5, the water of the sedimenter was exchanged, and 2 kg of hydrated lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) was added to the inlet of the sedimenter. Once a month, water samples were taken and analysed with the Gallery™ Analyzer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) to determine the concentrations of the chemical parameters of ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-) and nitrate (NO_3^-) according to the manufacturer's protocols.

2.2.4. Mathematical and statistical analyses

Fish data were collected over a five-month period. The initial measurements of the juvenile fish were taken on 15 June 2020 (day 1), the intermediate measurements were taken on 20 July (day 36), 21 August (day 68), and 21 September (day 99), and the final measurements were taken on 17 November 2020 (day 155). One day prior to each data collection, no feed was added to the automatic feeders to prevent the animals from regurgitating the feed during handling. During each data acquisition, the fishes were counted, and the length and weight of each fish were taken. Based on these data, the total biomass of the tanks, the feed conversion ratio (FCR, formula 1), the specific growth rate (SGR, formula 2), the condition factor (C, formula 3), the growth per tank in total and percent (G, formula 4), the survival rate (SR, formula 5), and the density function of the normal distribution ($f(x)$, formula 6) for the respective growth stages were determined using the following formulas:

$$\text{FCR} = \text{fish feed quantity (kg)} / \text{weight gain (kg)} \quad (1)$$

$$\text{SGR (\%/day)} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100 \quad (2)$$

with: W_t = final biomass (kg), W_0 = initial biomass (kg), and t = time in days.

$$C = (W \times 100) / L^3 \quad (3)$$

with: W = fish weight (g), and L = fish length (cm).

$$G = \text{Growth fish weight class } x \text{ (\%)} = (F_x - I_x) \times 100 / I_x \quad (4)$$

with: F_x = final weight, fish weight class x , and I_x = initial weight, fish weight class x .

$$\text{SR} = (F_t \times 100) / F_0 \quad (5)$$

With: F_t = final number of fish of the monitored period; F_0 = initial number of fish of the monitored period.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

With: x_i = individual value of fish; \bar{x} = mean value of sample; σ = sample standard deviation.

For better visual comparability of growth performance, a normal distribution was assumed, and the probability densities were transformed for the length (cm), weight (g), and condition factor by using the density function (Formula 6) and Microsoft Excel 2019 (Microsoft, 2019). The density functions of the different cohorts were comparatively juxtaposed. The exact representation of these distributions was analysed and illustrated in boxplots for all measurements. The exact distribution of the final measurement was additionally visualised with histograms without transformation by using the SPSS 27 statistical software package (IBM, 2020).

The following fish growth parameters of the different growth stages were statistically analysed in triplicates by comparison of mean values: fish length (cm), fish weight (g), feed conversion ratio (FCR), specific growth rate (SGR), condition factor (C), and survival rate (SR). Significant differences ($p < 0.05$) were calculated from the means of fish growth and water parameters. To detect significant differences between the IAU and EAU, a *t*-test was used for normally distributed data and the Mann-Whitney-U test for non-parametric data and data with non-equal numbers of samples (*n*, individual fish growth parameters, $p < 0.01$). The calculations were performed using Microsoft Excel 2019 (Microsoft, 2019) and the SPSS 27 statistical software package (IBM, 2020).

The possible value of the harvest and the profit per fish at the time of the last sampling was calculated using the input quantities and average prices for fingerlings (0.20 EUR/fish) and feed (1.1 EUR/kg), as well as the produced quantity and the sales price for whole fish (2.2 EUR/kg). The prices were average numbers from local catfish farms. For simplification, only the costs directly attributable to the production of this batch were included, and the costs not directly attributable to the different batches, such as energy, water, and labour, were neglected.

2.3. Results

2.3.1. Physicochemical water parameters

Most physical and chemical water parameters measured in the inlet of the sedimenter were very similar between both systems (Table 2.1).

Table 2.1. Physicochemical nutrient water parameters (mean \pm SD), measured in the inlets of the sedimenters of the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) during the experimental period of 155 days; different letters represent different groups ($p < 0.05$).

Water parameters	Intensive (IAU)	Extensive (EAU)	p-Value
O ₂ (mg/L)	6.78 \pm 0.43 ^a	6.78 \pm 0.56 ^a	0.544
O ₂ (%)	84.22 \pm 5.29 ^a	84.18 \pm 6.49 ^a	0.570
Temperature (°C)	26.38 \pm 0.49 ^b	26.53 \pm 0.69 ^a	0.001
pH	5.79 \pm 1.10 ^b	6.61 \pm 0.96 ^a	0.001
Salinity (‰)	0.89 \pm 0.32 ^a	0.64 \pm 0.18 ^b	0.001
Conductivity (μ S/cm)	1802.62 \pm 611.75 ^a	1314.84 \pm 341.47 ^b	0.001
Redox Potential (mV)	181.58 \pm 39.63 ^a	172.67 \pm 34.54 ^b	0.042
NO ₃ ⁻ (mg/L)	196.48 \pm 61.44 ^a	257.13 \pm 115.73 ^a	0.252
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.10 \pm 0.06 ^a	0.14 \pm 0.21 ^a	0.589
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.14 \pm 0.08 ^a	0.38 \pm 0.29 ^a	0.063

The dissolved oxygen averaged 6.78 ± 0.43 mg/L (IAU); 6.78 ± 0.56 mg/L (EAU) and the oxygen saturation $84.22 \pm 5.29\%$ (IAU); $84.18 \pm 6.49\%$ (EAU). Temperature was relatively constant at 26.38 ± 0.49 °C (IAU); 26.53 ± 0.69 °C (EAU) and the pH-value averaged 5.79 ± 1.10 (IAU); 6.61 ± 0.96 (EAU). The average salinity was $0.89 \pm 0.32\text{‰}$ (IAU); $0.64 \pm 0.18\text{‰}$ (EAU), conductivity 1802.62 ± 611.75 $\mu\text{S/cm}$ (IAU); 1314.84 ± 341.47 $\mu\text{S/cm}$ (EAU), and redox potential 181.58 ± 39.63 mV (IAU); 172.67 ± 34.54 mV (EAU). The mean concentration of nitrate (NO_3^-) was 196.48 ± 61.44 mg/L (IAU); 257.13 ± 115.73 mg/L (EAU), nitrite (NO_2^-) was 0.10 ± 0.06 mg/L (IAU); 0.14 ± 0.21 mg/L (EAU) and ammonium (NH_4^+) was 0.14 ± 0.08 mg/L (IAU); 0.38 ± 0.29 mg/L (EAU). The development of the chemical nutrient concentrations (mg/L) during the different life stages is illustrated in Figure 2.2.

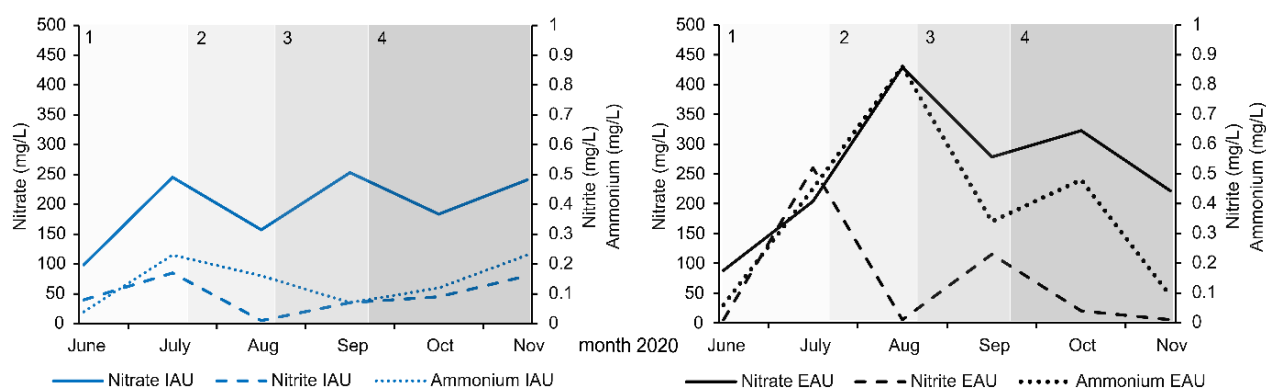


Figure 2.2. Development of the chemical water parameters of nitrate, ammonium, and nitrite in the intensive aquaculture unit (IAU) and extensive aquaculture unit (EAU) during the experimental period of 155 days. The grey shaded blocks 1-4 represent the respective fish life stages: block 1 from day 1-36, block 2 from day 36-68, block 3 from day 68-99, and block 4 from day 99-155.

2.3.2. Fish growth

The growth parameters of the African catfish from the IAU and EAU showed differences during different growth periods. Due to the sorting at the beginning of the experiment, the initial growth values were the same for all parameters except the initial tank mass with 120 same-sized fish per tank in the IAU and 33 in the EAU (Table 2.2 & 2.3).

On day 36, both groups already differed significantly in fish length and condition factor, with the IAU group (25.98 cm) being significantly shorter, 2.2%, than the EAU (26.57 cm) and having a higher condition factor (0.83) than the EAU (0.80). Fish weight was 2.9% lower ($p = 0.082$) in the IAU (145.54 g) than the EAU (149.87 g). Tank mass in the IAU (17.37 kg) was 251% higher than the EAU (4.95 kg), as expected, but with 262% more fish. In the intermediate parameters of the first growth period (day 1-36), the total growth per tank (kg) in the IAU (13.68 kg) was 248% higher than the EAU (3.93 kg). Besides this, there were no significant differences in this period, although in the IAU, the percentage growth per tank, SGR, and survival rate had lower values, and the FCR was higher than in the EAU.

Table 2.2. Comparison of individual fish growth parameters (mean \pm SD, n) between the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) on the respective sampling days from day 1 (initial, June) until day 155 (final, November) of fish length (cm), fish weight (g), and condition factor (C); different letters represent different groups ($p < 0.01$).

Parameters	IAU	n	EAU	n	p-Value
Initial parameters day 1 (June)					
Fish length (cm)	17.10 \pm 0.51 ^a	360	17.13 \pm 0.50 ^a	99	0.645
Fish weight (g)	30.76 \pm 2.04 ^a	360	30.75 \pm 1.84 ^a	99	0.933
Condition factor (C)	0.62 \pm 0.04 ^a	360	0.61 \pm 0.04 ^a	99	0.500
Parameters day 36 (July)					
Fish length (cm)	25.98 \pm 1.52 ^b	358	26.57 \pm 1.38 ^a	99	0.001
Fish weight (g)	145.54 \pm 24.30 ^a	358	149.87 \pm 22.04 ^a	99	0.082
Condition factor (C)	0.83 \pm 0.08 ^a	358	0.80 \pm 0.06 ^b	99	0.001
Parameters day 68 (Aug)					
Fish length (cm)	32.96 \pm 2.46 ^b	357	33.97 \pm 1.89 ^a	99	0.001
Fish weight (g)	309.76 \pm 81.83 ^a	357	317.94 \pm 62.21 ^a	99	0.250
Condition factor (C)	0.84 \pm 0.09 ^a	357	0.80 \pm 0.07 ^b	99	0.001
Parameters day 99 (Sep)					
Fish length (cm)	38.64 \pm 3.50 ^a	357	39.47 \pm 3.29 ^a	99	0.016
Fish weight (g)	506.95 \pm 166.78 ^a	357	539.46 \pm 141.36 ^a	99	0.030
Condition factor (C)	0.85 \pm 0.13 ^a	357	0.87 \pm 0.16 ^a	99	0.879
Parameters day 155 (Nov)					
Fish length (cm)	45.97 \pm 4.72 ^b	355	47.99 \pm 4.09 ^a	98	0.001
Fish weight (g)	864.77 \pm 319.18 ^b	355	943.06 \pm 289.47 ^a	98	0.008
Condition factor (C)	0.85 \pm 0.11 ^a	355	0.83 \pm 0.08 ^a	98	0.033

On day 68, the difference in fish length further increased, and the fish in the IAU (32.96 cm) were on average 3.2% smaller than in the EAU (33.97 cm) and again had a higher condition factor (0.84) than the EAU (0.80). The fish weights in the IAU (309.76 g) and the EAU (317.94 g) did not differ significantly ($p = 0.250$). The tank mass in the IAU (36.86 kg) was 242% higher than in the EAU (10.49 kg), although on average, 263% more fish were in the tank. For the period parameters (day 36-68), the increase in kg in the IAU (19.49 kg) was 251% higher than in the EAU (5.55 kg). The other parameters during this period showed no significance, and some were very similar, such as the percentage growth per tank (IAU: 52.88%; EAU: 52.85%) or were even identical in the case of the SGR (IAU and EAU: 2.35 %/day).



Figure 2.3. Three fish of the same age from IAU on day 68 (August) with visible growth differences.

Table 2.3. Comparison of fish growth parameters (mean \pm SD, n = 3) calculated by tank biomasses between the intensive aquaculture unit (IAU) and the extensive aquaculture unit (EAU) on the respective sampling days from day 1 (initial, June) until day 155 (final, November) with total tank biomass development from day 1 to day 155 of tank mass (kg), growth per tank (kg, %), feed per tank (kg), feed conversion ratio (FCR), specific growth rate (SGR %/d) and survival rate (%); different letters represent different groups (p < 0.05).

Parameters	IAU	EAU	p-Value
Intermediate parameters (day 1-36, June-July)			
Tank mass (kg) day 1	3.69 \pm 0.02 ^a	1.01 \pm 0.01 ^b	0.001
Tank mass (kg) day 36	17.37 \pm 0.41 ^a	4.95 \pm 0.02 ^b	0.049
Growth per tank (kg)	13.68 \pm 0.42 ^a	3.93 \pm 0.02 ^b	0.001
Growth per tank (%)	370.57 \pm 12.98 ^a	387.31 \pm 3.36 ^a	0.097
Feed per tank (kg)	9.39 \pm 0.12 ^a	2.62 \pm 0.04 ^b	0.001
FCR	0.69 \pm 0.02 ^a	0.67 \pm 0.01 ^a	0.400
SGR (%/day)	4.42 \pm 0.08 ^a	4.52 \pm 0.02 ^a	0.098
Survival rate (%)	99.44 \pm 0.48 ^a	100.00 \pm 0.00 ^a	0.200
Intermediate parameters (day 36-68, July-August)			
Tank mass (kg) day 68	36.86 \pm 0.86 ^a	10.49 \pm 0.21 ^b	0.001
Growth per tank (kg)	19.49 \pm 0.66 ^a	5.55 \pm 0.23 ^b	0.001
Growth per tank (%)	112.26 \pm 4.04 ^a	112.16 \pm 4.88 ^a	0.979
Feed per tank (kg)	17.10 \pm 0.06 ^a	4.76 \pm 0.03 ^b	0.046
FCR	0.88 \pm 0.03 ^a	0.86 \pm 0.04 ^a	0.517
SGR (%/day)	2.35 \pm 0.06 ^a	2.35 \pm 0.07 ^a	0.976
Survival rate (%)	99.72 \pm 0.48 ^a	100.00 \pm 0.00 ^a	0.700
Intermediate parameters (day 68-99, August-September)			
Tank mass (kg) day 99	60.33 \pm 2.94 ^a	17.80 \pm 0.57 ^b	0.001
Growth per tank (kg)	23.47 \pm 3.62 ^a	7.31 \pm 0.37 ^b	0.002
Growth per tank (%)	63.81 \pm 11.24 ^a	69.65 \pm 2.14 ^a	0.427
Feed per tank (kg)	23.23 \pm 0.43 ^a	6.52 \pm 0.17 ^b	0.001
FCR	1.01 \pm 0.16 ^a	0.89 \pm 0.03 ^a	0.296
SGR (%/day)	1.59 \pm 0.22 ^a	1.70 \pm 0.04 ^a	0.411
Survival rate (%)	100.00 \pm 0.00 ^a	100.00 \pm 0.00 ^a	1.000
Intermediate parameters (day 99-155, September-November)			
Tank mass (kg) day 155	102.33 \pm 10.08 ^a	30.81 \pm 1.47 ^b	0.049
Growth per tank (kg)	42.00 \pm 7.73 ^a	13.00 \pm 1.12 ^b	0.021
Growth per tank (%)	69.43 \pm 10.88 ^a	73.04 \pm 5.68 ^a	0.637
Feed per tank (kg)	59.40 \pm 0.53 ^a	14.36 \pm 0.43 ^b	0.001
FCR	1.45 \pm 0.29 ^a	1.11 \pm 0.12 ^a	0.134
SGR (%/day)	0.92 \pm 0.11 ^a	0.96 \pm 0.06 ^a	0.626
Survival rate (%)	99.44 \pm 0.96 ^a	98.99 \pm 1.75 ^a	1.000
Total parameters (day 1-155, June-November)			
Growth per tank (kg)	98.64 \pm 10.06 ^a	29.79 \pm 1.47 ^b	0.049
Growth per tank (%)	2671.52 \pm 260.21 ^a	2935.66 \pm 151.26 ^a	0.400
Feed per tank (kg)	109.12 \pm 0.57 ^a	28.25 \pm 0.51 ^b	0.001
FCR	1.11 \pm 0.12 ^a	0.95 \pm 0.05 ^a	0.097
SGR (%/day)	2.14 \pm 0.06 ^a	2.20 \pm 0.03 ^a	0.400
Survival rate (%)	98.61 \pm 0.96 ^a	98.99 \pm 1.75 ^a	0.700

On day 99, the fish from the IAU (38.64 cm) were 2.1% shorter than in the EAU (39.47 cm), and the fish in the EAU (539.46 g) were on average 32.51 g (6.4%) heavier than in the IAU (506.95 g). The

significances ($p < 0.01$), also for the condition factor (IAU: 0.85; EAU: 0.87), were no longer present. The tank mass in the IAU (60.33 kg) was 239% higher than in the EAU (17.80 kg) with 261% more fish. During the third period (day 68-99), the mass gain per tank (kg) was 221% higher in the IAU (23.47 kg) than in the EAU (7.31 kg), but in terms of percentage growth per tank, the systems did not differ significantly during this period (IAU: 63.81%; EAU 69.65%; $p = 0.427$). FCR in the IAU (1.01) was significantly higher than the EAU (0.89) and the SGR in the IAU (1.59%/day) was lower than in the EAU (1.70%/day), but without statistical significance. In both systems, all fish survived during this period.

On day 155 at the end of the experiment, the length of the fish in the IAU (45.97 cm) was more than 2 cm or 4.4% smaller than in the EAU (47.99 cm) ($p = 0.001$), and the final fish weight in the IAU (864.77 g) was 8.3% lighter than the EAU (943.06 g) ($p = 0.008$). Thus, the condition factor in the IAU (0.85) was insignificantly higher than in the EAU (0.83). The final tank mass in the IAU (102.33 kg) was 232% higher than in the EAU (30.81 kg) with an average of 262% more fish. In the final growth phase (day 99-155), growth per tank (kg) was 223% higher in the IAU (42.00 kg) than in the EAU (13.00 kg), with no significant difference in percentage growth (IAU: 69.43%; EAU: 73.04%; $p = 0.637$). Similarly, no significance was found for the parameters FCR, SGR, and survival rate for this period, although the FCR in the IAU (1.45) was considerably higher than in the EAU (1.11) ($p = 0.134$), and SGR in the IAU (0.92%/day) was lower than in the EAU (0.96%/day) ($p = 0.626$).

During the entire experiment (day 1-155), the total growth per tank in the IAU (98.64 kg) was 231% higher than the EAU (29.79 kg) with 262% more fish inside the tank. Total growth (2671.52%) and SGR (2.14%/day) were insignificantly lower in the IAU than the EAU (2935.66% and 2.20%/day), while FCR was insignificantly higher in the IAU (1.11) than the EAU (0.95). The survival rate was very similar in both systems over the total period (IAU: 98.61%; EAU: 98.99%).

2.3.3. Distribution of fish growth

In the IAU, fish length was significantly lower than in the EAU on day 36, 68 and 155, fish weight on the last day, and condition factor on day 36 and 68 for $p < 0.01$. The box plots (Figure 2.4) show that fish length (cm) and weight (g) in the IAU had larger ranges and variances and more extreme outliers than in the EAU over the entire period. The only exception is fish weight at day 36, where the distribution is nearly identical.

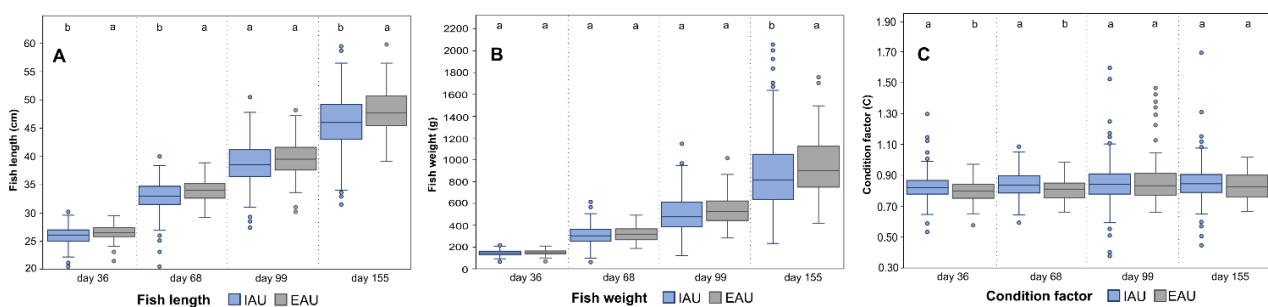


Figure 2.4. Development of A) fish length (cm), B) fish weight (g) and C) condition factor (C) of the IAU (blue) and EAU (grey) of day 36 (July), day 68 (Aug), day 99 (Sep), and the final day 155 (Nov). Different letters represent different groups ($p < 0.01$).

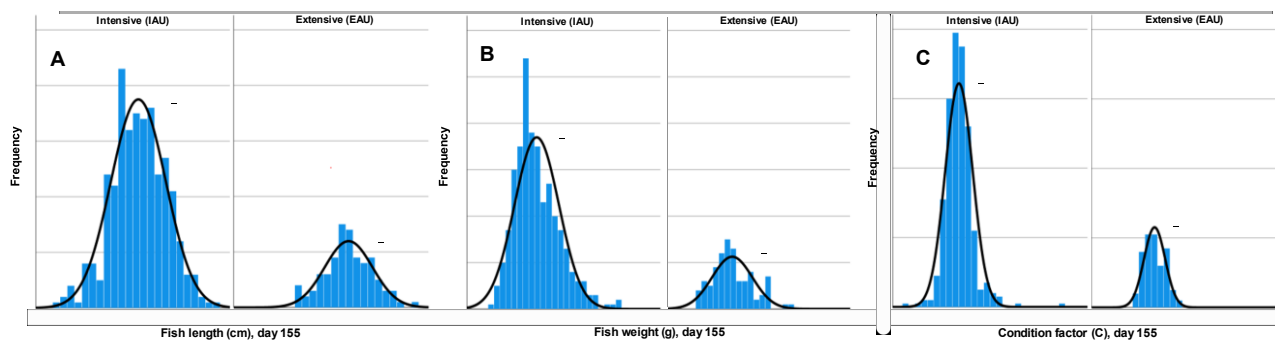


Figure 2.5. Growth performance of *C. gariepinus* A) fish length, B) fish weight, and C) condition factor (C) of the intensive (IAU) and extensive (EAU) fish production units at the final day 155. IAU, $n = 355$; EAU, $n = 98$.

In the distributions of length, weight, and condition factor, the IAU was normally distributed ($p \leq 0.05$) in 4 out of 12 measured data sets, whereas the EAU had a normal distribution ($p \leq 0.05$) in 9 out of 12 cases. The fish length in the IAU and EAU was not normally distributed, skewing slightly left at the beginning (day 36), and became normally distributed towards the end (day 155) (Figure 2.5). In contrast, fish weights in the IAU and EAU were normally distributed at the beginning (day 36) and skewed right on day 155, visible from the steep rise of the histograms on the left and the longer tail on the right (Figure 2.5). Regarding the condition factor (C), there were many outliers in both directions in the IAU during the last two measurements, but especially in the extreme upper values, i.e., above-average weights in relation to the body length, resulting in right-skewed distributions (Figures 2.4 & 2.5). In the EAU, it was noticeable that a strongly right-skewed distribution occurred exclusively on day 99 due to many upper outliers (Figure 2.4), but this anomaly disappeared at the end (Figures 2.4 & 2.5).

The transferred data of the length and weight distributions into the density functions of normal distributions are visualised in Figure 2.6. The figure shows that the different cohorts had increasing variances with increasing age, meaning increasingly heterogeneous growth. The effect of increasing variance was more evident in the IAU than in the EAU, as can be seen from the spread of the graph. In addition, the IAU had lower mean values in all four measurements and, thus, was shifted further to the left.

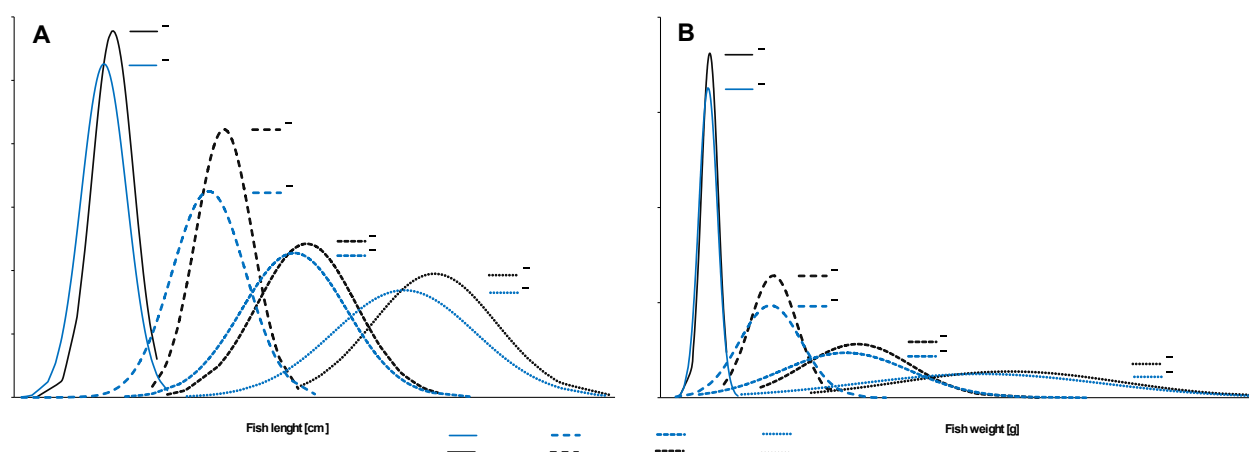


Figure 2.6. Transfer of the A) fish length (cm) and B) weight (g) data into density functions of the normal distribution. The graphics visualise the length and weight development of the IAU (blue lines) and EAU (black lines) on day 36 of the experiment in July, day 68 in August, day 99 in September, and the final day 155 in November.

2.3.4. Value calculation of possible harvest

Net profits were directly related to stocking densities. The highest total profits were obtained in the IAU (81.10 EUR) per tank and were 169% higher than in the EAU (30.12 EUR). However, the profit per stocked fish was 25% lower in the IAU (0.68 EUR) than in the EAU (0.91 EUR).

Table 2.4. Economic information for African catfish reared for 155 days in the intensive aquaculture unit (IAU) and extensive aquaculture unit (EAU) in 1 m³ tanks (n = 3). The values show the possible harvest per tank at that time.

Final parameters day 155	IAU	EAU
No. fish stocked	120	33
No. fish harvest	118.33 ± 0.94	32.67 ± 0.47
Harvest (kg)	102.33 ± 10.08	30.81 ± 1.47
Feed used (kg)	109.12 ± 0.46	28.25 ± 0.42
Fingerling cost (0.2 EUR/fish)	24	6.6
Feed cost (1.1 EUR/kg)	120.03	31.06
Total cost (EUR)	144.03	37.66
Tank value (2.2 EUR/kg)	225.13	67.78
Net profit (EUR)	81.10	30.12
Net profit per stocked fish (EUR)	0.68	0.91

2.4. Discussion

2.4.1. Water quality

Overall, the physicochemical water parameters in the IAU and EAU were in the range for industrial *C. gariepinus* fish production. Mean oxygen concentrations and saturations were similar and had good values in the IAU (6.78 ± 0.43 mg/L; 84.22 ± 5.29 %) and EAU (6.78 ± 0.56 mg/L; 84.18 ± 6.49 %; Table 2.2). These concentrations above 4 mg/L support African catfish in breathing with their gills underwater (Oellermann, 1995), which is desirable, since the repeated surfacing of air-breathing fish can cause a considerable loss of energy, which could have otherwise been channelled into fish production (Vivekanandan and Pandian, 1977). Since the water samples were taken from the sedimenter inflow as merged outflows of the tanks, the samples represented the water quality with the lowest oxygen levels in which the fish lived. The average water temperatures in the IAU (26.38 ± 0.49 °C) and the EAU (26.53 ± 0.69 °C) were also very similar and not affected by sudden fluctuations. Thus, the temperature in both systems was in the optimal range of 26–28 °C for rearing African catfish (Bregnballe, 2010; Britz and Hecht, 1987; Ogunji and Awoke, 2017). The average pH in the IAU (5.79 ± 1.10) was below the pH of the EAU (6.61 ± 0.96), as is usual for intensive RAS. Nevertheless, both groups were, on average, in the optimal range of 5.5–7 (Fleuren, 2008; FishBase, 2020). Even if the pH in the IAU fell below the optimal values in the short term, the daily measurement of the values and the countermeasures of liming and water changes meant that the fish were never outside the optimal values in the long term, and negative effects can, therefore, not be assumed (Wendelaar Bonga, 1997; Huntingford et al., 2006). Due to the higher nutrient inputs, the salinity and conductivity of the IAU (0.89 ± 0.32‰; 1802.62 ± 611.75 µS/cm) were above the values of the EAU (0.64 ± 0.18‰; 1314.84 ± 341.47 µS/cm), but both were far below the recommended maximum salinity value of 7.5‰ (Britz and Hecht, 1989). A continuous increase in these values was measured in both systems. On the day of sampling, the tanks were emptied, and the values dropped abruptly due to the high water exchange. The

average redox potential in the IAU (181.58 ± 39.63 mV) and the EAU (172.67 ± 34.54 mV) was also below the recommended maximum of 300 mV (Lekang, 2020).

The nitrate concentration in the IAU (196.48 ± 61.44 mg/L) was, on average, below that of the EAU (257.13 ± 115.73 mg/L) and not significantly different. In principle, nitrate is considered harmless to African catfish at levels below 1000 mg/L (Dai et al., 2011). The higher nitrogen concentrations in the EAU can be explained by the irregular water exchange, which resulted in higher nutrient accumulation during sampling than in the IAU. The nitrate value was classified as uncritical at all times. The nitrite concentration is considered to be of higher concern, as it can cause reduced feed intake and growth if it permanently exceeds 0.6 mg/L (Roques et al., 2013). The average nitrite values from the IAU (0.10 ± 0.06 mg/L) and the EAU (0.14 ± 0.21 mg/L) were also classified as harmless. The ammonium values in the IAU (0.14 ± 0.08 mg/L) were also below the values in the EAU (0.38 ± 0.29 mg/L). Depending on temperature and pH, ammonium can appear as highly toxic ammonia. The higher the pH, the higher the amount of ammonia in the water, which, for the African catfish, should not exceed 24 μ M (0.34 mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$ or 0.41 mg $\text{NH}_3\text{/L}$) (Schram et al., 2010). At a temperature of 27 °C and a pH in the optimal range of 5.5-7, the critical ammonia (NH_3) limits would be exceeded at ammonium (NH_4) concentrations of 2098 mg/L (pH 5.5) and 67 mg/L (pH 7), which is far higher than all measurements in this experiment. The chemical water values of this experiment indicated optimal biofilter nitrification performance. Because the physicochemical water parameters were mostly within the optimal range or below critical levels, growth differences influenced by adverse water quality can be excluded.

2.4.2. Growth and Distribution

The growth distributions and economics of African catfish were investigated during five different periods over a total of 155 days. Better growth was observed in extensively farmed catfish. The fish from the IAU were significantly smaller than the EAU on day 36, 68, and smaller and lighter on day 155 ($p < 0.01$). No significances were detected in the five periods for the intermediate parameters of growth per tank (%), FCR, SGR (%/d), and survival rate (%) ($p < 0.05$). The extensively farmed fish showed more normally distributed values, while the IAU distributions were more often skewed, and two-sided extreme outliers were more common.

Day 36: In the second measurement (July), the fish from the IAU (25.98 cm) were already 2.2% shorter than the EAU (26.57 cm), and with a C-factor of 0.83, they had a stockier appearance than the fish from the EAU (0.80) (Table 2.2). The FCR (IAU 0.69; EAU 0.67) and SGR (IAU 4.42; EAU 4.52) were both in good ranges and did not differ significantly (Table 2.3). Another striking observation was the high survival rate of juvenile fish in the first period (day 1-36) in both systems (IAU 99.44%; EAU 100%). The findings are consistent with those of a study where 10 g fingerlings grew to a size of about 90 g (FCR 0.59-0.65; SGR 4.9-5.1), and a similar mortality of about 2.5% was found under all stocking densities (van de Nieuwegiessen et al., 2008). The problem of high mortality, which is primarily caused by cannibalism in juvenile fish (8 mm - 80 mm) and high stocking densities (Hecht and Appelbaum, 1988; Kaiser et al., 1995), ceases to occur in catfish from 10-27 cm and is not exacerbated by high stocking densities. Also noticeable was the large range of the condition factor ($0.53 \leq C \leq 1.30$) in the IAU in contrast to the EAU ($0.58 \leq C \leq 0.97$) (Figure 2.4). High stocking densities seem to amplify the effect of the condition factor, with extreme outliers in both directions.

Day 68: On the third date of data acquisition (Aug), the different growth rates became more evident. The fish in the IAU (32.96 cm) were already 3% smaller ($p < 0.001$) than the EAU (33.97 cm) and again had a higher condition factor (0.84) than the EAU (0.80), indicating a longer and leaner body shape in the EAU (Table 2.2). FCR (IAU 0.88; EAU 0.86), SGR (IAU 2.35 %/d; EAU 2.35%/d), and survival rate (IAU 99.72; EAU 100.00%) remained in very good ranges and without significant differences (Table 2.3). This is

consistent with the results of a 28-day experiment and five stocking densities (67, 133, 267, 533, 1067 fish/m³), where African catfish (102.1 ± 3.49 g) showed no significant differences in SGR, FCR, and mortality, but also in weight (van de Nieuwegiessen et al., 2009). In another experiment, where juveniles (32 g) were reared for eight weeks in ponds at four stocking densities (50, 100, 150, 200 fish/m³), growth rate and mortality were also not significantly affected by stocking densities, but final weight was negatively density-dependent as in the present experiment (Hengsawat et al., 1997). In a 60-day stocking density experiment with *C. gariepinus* (29.77-31.22 g), the lowest stocking density (35 kg/m³) resulted in the highest final weight (100.94 g), best FCR (1.09) and lowest mortality (3.69%) compared to the highest stocking density (125 kg/m³; 82.87 g; FCR 1.18; 5.40%) (Wang et al., 2013). Since the fish from the present experiment had an almost identical initial weight (IAU 30.76 g; EAU 30.75 g) and weighed more than three times as much after 68 days, it appears obvious that feed limitation has a strong influence on stocking density experiments. As this is the only study that found significant differences in weight, FCR, and mortality for this fish size class, it is evident that successful production and studies at high stocking densities are only possible without feed limitation and with high feeding rates to ensure efficient feed allocation. The distribution of day 68 showed that the extreme outliers from the IAU condition factor of day 36 were no longer present, i.e., there was no longer an abnormally large number of extreme body shapes (Figure 2.3). The fact that the survival rate of the IAU remained very high (99.72%) demonstrates that unnatural weight/length ratios can be normalised and do not have a negative effect on mortality.

Day 99: In the fourth sampling (Sep), fish were 2.1% smaller and 6.4% lighter (38.64 cm; 506.95 g) in the IAU than the EAU (39.47 cm; 539.46 g), but without significance for $p < 0.01$. In the EAU, there was a significant increase in condition factor (0.87) compared to day 68 (0.80) (Table 2.2). Again, FCR (IAU 1.01; EAU 0.89) and SGR (IAU 1.59 %/day; EAU 1.70 %/day) were better in the EAU, but still not significantly (Table 2.3). The survival rate was 100% in both systems. In a feeding experiment with *C. gariepinus* (365 g), SGRs of 0.60%/d were described for a 38.7% protein diet, and a 31.3% protein diet resulted in an SGR of 0.40%/d (Degani et al., 1988). This showed that SGR and, thus, the growth during the present experiment were in a good range for this size class. In an aquaponic experiment with catfish (275 g), in intensive (140 fish/m³) and extensive culture (35 fish/m³), after 156 days, FCR (IAU 0.94; EAU 0.96), SGR (IAU 1.09 %/day; EAU 1.07 %/day), and final weight (IAU 1458.8 g; EAU 1526.6 g) were found to be not significant, with survival rates significantly lower in the IAU (89.8%) than the EAU (96.2%) (Knaus et al., 2020b), but significantly lower in both cases than in this experiment. For adult *C. gariepinus* (480.23 g), an FCR of 1 was obtained at a low stocking density of 6.72 kg/m³ (Palm et al., 2014a), which corresponds to the FCR from the IAU of this experiment. In a decoupled aquaponics experiment in the same experimental facility under intensive culture (max. 140 fish/m³) with *C. gariepinus* (350 g) after 70 days with previous grading and a different feed (Aller Aqua Float, 4.5 mm, Aller Aqua, Germany), an FCR of 0.84 was achieved (Knaus et al., 2020a). This was significantly better than the IAU in this experiment and demonstrates again that the results of stocking density experiments are highly dependent on other factors such as fish size distribution (heterogeneity) or feed ingredients. The distribution of the condition factor of the EAU had many strong outliers upwards or was strongly right-skewed (Figure 2.4). The fact that all extreme outliers ($1.22 \leq C \leq 1.46$) of the EAU came from one tank only, which also contained the fish with the lowest condition factor, indicates that the increased feed intake of some fish suppressed the feed intake of other fish. In the IAU, there were strong outliers in both directions. These two facts might indicate that increased feeding by some fish may increase feed competition and suppress feed intake by others. This circumstance might have been additionally favoured by the punctually dispersing feeders of this experiment. Future studies must verify whether a better feed distribution method can support a more homogeneous fish growth (cet. par.).

Day 155: At the end of the experiment (Nov), the fish from the IAU were significantly (4.4%) shorter (45.97 cm) and 8.3% lighter (864.77 g) than the EAU (47.99 cm; 943.06 g) (Table 2.2). Again, no significant differences were found for the condition factor and the intermediate parameters FCR and SGR. There is little research for this catfish size class. In a stocking density experiment with graded catfish (1044.6 ± 31.6 g), no significant differences were found in four different stocking densities (67, 155, 244, and 333 fish/m³) after 28 days, but FCRs from 0.81-0.9 and a mortality of max. 0.5 were found (van de Nieuwegiessen et al., 2009). The mortality was a counterpoint to the excellent survival rate (IAU 99.44%; EAU 98.99%), but the FCRs from this study were significantly higher (IAU 1.45; EAU 1.11). This could be an indication of inefficient feed conversion with heterogeneous fish size distribution. The abnormality of the condition factor on day 99 with the extreme upper outliers in the EAU returned to normal distribution on day 155, whereas skewness and outliers in the IAU further increased (Figure 2.4 & 2.5). This fact, together with the consistently lower variances in the EAU in weight and length, indicate that breeding under extensive conditions is considerably more homogeneous.

Over the entire period (day 1-155), no significances were observed for the intermediate parameters except for the quantitative increase per tank (kg) (Table 2.3). Nevertheless, both systems showed an excellent survival rate (IAU 98.61%; EAU 98.99%). The FCR was found to increase with increasing fish size throughout the period, as expected. It was also evident that the initially good FCR resulted in an increasing deviation from normal values with increasing heterogeneity. For example, in previous studies with staggered production and also 80% of the recommended feeding, productive FCRs of 0.97; 0.87; 0.72 (Pasch, 2018), and 0.91; 0.84; 0.74 (Knaus et al., 2020a) were found for large (ca. 1 kg), medium (< 500 g), and small sized catfish (< 50 g), respectively. FCRs in the first period (IAU 0.69; EAU 0.67) from the homogeneous fish (IAU 30.76 ± 2.04 g; EAU 30.75 ± 1.84 g) were in a similar range, while FCRs in the last period (IAU 1.45; EAU 1.11) from the highly heterogeneously distributed catfish (IAU 506.95 ± 166.78 g; EAU 539.46 ± 141.36 g) would have resulted in inefficient production. A study with African catfish showed that homogeneous weight groups exhibit less aggressive behaviour and lower cortisol levels than heterogeneous groups (Martins et al., 2006). Chronic stress can be considered as one of the reasons for the decreasing growth parameters with increasing heterogeneity since it has been shown to reduce growth in fish (Barton, 2002; Conte, 2004; Huntingford et al., 2006).

In a 60-day experiment with juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*), inter-individual variation in fish mass and feed intake was found to be positively correlated with stocking density, whereas FCR, SGR, and mass gain deteriorated with increasing stocking densities (Azaza et al., 2013). The growth heterogeneity also increased with time, similar to the present experiment. In order to prevent smaller size and reduced weight, unfavourable growth distributions and a subsequent deterioration of FCR, grading of the African catfish before a size of 300 g is therefore considered indispensable. Farming without sorting would only make sense under extensive farming conditions and availability of enough feed, e.g. in pond culture with hand slaughtering to prevent unnecessary slaughter waste. The results have shown that catfish growth is not only dependent on the different stocking densities, but is multivariately dependent on other factors such as fish size and heterogeneity, feed availability, etc. In future studies, the different growth stages from intensive and extensive catfish farming could be divided into graded homogeneous groups and unsorted heterogeneous groups to further explore the effects of stocking densities and heterogeneous fish growth to determine the most economic grading times.

2.4.3. Value calculation of possible harvest

The high stocking density (IAU) produced a final tank mass of 102.33 kg after 155 days and thus a 169% higher net profit (81.10 EUR/tank) compared to the EAU, where it was only 30.81 kg (30.12 EUR/tank) (Table 2.4). That higher stocking densities led to higher biomass increases (harvest) is self-explanatory and has already been confirmed several times for catfish (Hogendoorn and Koops, 1983; Islam et al., 2006; Oké and Goosen, 2019). The IAU had a higher growth in volume in all periods, but the percentage growth was either equally good or significantly better in the EAU, which could be explained by the higher average fish weights. These circumstances led to the net profit per fish used being 25% lower in the IAU (0.68 EUR) than in the EAU (0.91 EUR). This is consistent with the results of a stocking density experiment in earth ponds, where the highest stocking densities (10 fish/m²) resulted in the highest net return, but medium stocking densities (7 fish/m²) had the highest profitability index (net return per total production cost) (Oké and Goosen, 2019). A most recent model study on the profitability of African catfish RAS confirmed these findings, that increasing stocking densities from intensive (450 kg/m³) to superintensive (550 kg/m³) also led to higher variable costs and a simultaneous increase in profitability (Pasch and Palm, 2021). However, as all costs, especially fixed costs, were included in that study, the total production costs per unit reduced with increasing stocking densities, which in turn increased the returns per unit. Our results demonstrate that intensive catfish aquaculture maximises yields, but requires higher resource input per production unit. In areas where input resources (feed, fingerlings, water) are scarce and/or expensive, lower or slightly reduced stocking densities appear favourable in order to produce most resources efficiently. For a precise statement on the total production costs, fixed costs (administration, management, depreciation, insurance, maintenance, etc.), which are difficult to determine in research facilities, must be also taken into account. In contrast to variable costs, fixed costs remain the same as production increases, which makes the IAU more attractive. To date African catfish is kept under large stocking density ranges, from 5 fish/m² in ponds to over 500 kg/m³ in tanks. We suggest the development of a nomenclature for the different intensity ranges in future in order to reach better comparability, under consideration of different grading effects on growth and profitability

2.5. Conclusions

African catfish showed different growth in intensive (IAU) and extensive (EAU) aquaculture units in the different lifetime stages. The fish in the IAU were significantly smaller than in the EAU from the second measurement (day 36) until the end of the experiment (day 155) and were also lighter in the last two measurements (days 99 and 155). In the final measurement, the length in the IAU (45.97 cm) was 4.4% smaller than in the EAU (47.99 cm), and the final fish weight in the IAU (864.77 g) was even 8.3% lighter than the EAU (943.06 g). No significances were found for the intermediate parameters of SGR (%/d) and FCR in all five periods, which accords with other studies, where sufficiently high feeding rates were applied. This and other studies showed that results of stocking density experiments are highly dependent on other factors such as fish age and size distribution (heterogeneity), feeding method and quantity, feed ingredients, etc. The more homogeneous the distributions were, the better the FCR and SGR performed; the more heterogeneous the fish became over the run of the experiment, the more the FCR and SGR deviated from the norm. The survival rate was consistently high in both systems (> 98%) and was not influenced by stocking densities or fish heterogeneity.

The distributions of length (cm), weight (g), and condition factor were highly dependent on stocking density. The intensively farmed fish (IAU) distributions were more often skewed, and two-sided extreme outliers were more common, while the EAU showed normally distributed values more frequently. This

was particularly visible in the condition factor, where the IAU had many extreme deviations. The more pronounced heterogeneity in the IAU also resulted in smaller and lighter fish. The aim of aquaculture should be the production of batches with normally distributed fishes and low variance. This is more likely through extensive breeding and must be achieved in intensive breeding through grading.

The economic analysis showed that net profit per tank in the IAU (81.10 EUR) was 169% higher than in the EAU (30.12 EUR) with 264% higher stocking. The profit per fish in the IAU (0.68 EUR) was thus 25% lower than in the EAU (0.91 EUR). Therefore, for maximum yield, intensive stocking densities should be applied, and extensive farming of African catfish is recommended when resources are limited. Future studies should determine the optimal grading times and sizes for maximising homogeneous growth, and detailed economic analyses should be undertaken, including the impact of various costs of a catfish farm for efficient consulting.

3. Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, Raft, and Grow Pipes with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics ⁶

Abstract

Basil (*Ocimum basilicum*) was cultivated in Rostock, Northern Germany, in a decoupled aquaponic system with African catfish (*Clarias gariepinus*) under intensive rearing conditions by using three hydroponic components, the dynamic root floating technique (DRF), the raft technique, and grow pipes. A 25% of the recommended feed input still allowed African catfish growth and provided adequate nitrogen and calcium levels in the process water. After 36 days, the plants were examined with respect to 16 different growth parameters. DRF performed significantly better than raft and/or grow pipes in 11 parameters. Total weight of basil was significantly higher in DRF (107.70 ± 34.03 g) compared with raft (82.02 ± 22.74 g) and grow pipes (77.86 ± 23.93 g). The economically important leaf biomass was significantly higher in wet and dry weight under DRF cultivation (45.36 ± 13.53 g; 4.96 ± 1.57 g) compared with raft (34.94 ± 9.44 g; 3.74 ± 1.04 g) and grow pipes (32.74 ± 9.84 g; 3.75 ± 1.22 g). Two main factors limited plant growth: an unbalanced nutrient concentration ratio and high water temperatures with an average of 28 °C (max 34.4 °C), which resulted in reduced root activity in raft and grow pipes. DRF was able to maintain root activity through the 5 cm air space between the shoots and the nutrient solution and thus produced significantly more biomass. This suggests DRF to be used for basil aquaponics under glass house conditions with high-temperature scenarios. Future studies are needed to optimize nutrient loads and examine systems with the plant roots exposed to air (Aeroponics).

Keywords

Basil; African catfish; Dynamic root floating technique (DRF); Floating raft; Deep water culture; Grow pipes; Aquaponics; Hydroponics

⁶ Dieser Artikel wurde publiziert unter: Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., Knaus, U. (2021) Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, Raft, and Grow Pipes with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics. *AgriEngineering*; 3(1):92-109.

3.1. Introduction

Aquaponics is a scientific field of increasing relevance due to the possibility of sustainable, resource-friendly food production (Palm et al., 2018a). However, there are still many open questions and research areas in this young discipline, such as the growth potential of different crops in various subsystems (Maucieri et al., 2019). Plant species such as basil (*Ocimum basilicum*) and spearmint (*Mentha spicata*) already show a high potential for aquaponic cultivation, and these species are economically important and should, therefore, be further investigated in aquaponics in combination with different fish species (Love et al., 2015; Engle, 2016; Espinosa-Moya et al., 2018).

Especially suitable for aquaponics are plants with a high growth potential, market demand, and price, such as culinary herbs (Racoky, 2012), while at the same time having only moderate space requirements. Plant production in aquaponics was dominated to 81% by basil (*Ocimum basilicum*) and has therefore been the most cultivated herb (Love et al., 2015). Basil develops a distinctive and unmistakable scent via oil glands on the leaves and is considered one of the most versatile herbs (Chalchat & Özcan, 2008). As a medicinal herb or as an important ingredient in the kitchen, basil has become, dried or fresh, a part of almost all cultures (Nguyen et al., 2010; Al-Maskari et al., 2012; Ahmed et al., 2014). The demand for basil is very high among aquaponics and hydroponics producer groups (Succop & Newman, 2004). As basil is particularly suitable for soilless cultivation, it has therefore been used in various aquaponics and hydroponics experiments (Saha et al., 2016; Ferrarezi & Bailey, 2019; Knaus et al., 2020a). Basil can produce 1.8 kg per m² under aquaponic production, whereas basil in soil cultivation can produce only 0.6 kg per m² (Racoky et al., 2004). In combination with *C. gariepinus* and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), basil (*O. basilicum*) showed good growth performance in an extensive coupled ebb and flood gravel substrate system (Palm et al., 2014a). However, few studies report on basil under decoupled aquaponics in different hydroponic subsystems or components (Knaus et al., 2020a).

African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) is gaining increasing scientific and economic importance, and not only in Mecklenburg Western Pomerania, Germany (Knaus, 2016). This fish is suitable for aquaculture because of its high tolerance to different rearing conditions, with a low susceptibility to disease and the ability to breathe atmospheric air with its accessory respiratory organ (Fatollahi & Kasumyan, 2006). Furthermore, African catfish has an excellent feed conversion rate, especially at high stocking densities (Huisman & Richter, 1987; Oellermann, 1995). *C. gariepinus* was cultivated under aquaponic conditions with cucumber (*Cucumis sativus*) (Baßmann et al., 2017), water spinach (*Ipomoea aquatica*) (Endut et al., 2016), lettuce (*Lactuca sativa*), tomatoes (*Solanum lycopersicum*), and basil (*Ocimum basilicum*) (Palm et al., 2014a), and has showed good growth performance. The use of the African catfish in aquaponics is possible and should be further investigated due to its consumer acceptance.

Recent aquaponics systems can use a wide range of different hydroponic subsystems or components for domestic or commercial plant cultivation (Palm et al., 2018a, Maucieri et al., 2019). One of these methods is the “floating raft technique (raft)” (Lennard & Leonard, 2006). Here, the plants grow in grid pots on floating material (e.g., polystyrene), with the roots permanently submerged in the process water, also known as “deep-water culture (DWC)”. This method was already experimentally investigated several years ago and has been most frequently used (Zweig, 1986; Love et al., 2015). For industrial or domestic purposes, the “nutrient film technique (NFT)” is a popular option, using closed channels or grow pipes (Somerville et al., 2014) with small openings for plant cultivation. The roots are supplied with nutrients by a permanent water film and grow inside the channels. The NFT technique is a simple and cheap farming option with relatively low water consumption (Lennard & Leonard, 2006). NFT is also a long-established

aquaponics system and has been used in several experiments, with varying results regarding production and harvest potential (Cooper, 1979; Lennard & Leonard, 2006).

A new method in aquaponics is the so-called “dynamic root floating technique (DRF)”, which is known as a suitable system for the cultivation of leafy vegetables and sweet basil (Wattanapreechanon & Sukprasert, 2012) under tropical Asian climatic conditions in hydroponics (Remy et al., 2005; Kao & Hsiang, 1991). DRF systems can increase the development of so-called “aero roots” or “hair roots”, which develop at the root base a few centimeters above the water level and maintain permanent contact with atmospheric oxygen. This is primarily intended to improve the plant’s oxygen supply, e.g., for nitrification to improve plant growth (Silva et al., 2015). Nevertheless, the basal roots are in constant contact with the nutrient water (Kao & Hsiang, 1991). Another advantage of air roots formed by DRF is the saving of electrical energy, which was described in raft aquaponics systems with an active aeration of plants (Pantarella, 2018). A study demonstrated that the DRF technique could save up to 11.4% in electricity costs (Silva et al., 2018). This exemplifies that DRF offers many advantages in terms of plant growth and energy costs and should be further investigated under aquaponics conditions.

The present study was conducted in the FishGlassHouse of the University of Rostock in Northern Germany under decoupled aquaponics conditions without the use of additional fertilizer at the grow-out stage. The growth performance of basil (*Ocimum basilicum*) was compared by cultivation in three different hydroponic subsystems: dynamic root floating technique (DRF), “floating raft technique (raft), and grow pipes. For plant growth, aquaculture effluents were used from intensive *C. gariepinus* production. Fish performance and sixteen different growth parameters of basil were observed and effects of the different hydroponic subsystems on plant growth are discussed.

3.2. Materials and Methods

The experiment was conducted in summer 2019, from 18 June to 23 July 2019 (36 days) in the FishGlassHouse (FGH) of the University Rostock (latitude: 54.075714, longitude: 12.096591). The 100 m² greenhouse cabin (1_05) and the 100 m² intensive aquaculture unit (IAU) were used. The IAU (PAL Anlagenbau GmbH, Germany) consists of nine fish tanks (1 m³), a sedimentation tank (1.7 m²), a pump sump (6 m³), and a trickling filter (17 m³), and had a stocking density of max 200 kg/m³, 117–130 fish/m³. The aquaponic principle was decoupled and used effluents from *C. gariepinus* production without additional fertilizer. The wastewater was pumped at regular intervals biweekly through transfer tanks to the greenhouse’s hydroponic cabin.

3.2.1. Hydroponics Unit

The hydroponics cabin contained a pump sump and nine individual hydroponic components with seven basil plants each. Within one system, the plants were spaced 30 cm apart (Bione et al., 2014; Putievsky & Galombosi, 1999). The whole system contained 2450 L of process water. Every Tuesday and Thursday, the water of the pump sump was drained and refilled with 540 L process water from the IAU. A 780 W pump transported the water from the pump sump into the nine experimental channels. The inflows of all hydroponic subsystems were set to 4 L/min. The three techniques-DRF, raft, and grow pipes-were tested in triplicates and a completely randomized block design (CRD) (Figure 3.1).

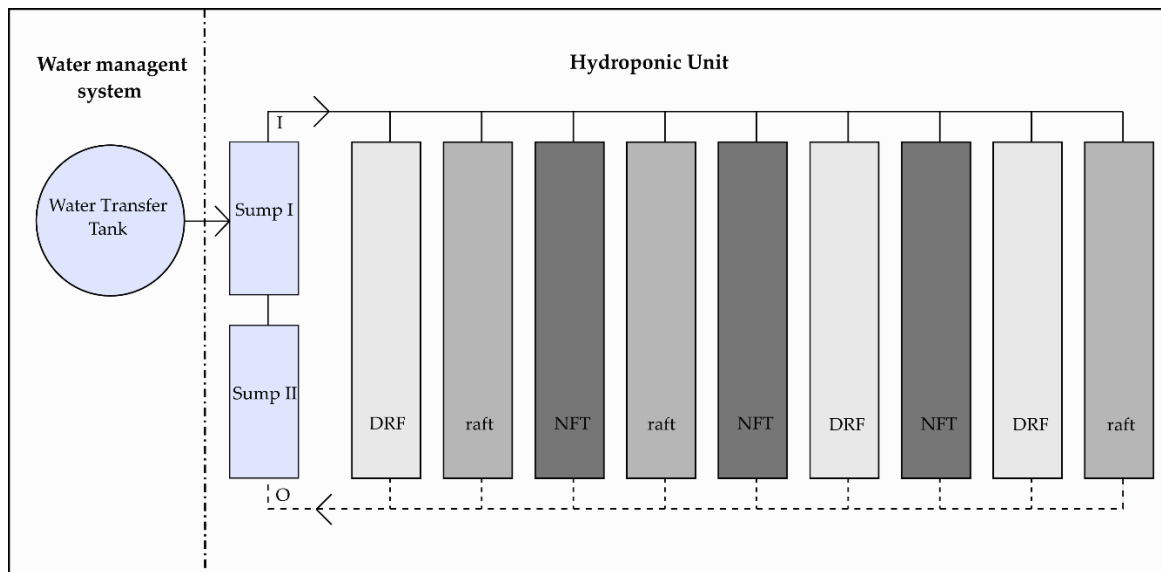


Figure 3.1. Schematic illustration of the decoupled experimental hydroponics cycle with dynamic root floating (DRF), raft, and grow pipes hydroponic components in cabin 1_05 of the FishGlassHouse. The nutrient-enriched water from the aquaculture was pumped via a transfer tank into the decoupled hydroponics cabin.

Dynamic Root Floating Technique (DRF): For the dynamic root floating technique (DRF), glass fiber channels were used of reinforced plastic with the dimensions of 280 cm × 40 cm × 45 cm. Each channel was filled with 317 L of water, on whose surface 40 mm-thick polystyrene rafts were placed. The rafts had holes for grid pots of 5 cm in diameter, where the seedlings were placed. Over a period of 14 days, a membrane pump (Aqua Medic Mistral 4000, AQUA MEDIC GmbH, Bissendorf, Germany) transported approximately 4000 L/h air into the system water via 4/6 mm air hoses with two air stones per tank. Two weeks after the seedlings were transplanted into the channels, the water level was continuously lowered by 1 cm daily until the total air space of 5 cm was reached via a variable escape pipe (Figure 3.2). The plants had the same distance from the ground and the same water surface height in all three hydroponic subsystems during the experiment.

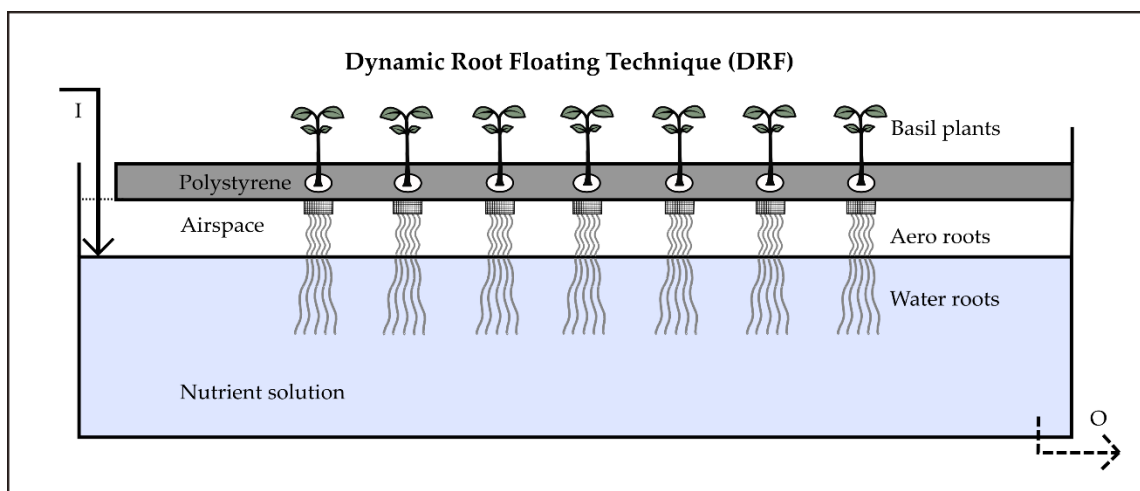


Figure 3.2. Schematic illustration of the dynamic root floating system (DRF) with air space of 5 cm. I = Inflow, O = Outflow.

Floating Raft Culture (Raft): For floating raft culture (raft), glass fiber channels of reinforced plastic (280 cm × 40 cm × 45 cm) were used. Each channel was filled with 317 L of water, on the surface of which 40 mm-thick polystyrene rafts were placed. The rafts had holes for grid pots with a diameter of 5 cm in which the seedlings were placed. A membrane pump (Aqua Medic Mistral 4000, AQUA MEDIC GmbH, Bissendorf, Germany) transported approximately 4000 L/h of air through 4/6 mm air hoses, with two air stones per channel, into the system water over the entire period.

Grow Pipes: The grow pipes were built of unplasticized polyvinyl chloride (PVC) sewage drainage pipes (Somerville et al., 2014) with the dimensions of 275 cm in length × 12 cm in diameter and a slope of 2.12%. Each tube had seven holes for the basil seedlings in the grid pots, which were fixed to the pipe with wires to ensure the same initial plant height as in the other subsystems. The roots were constantly covered by a water film of 4 L/min.

3.2.2. Fish Production and Feeding

African catfish (*C. gariepinus*) were produced in the intensive aquaculture unit (IAU) of the FishGlassHouse and reared in staggered production. The nine fish tanks were divided into three weight-size classes, with each class containing fish of the same size. At the beginning of the experiment, size class one had the largest fish with an average weight of 1310.1 g (±29.0) and 117 fish/tank. Size class two had an average weight of 623.7 g (±14.9), with 130 fish/tank. Size class three contained the smallest fish with an average weight of 297.1 g (±6.5), with 127 fish/tank. Fish were fed with SPECIAL PRO EF 4.5 mm (Alltech Coppens BV, Leende, The Netherlands) with 42% crude protein, 13% crude fat, 1.5% fiber, 7.6% ash, 1.02% phosphorus, 1.9% calcium, and 0.3% sodium. The feeding of the fish followed the protocol of PAL Anlagenbau GmbH (Abtshagen, Germany) at 25% of the recommended feed input, resulting in minimal growth rates and stable water conditions, by automatic feeders. Feeding intervals were from 9:00 pm to 5:00 am every half hour for two seconds.

3.2.3. Plant Cultivation

On 3 June 2019, the watered seeds of *O. basilicum* were sown in seed coats, with a mixed substrate of peat, perlite, and coconut fibers (Eazy Plug) and placed into seedling trays. After four days, the plants germinated and were fertilized until the start of the trial with 1 g/L Universol Orange (Everris International BV, Heerlen, The Netherlands), 6% total nitrogen (N), 5% phosphate (P₂O₅), 25% potassium oxide (K₂O), and 3.4% magnesium oxide (MgO). On 18 June 2019, 63 randomly selected plants with an average height of 4 cm and 2 leaves were transplanted to the hydroponic systems by using the grid pots. From the beginning of the experiment, the plants received only the nutrients from the process water of the fish cycle. No additional fertilizer was added.

At the end of the experiment, the following plant parameters were examined: total wet weight (g), total height (cm), leaf mass wet weight (g), number of leaves longer than 3 mm (no.), shoot axis wet weight (g), shoot axis height (cm), root wet weight (g), root length (cm), and the leaf weight (g), lengths (cm), and widths (cm) of the third upper shoot node. At the end of the experiment, the total leaf wet and dry mass (g) and the dry mass (g) of leaves, shoots, and roots of all plants were determined by drying the samples for 72 h at 60 °C and afterwards for 2 h at 120 °C in a drying oven (UF750 plus, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany). During the experiment, shoot height and number of leaves were taken once a week. At the end of the experiment, the chlorophyll content of the leaves of the third shoot node of each plant

was examined and categorized according to the SPAD (Soil Plant Analysis Development) index (SPAD-502PLUS, Konica Minolta, Inc., Marunouchi, Japan).

3.2.4. Physicochemical Parameters

The data of physical water parameters were collected every Monday to Friday at 1:30 pm with a HQ40d multimeter three-fold (Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Germany). Oxygen saturation (%), oxygen concentration (mg/L), water temperature (°C), pH value, conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$), redox potential (mV), and salinity (‰) were measured. Illuminance ($\text{lx} (\times 10)$) and photosynthetically active radiation (PPFD: photosynthetic photon flux density, $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) were measured once a week at 1:30 pm at the same position in the center of each subsystem. Every Tuesday and Thursday, water samples were taken from the pump sump and analyzed with the Gallery™ Analyzer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA USA) to determine the concentrations of the chemical parameters: ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}), potassium (K^+), magnesium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}), iron (Fe^{2+}), and sulfate (SO_4^{3-}). Using the colorimetric hydrazine method (template: D08896_01©2021 Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA USA), TON (total oxidized nitrogen) as N and nitrate (calculation: TON-nitrite) were analyzed. Using hydrazine under alkaline conditions, nitrate was reduced to nitrite. Under acidic conditions, N-1-naphthylethylenediamine dihydrochloride and sulfanilamide were used to convert the total nitrite ions to a pink azo dye. At 540 nm, the absorbance was determined and related to the TON concentration by means of a calibration curve.

3.2.5. Mathematical and Statistical Analysis

At the beginning of the experiment on 18 June 2019, on 4 July 2019, and at the end of the experiment on 23 July 2019, the total biomass weight and the number of fish per tank, as well as three randomly selected animals per tank, were measured individually. Based on this data, the feed conversion ratio (FCR, Formula (1)), the specific growth rate (SGR, Formula (2)), the biomass increase, the condition factor (C, Formula (3)), and the percentage growth (G, Formula (4)) were calculated. The following formulae were used:

$$\text{FCR} = \text{fish feed quantity (kg)} / \text{weight gain (kg)} \quad (1)$$

$$\text{SGR (\%/day)} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100 \quad (2)$$

with: W_t = final biomass (kg), W_0 = initial biomass (kg), and t = time in days.

$$C = (W \times 100) / L^3 \quad (3)$$

with: W = fish weight (g), and L = fish length (cm).

$$G = \text{Growth fish weight class } x \text{ (\%)} = (F_x - I_x) \times 100 / I_x \quad (4)$$

with: F_x = final weight, fish weight class x , and I_x = initial weight, fish weight class x .

The following parameters of fish growth were statistically analyzed in triplicates by comparison of mean values: initial and final fish length (cm), initial and final fish weight (g), initial and final tank mass (kg), growth per tank (%), condition factor, specific growth rate (SGR), and the feed conversion ratio (FCR).

The collected datasets were processed using Microsoft Excel® (IBM, 2019) and statistically analyzed using the SPSS® 23 software package (Microsoft, 2010). If the data were normally distributed, a one-way analysis of variance (ANOVA) was used. If variance homogeneity was observed, multiple mean comparisons were performed post-hoc using the Tukey HSD (Honestly Significant Difference) test. The Dunnett T3 test was used for variance-inhomogeneous datasets. If the data were not normally distributed, the nonparametric Kruskal–Wallis test was used. All tests were performed with a significance level of $p < 0.05$.

3.3. Results

3.3.1. Fish Growth

At the beginning of the experiment, the fish weight classes had an initial length of 55.76 cm (class 1, large fish), 43.39 cm (class 2, medium fish), and 35.51 cm (class 3, small fish), and the final lengths were 56.90, 48.31, and 39.92 cm. The final length of fish weight class 1 was significantly different ($p = 0.001$) to the final lengths of weight classes 2 and 3 (Table 3.1). Regarding the initial weights (1310.09, 623.74, and 297.13 g) and final weights of the fish (1395.30, 702.22, and 377.81 g), all fish showed small growth rates and the weight classes (1, 2, 3) were significantly different.

Table 3.1. Mean (\pm standard deviation (SD)) of the biological growth parameters of African catfish in different weight classes (class 1 = large fish, class 2 = medium fish, class 3 = small fish) held in the intensive aquaculture unit (IAU) during basil cultivation (36 days) under reduced feeding (25%). Different letters show different groups ($p < 0.05$).

Parameters	Weight Class 1	Weight Class 2	Weight Class 3	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
Fish initial length (cm)	55.76 \pm 4.90 ^{a2}	43.39 \pm 2.99 ^b	35.51 \pm 2.18 ^c	0.001	0.001	0.001
Fish final length (cm)	56.90 \pm 2.54 ^a	48.31 \pm 2.57 ^b	39.92 \pm 2.96 ^b	0.001	0.038	0.078
Fish initial weight (g)	1310.09 \pm 29.00 ^a	623.74 \pm 14.90 ^b	297.13 \pm 6.52 ^c	0.001	0.001	0.001
Fish final weight (g)	1395.30 \pm 15.32 ^a	702.22 \pm 12.54 ^b	377.81 \pm 7.73 ^c	0.001	0.001	0.001
Tank initial mass (kg)	152.83 \pm 2.64 ^a	81.27 \pm 0.37 ^b	37.63 \pm 0.87 ^c	0.001	0.001	0.001
Tank final mass (kg)	161.66 \pm 1.80 ^a	90.45 \pm 2.55 ^b	46.34 \pm 0.44 ^c	0.001	0.001	0.001
Growth per tank (kg)	8.83 \pm 3.48 ^a	9.18 \pm 2.53 ^a	8.71 \pm 0.62 ^a	0.984	0.998	0.973
Growth per tank (%)	5.80 \pm 2.37 ^b	11.29 \pm 3.11 ^b	23.19 \pm 2.10 ^a	0.087	0.003	0.001
Feed conversion ratio (FCR) ³	2.40 \pm 0.85 ^a	1.43 \pm 0.45 ^{ab}	0.94 \pm 0.07 ^b	0.161	0.042	0.561
Specific growth rate (%/day) ³	0.16 \pm 0.06 ^b	0.30 \pm 0.08 ^b	0.58 \pm 0.05 ^a	0.080	0.001	0.004
Condition factor (C)	0.70 \pm 0.09 ^a	0.69 \pm 0.09 ^a	0.67 \pm 0.15 ^a	0.977	0.977	0.977

¹ Significances, with P-I = between fish weight class 1 and 2, P-II = between weight class 1 and 3, P-III = between weight class 2 and 3, ² Means in each row followed by the same superscript letters indicate no significant differences among the fish growth parameters. Means with different letters are statistically different, in that the mean with the lower alphabetical order letter (e.g., a > c) has a mean statistically greater than the mean it is compared to, ³ FCR and specific growth rate based on tank biomasses: n = 3.

With an initial tank mass of 81.27 kg and a final tank mass of 90.45 kg, weight class 2 (medium fish) achieved the highest growth per tank with 9.18 kg. Weight class 1 (large fish) had an increase of 8.83 kg and reached 161.66 kg (initial mass: 152.38 kg, Table 3.1). Weight class 3 (small fish) had an average increase of 8.71 kg and reached 46.34 kg (initial mass: 37.63 kg). Overall, there were no significant differences between the three weight classes in growth per tank. In terms of percentage growth per tank, weight class 1 (5.80%) and class 2 (11.29%) differed significantly from weight class 3 (23.19%).

The feed conversion ratio achieved the best value for the small fish (0.94), thus differing significantly from large fish (FCR: 2.40, Table 3.1). The medium fish (FCR: 1.43) showed no statistical difference to the other groups. For the specific growth rate, the small fish again showed the best performance with 0.58%/day and differed significantly from the large (0.16%/day) and medium fish (0.30%/day). The condition factor was not significantly different between the weight classes ($p = 0.977$) (class 1: 0.70, class 2: 0.69, and class 3: 0.67).

3.3.2. Plant Growth

The plants showed a typical exponential growth over the entire experiment. During the experiment, there were no mortality losses among the plants. In the third week, individual plants from the grow pipes and raft systems showed slight deficiency symptoms and lesions or necrosis on the lower leaf pairs. Table 3.2 shows the growth parameters of the three subsystems.

Table 3.2. *Ocimum basilicum* growth parameters of wet and dry weights (means \pm SD) and total weight parameters (sum of all individual plant weights) of the three experimental groups (dynamic root floating technique (DRF), floating raft culture (raft), grow pipes) at the end of the experiment (36 days). Different letters show different groups ($p < 0.05$, $n = 21$). Last part of the table shows total and leaf mass of *Ocimum basilicum* (wet and dry) produced by one system over the entire experiment period.

Growth Parameters	DRF	Raft	Grow Pipes	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
Total wet weight (g)	107.70 \pm 34.03 ^{a2}	82.02 \pm 22.74 ^b	77.86 \pm 23.93 ^b	0.006	0.002	0.755
Total height ³ (cm)	108.41 \pm 13.45 ^a	99.66 \pm 10.80 ^a	106.20 \pm 18.94 ^a	0.142	0.879	0.330
Leaf mass wet weight (g)	45.36 \pm 13.53 ^a	34.94 \pm 9.44 ^b	32.74 \pm 9.84 ^b	0.010	0.001	0.796
Leaves (No.)	108.05 \pm 47.43 ^a	83.81 \pm 19.64 ^a	89.90 \pm 26.84 ^a	0.152	0.152	0.152
Shoot axis wet weight (g)	27.33 \pm 10.11 ^a	18.42 \pm 6.73 ^b	20.01 \pm 7.29 ^b	0.002	0.022	0.424
Shoot axis height (cm)	54.09 \pm 8.86 ^a	46.78 \pm 7.22 ^b	55.75 \pm 10.65 ^a	0.010	0.520	0.001
Root wet weight (g)	35.00 \pm 12.03 ^a	28.65 \pm 7.69 ^{ab}	25.11 \pm 8.40 ^b	0.178	0.005	0.629
Root length (cm)	54.32 \pm 8.53 ^a	53.60 \pm 10.00 ^a	50.46 \pm 11.77 ^a	0.971	0.440	0.581
Leaf wet weight ⁴ (g)	1.84 \pm 0.49 ^a	1.83 \pm 0.38 ^a	1.53 \pm 0.28 ^b	0.995	0.039	0.049
Leaf length ⁴ (cm)	14.29 \pm 1.62 ^a	13.12 \pm 1.72 ^b	12.77 \pm 1.25 ^b	0.043	0.006	0.744
Leaf width ⁴ (cm)	9.18 \pm 1.33 ^a	8.50 \pm 1.08 ^{ab}	8.31 \pm 1.06 ^b	0.147	0.049	0.869
Leaf SPAD-Value ³	29.76 \pm 2.61 ^a	29.09 \pm 2.67 ^a	28.63 \pm 2.23 ^a	0.659	0.316	0.826
Dry Weight Parameters	DRF	Raft	Grow Pipes	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
Total dry weight (g)	10.38 \pm 3.44 ^a	8.07 \pm 1.92 ^b	8.21 \pm 2.35 ^{ab}	0.034	0.064	0.996
Leaf dry weight (g)	4.96 \pm 1.57 ^a	3.74 \pm 1.04 ^b	3.75 \pm 1.22 ^b	0.009	0.009	0.999
Shoot axis dry weight (g)	3.03 \pm 1.33 ^a	1.90 \pm 0.69 ^b	2.04 \pm 0.80 ^b	0.019	0.033	0.833
Root dry weight (g)	2.39 \pm 0.81 ^a	2.44 \pm 0.41 ^a	2.43 \pm 0.44 ^a	0.994	0.997	0.999
Total Weight Parameters ⁵	DRF	Raft	Grow Pipes			
Total wet weight (g)	2261.68	1722.31	1635.04	-	-	-
Total leaf wet weight (g)	952.66	733.77	687.50	-	-	-
Total dry weight (g)	218.06	169.55	172.36	-	-	-
Total leaf dry weight (g)	104.23	78.45	78.65	-	-	-

¹ Significances, with P-I = between DRF and raft, P-II = between DRF and grow pipes, P-III = between raft and grow pipes, ² Means in each row followed by the same superscript letters indicate no significant differences among the plant growth parameters. Means with different letters are statistically different, in that the mean with the lower alphabetical order letter (e.g., a > b) has a mean statistically greater than the mean it is compared to, ³ Total height (cm) = Shoot axis height (cm) + Root length (cm), ⁴ Measured on the leaf of the third upper shoot node, ⁵ Total weight parameters calculated as the sum of all individual plants of the respective experimental group.

The basil total wet weight of the DRF with 107.70 g was significantly higher than that of the plants in the other two subsystems ($p < 0.05$, Table 3.2). No statistical differences were found in plants between the raft (82.02 g) and the grow pipes (77.86 g). Total height was not significantly different between plants of the DRF (108.41 cm), grow pipes (106.20 cm), and raft hydroponic subsystems (99.66 cm). Leaf mass wet weight was significantly different between the basil of the DRF with 45.36 g, and the raft (34.94 g) and grow pipes (32.74 g). No significant differences were found in the number of leaves (no.) between the subsystems. The shoot axis wet weight was significantly higher in the DRF system (27.33 g) compared with raft (18.42 g) and grow pipes (20.01 g), which were not statistically different ($p = 0.424$). In the height of the shoot axis, the plants of the raft (46.78 cm) system were significantly shorter than in the DRF (54.09 cm) and grow

pipes (55.75 cm). Plants of the DRF developed the highest root wet weight, although only slight rudiments of so-called “hair roots”, and in grow pipes, a slight brown coloring was visible (Figure 3.3).



Figure 3.3. Examples of basil plants at the end of the experiment from DRF (left), raft (middle), and grow pipes (right).

At 35.00 g, the root wet weight in the DRF was significantly higher than in grow pipes (25.11 g), but without a statistical difference to raft (28.65 g). Although the systems showed significant differences in the root wet weights, there were no differences in root length. The roots of the respective plants in the three hydroponic subsystems measured, on average, 50.46–54.32 cm. The leaf wet weight was similar for DRF (1.84 g) and raft (1.83 g) and each was significantly higher than grow pipes (1.53 g). Significance was also found between the leaf length in DRF (14.29 cm) compared to raft (13.12 cm) and grow pipes (12.77 cm). In leaf width, the DRF and raft systems performed best (9.18 and 8.50 cm), in contrast to the grow pipes (8.32 cm). SPAD values were not significantly different among experimental groups. **Figure 3.4** illustrates the evolution of basil leaf development with, on average, higher leaf number increase in plants in DRF.

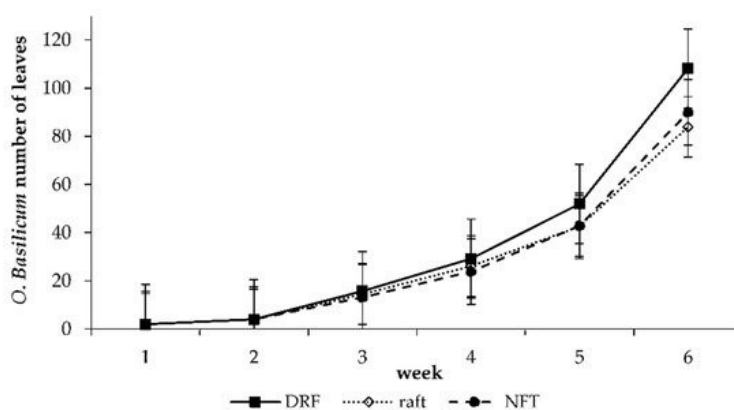


Figure 3.4. *Ocimum basilicum* leaf number development per week in hydroponic subsystems DRF, raft, and grow pipes during the experiment over a period of 36 days.

The total dry weight was significantly higher in DRF and grow pipes (10.38 and 8.21 g) compared with that of the raft plants (8.07 g), which was equal to the basil of the grow pipes (Table 3.2). Leaf dry weight was highest in the DRF system (4.96 g), one third higher (each $p = 0.009$) than in raft (3.74 g) and grow pipes

(3.75 g). Shoot axis weight was significantly heavier in DRF plants (3.03 g) compared with raft (1.90 g) and grow pipes (2.04 g). Root dry weight was not significantly different between the experimental groups.

Total wet weight of basil plants (sum of individual plant weights) was highest in DRF (2261.68 g, Table 3.2), followed by raft (1722.31 g) and grow pipes (1635.04 g), and total dry weight was greater in DRF (218.06 g), followed by grow pipes (172.36 g) and raft (169.55 g). Total leaf wet weight was highest in plants of the DRF (952.66 g), followed by raft (733.77 g) and grow pipes (687.50 g), and total leaf dry weight was best in DRF (104.23 g), followed by grow pipes (78.65 g) and raft (78.45 g).

3.3.3. Physicochemical Parameters

Photosynthetic photon flux density (PPFD) was highest above the grow pipes (173.10 $\mu\text{m}/\text{m}^2\text{s}$, Table 3.3) and significantly different to raft (157.92 $\mu\text{m}/\text{m}^2\text{s}$) and DRF (155.83 $\mu\text{m}/\text{m}^2\text{s}$). The illuminance showed no statistical differences and varied in the systems from 985.00 to 1024.00 (lx ($\times 10$)).

Table 3.3. Means (\pm SD) of photosynthetic photon flux density (PPFD), illumination intensity (lx), and physico-chemical water parameters of the three subsystems measured in the sump of the three hydroponic subsystems during basil cultivation (36 days).

Light Parameters	DRF	Raft	Grow Pipes	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
PPFD ² ($\mu\text{m}/\text{m}^2\text{s}$)	155.83 \pm 32.29 ^{b,3}	157.92 \pm 32.14 ^b	173.10 \pm 22.40 ^a	0.404	0.001	0.002
Light (lx ($\times 10$))	985.00 \pm 116.70 ^a	1013.00 \pm 93.40 ^a	1024.00 \pm 161.30 ^a	0.063	0.063	0.063

¹ Significances, with P-I = between DRF and raft, P-II = between DRF and grow pipes, P-III = between raft and grow pipes, ² PPFD = photosynthetic photon flux density, ³ Means in each row followed by the same superscript letters indicate no significant differences among the light parameters. Means with different letters are statistically different, in that the mean with the lower alphabetical order letter (e.g., a > b) has a mean statistically greater than the mean it is compared to.

In the sump, the dissolved oxygen averaged 7.8 \pm 0.4 mg/L and the oxygen saturation 100.5% \pm 1.1%. The averaged pH-value of 6.5 \pm 0.1 remained constant during the experimental period. Temperature was relatively high at 28.0 \pm 2.4 $^{\circ}\text{C}$, and the average conductivity was 2155.9 \pm 238.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, redox potential 183.3 \pm 20.1 mV, and salinity 1.0 \pm 0.1‰.

At the beginning of the experiment, the conductivity was above 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$: it increased to over 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the second week, and then slowly decreased to 1862 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 3.5). The initial water temperature was 31.3 $^{\circ}\text{C}$ and reached the maximum value of 34.4 $^{\circ}\text{C}$ in the first third of the experiment, and then decreased constantly to about 26 $^{\circ}\text{C}$ until the end of the study, with a mean of 28 \pm 2.4 $^{\circ}\text{C}$ (Figure 3.5). The room temperature averaged 23.8 $^{\circ}\text{C}$ (min 18.2 $^{\circ}\text{C}$, max 40.0 $^{\circ}\text{C}$), and the average room humidity was 52.8% (min 15.6%, max 79.7%).

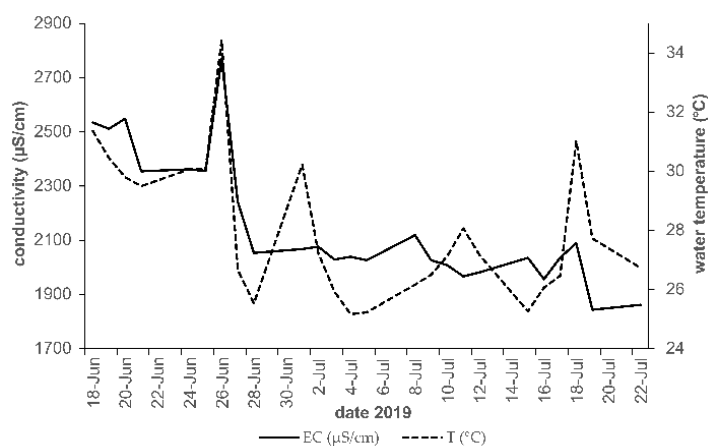


Figure 3.5. Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) and water temperature ($^{\circ}\text{C}$) over the experimental period.

The chemical water parameters were measured in the middle of the pump sump from which the process water was transferred into specific hydroponic subsystems to maintain homogeneous nutrient conditions. The mean concentration of nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) was 204.47 ± 47.98 mg/L and nitrite-nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$) was 0.06 ± 0.08 mg/L, resulting in a total of 204.53 ± 47.97 mg/L total oxidized nitrogen (TON) in the process water. The ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) had an average concentration of 0.19 ± 0.12 mg/L, resulting in an average concentration of 204.72 ± 48.02 mg/L of total dissolved nitrogen (TDN). The remaining average concentrations were as follows: orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 4.71 ± 2.88 mg/L, potassium (K^+) 14.67 ± 3.20 mg/L, magnesium (Mg^{2+}) 24.93 ± 3.79 mg/L, calcium (Ca^{2+}) 291.69 ± 56.66 mg/L, iron (Fe^{2+}) 0.02 ± 0.01 mg/L, and sulphate (SO_4^{2-}) 42.60 ± 7.13 mg/L.

3.4. Discussion

3.4.1. Fish Growth

The growth performance of *C. gariepinus* was satisfactory over the entire experimental period, and the FCR values of 0.94, 1.43, and 2.40 (small, medium, and large fish) were as expected, under consideration of the reduced feeding rate of 25%. Depending on the weight of fish, stocking density, feed quantity, and feed composition, FCR values of 0.61–2.69 were recorded in previous studies, with younger fish regularly performing better (Pantanella, 2012; Palm et al., 2018b). A similar study achieved FCR values of 0.97, 1.23, and 2.69, where also 25% of the recommended amount of a commercial feed was fed, and thus a large part of the feed energy was used for basal metabolism and not for growth (Zimmermann, 2017). High feed conversion ratios of the African catfish, such as FCR 0.74, 0.84, and 0.91 (Knaus et al., 2020a), and 0.72, 0.87, and 0.97 (Pasch, 2018), have been reached at 80% of the maximum recommended feed amount. However, the 25% feeding was sufficient in this experiment to produce stable water conditions for the aquaponics plant production and an EC (Electric Conductivity) value of over 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Feed restriction resulted in a deterioration in FCR, particularly in large fish, since larger catfish require much more energy for their basal metabolism, in relative terms, than small fish (Palm et al., 2014a).

The same explanation can be used for the specific growth rate. At 0.58%, 0.30%, and 0.16%/day (small, medium, and large fish), the results showed the expected values based on the limited feeding rate. At 80% feeding, SGR values of 3.23%, 1.50%, and 0.90%/day can be expected (Knaus et al., 2020a). The small- and medium-sized fish had, on average, five times and the large fish three times the daily growth rate, with 80% and 25% feeding, respectively. An SGR of 1.80%/day was recorded over a total production period of

204 days under intensive production conditions (Palm et al., 2018b). If an aquaponic farm aims to succeed economically mainly through plant production, it is reasonable, as can be seen in the present experiment, to reduce the feed input to 25% of the recommended feed rate and still provide the fish with sufficient feed to produce adequate EC values for the plants. However, if the aquaponics is also designed to operate profitably in its aquaculture section, it is still advised not to use too low feeding rates or stocking densities that prohibit adequate fish growth.

3.4.2. Physio-Chemical Parameters

The physical and chemical water parameters were sufficient for adequate growth of *O. basilicum* at recommended levels of pH of 5.5–6.5 (Somerville et al., 2014). The mean photosynthetic photon flux density (PPFD) of $162.3 \pm 9.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ was suboptimal and 67.5% lower than the recommended $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (Beaman et al., 2009) for highest edible biomass production of sweet basil. The highest radiation measured was above the grow pipe system, with the $173.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ obviously influenced by local weather variations of light incidence. However, since the grow pipes had the lowest total fresh mass and no statistical differences were found in the light intensity (lx), the slightly differing light parameters were not the decisive factors for the observed growth differences of the basil plants.

The water temperature of 28 °C was higher than the recommended 20–25 °C for basil cultivation (Somerville et al., 2014; Walters & Currey, 2015; Saha et al., 2016). In the first third of the experiment, the temperature increased to the maximum value of 34.4 °C, which is significantly above the recommended maximum of 30 °C (Somerville, 2014). This might have negatively influenced the growth of basil in all three subsystems. However, the “dynamic root floating technique (DRF)” was developed for hydroponic cultivation under tropical conditions with very high temperatures and humidity in Taiwan (Kao & Hsiang, 1991). At a lower temperature of 25 °C, no significant differences were found in vegetable fresh weight between DRF, Nutrient Film Technique (NFT), and Deep Flow Technique (DFT); however, with an increase in water temperature to almost 35 °C, a significant decrease of root activity in NFT and DFT was observed, in contrast to the relatively higher fresh biomass in the DRF system (Kao & Hsiang, 1991). In the present study, the significantly better weight of basil in the DRF system might be explained by the high water temperatures during the summer season and the presence of the specific DRF-aero-space. The oxygen concentration of the nutrient solution decreases with increasing water temperatures (Wetzel, 2001), and the respiration rate of the roots and the uptake of water and mineral nutrients decreases (Morard et al., 2000), resulting in reduced plant growth. In the nutrient solution, oxygen stress caused by high temperatures can produce a brown discoloration of the roots (Kao & Hsiang, 1991). The oxygen content in our study was generally high with a saturation level of 100.5% (7.8 mg/L), with the expectation of uniform plant growth in all subsystems. However, the color of the roots was different with a lighter shade in DRF (Figure 3). In contrast, the coloration inside the grow pipes was brown, and they had a lower wet weight. DRF seemed to promote plant growth through the specific air space, as well as the increase in humidity inside the channel to form aero roots. At the higher temperatures of the present study, the DRF subsystem still provides enough oxygen supply, resulting in improved plant growth.

The mean conductivity level of $2155.9 \pm 238.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ was much higher than already reported for aquaponic plant production, from 300 to 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Rakocy et al., 2006). Optimum EC levels for basil cultivation in hydroponics under use of mineral fertilizer also differs, ranging from 1000 to 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sharma et al., 2018), and 2800 to 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Morano et al., 2017). With the same experimental design and a lower mean EC level ($1619.4 \pm 205.6 \mu\text{S}/\text{cm}$), basil shoot axis height (plant height above ground after 35 days) was higher and leaf numbers were substantially greater in growth pipes, raft, and gravel substrate

ebb-and-flood hydro-components (Knaus et al., 2020a). The lower number of leaves and lower root weights in the present study could be influenced by the type of feed (Coppens Special Pro EF) and specific nutrient/mineral composition, as well as by the decreasing EC value, which in the previous study steadily increased when fed with an alternative feed (Skretting ME-4.5 Meerval 44-14 (Knaus et al., 2020a)).

The proportions of nitrogen corresponded to hydroponic nutrient solutions for basil production (Succop & Newman, 2004), while phosphate and potassium were also lower in comparison to aquaponic nutrient solutions (Bittsanszky et al., 2016). Hydroponics nutrient solutions usually contain six essential nutrients, N, P, K, Ca, Mg, and S, which must be available in the correct ion ratios for optimal plant growth (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012). In hydroponic sciences, there are several formulations of nutrient solutions, which range in mg/L: N 170–235, P 30–60, K 150–300, Ca 160–185, Mg 35–50, and S 50–335 (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012). For basil cultivation with soil, a wide range is given for N (104–200 kg/ha), P (12–100 kg/ha), and K (73–120 kg/ha); in some areas in the USA, even an NPK ratio of 1:1:1 is given (Sharafzadeh & Alizadeh, 2011). Assuming an optimum of 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for hydroponic basil cultivation, the chemical composition of this nutrient solution should be as follows (rounded): nitrogen 220 mg/L, phosphorus 62 mg/L, potassium 262 mg/L, calcium 192 mg/L, magnesium 73 mg/L, sulfur 106 mg/L, and iron 1.95 mg/L (Morano et al., 2017). The average concentrations measured in the present study at a 25% feeding rate were: Total Dissolved Nitrogen (TDN) 204.53 mg/L, phosphorus 4.71 mg/L, potassium 14.67 mg/L, calcium 291.69 mg/L, magnesium 24.93 mg/L, sulfur 14.22 mg/L, and iron 0.02 mg/L. Thus, only nitrogen was close to the optimal range and calcium was approximately 50% higher. The magnesium concentration was about 37%, sulfur about 16%, phosphorus and potassium were less than 8%, and iron was only about 1% of the optimal concentration. Yellow coloring of the leaves (while the leaf-veins remained green), which is typical due to the strong iron deficiency, and even necrosis were observed early in this experiment. The process water produced by the fish production was sufficient for plant growth, but it can be assumed that the overall growth performance of the plants in all three subsystems was negatively affected by nutrient deficiencies (López-Millan et al., 2013).

3.4.3. Plant Growth

During the experimental period from 18 June to 23 July 2019, the plants from three subsystems showed several differences in their growth parameters, implying that growth and development were strongly influenced by the hydroponic components. A total of 16 growth parameters were compared. The DRF subsystem performed best in 14 of them. Eleven of these sixteen parameters differed significantly from raft and/or grow pipes ($p < 0.05$).

Leaf Development: The leaf numbers between 83.81 and 108.05 were not significantly different between the hydroponic subsystems (DRF = raft = grow pipes, Table 2). This is in accordance with a former study of basil cultivation with no significant differences in the number of leaves between grow pipes and raft hydroponics and the production of *C. gariepinus* under decoupled aquaponic conditions (Knaus et al., 2020a). In hydroponics, a seven-week trial produced the most leaves (119.41 leaves/plant), highest leaf fresh weight (64.09 g), and dry weight (6.03 g) at an N:P:K ratio of 10:1:10 mol/m³, with an NO₃⁻/NH₄⁺ molar ratio of 1:0 (Kiferle et al., 2013). A similar growth performance would have been expected with a two-week longer growth period in this experiment. In another study with different algal extract treatments, the best treatments only produced 91.3 leaves/plant in 12 weeks (Elansary et al., 2016). These plants, grown in culture substrates, were fertilized with Osmocote Plus (14:13:13 N, P, K +microelements) (2 g/L substrates) and grew at a photosynthetically active radiation of 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (Elansary et al., 2016). In contrast, an aquaponic 42-day experiment produced an average of 508.93 ± 13.27 leaves/plant, which is significantly

higher than the results of the earlier studies (Knaus et al., 2020a). A N:P:K ratio of 106.8:9.4:60.6 mg/L, combined with the advantages of the beneficial bacterial communities in aquaponic systems, may have led to this extraordinary growth performance (Knaus et al., 2020a, Eck et al., 2019).

With the same experimental design and the cultivation of spearmint (*Mentha spicata*), the grow pipes and raft showed higher numbers of leaves (grow pipes: 639.7, raft: 532.2) in contrast to the lowest leaf number in the DRF system (482.3) (Pasch, 2018). These contrasting results from the present study might have been influenced by the different cultivation temperatures: the DRF system was originally designed for tropical regions in Asia and higher temperatures, where oxygen saturation and root activity in raft and NFT systems decrease (Kao & Hsiang, 1991). The water temperature of the experiment with *M. spicata* was 3.3 °C lower (24.7 ± 0.1 °C (Pasch, 2018)), and the benefits of oxygen saturation were still present in grow pipes and raft. At temperatures below 28 °C, as seen in the present study, the DRF system does not seem to be advantageous for plant cultivation due to lower leaf numbers in the production of *M. spicata* (Pasch, 2018). In northern regions such as Germany (Mecklenburg-Vorpommern), the DRF should only be used in summer to avoid temperature fluctuations and low humidity in the aerospace of the DRF system. The application of only one cropping cycle for the DRF system, from June to September, is recommended, in contrast to the two cropping cycles in tropical regions of Asia from April to October and October to March (Kao & Hsiang, 1991). Under semi-natural cultivation conditions, a summer cropping period seems to be ideal. However, the adaptation of DRF use in tropical greenhouses under aquaponic conditions worldwide is a future challenge.

The DRF system showed a significantly higher leaf wet (45.36 ± 13.53 g) and dry weight (4.96 ± 1.57 g) than raft (34.94 ± 9.44 g; 3.74 ± 1.04 g) and grow pipes (32.74 ± 9.84 g, 3.75 ± 1.22 g; DRF > raft = grow pipes, Table 2), and the leaf length was highest in DRF (14.29 ± 1.62 cm; DRF > raft = grow pipes). Leaf width was also highest (9.18 ± 1.33 cm) and comparable to raft (8.50 ± 1.08 cm; DRF > grow pipes, Table 2). Under the same environmental conditions, DRF appears economically attractive as it produced about 30% more leaf fresh and dry biomass. Consequently, the dynamic root floating technique (DRF) must not be omitted from aquaponics gardening production methods in northern latitudes (Palm et al., 2018b).

Plant Biomass Development: *O. basilicum* biomass development was significantly higher in DRF in total wet (107.70 ± 34.03 g) and dry weight (10.38 ± 3.44 g), as well as in shoot axis wet and dry weight (27.33 ± 10.11 g, 3.03 ± 1.33 g), compared with raft (82.02 ± 22.74 g, 8.07 ± 1.92 g, 18.42 ± 6.73 g, 1.90 ± 0.69 g) and grow pipes (77.86 ± 23.93 g, 8.21 ± 2.35 g, 20.01 ± 7.29 g, 2.04 ± 0.80 g; DRF > raft = grow pipes, Table 2). With 2261.68 g total mass and 952.66 g leaf mass, DRF performed 30% better than raft and grow pipes. With 218.06 g total dry mass, the DRF system produced about a quarter more mass than the other two systems, and with 104.23 g dry leaf mass, about a third more (Table 2). Literature on comparative studies with hydroponic subsystems and DRF are scarce. An aquaponic comparison with Nile tilapia and Pak choi (*Brassica rapa chinensis*) in raft and DRF showed no significant differences for plant yield, under a pH of 8.7 (DRF) to 8.8 (raft) and a conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) of 1005 and 975, not suitable for Pak choi cultivation (Silva et al., 2018). In hydroponics, a better basil growth performance (fresh weight, dry weight, and height) was reported in raft (or DFT) compared with a conventional NFT system with a rectangular profile (Walters & Currey, 2015). In a former experiment under decoupled aquaponics in grow pipes and raft, basil wet (382.8 g, 360.8 g) and dry weight (36.6 g, 35.7 g) were also not significantly different. However, wet weight values for grow pipes were 4.92-fold higher and raft values 4.40-fold higher than in the present study (dry weights grow pipes: 4.46-fold higher, raft: 4.42-fold higher) (Knaus et al., 2020a). With the use of an alternative fish feed (Skretting ME-4.5 Meerval (Knaus et al., 2020a)) and different nutrient ratios, basil developed a higher biomass. This was despite a lower EC value of 1619.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, twice as much phosphorus, and four times as

much potassium inside the process water. This resulted in an N:P:K ratio that was significantly closer to the proposed ratios for hydroponic cultivation (Trejo-Télez-Gómez-Merino, 2012; Morano et al., 2017). A deficiency of essential nutrients may have resulted in deterioration in the development of leaves and biomass (Janpen et al., 2019).

Better biomass development of basil (Knaus et al., 2020a) might have been influenced by the method of plant transplantation during the first stages of development. High growth performance of *O. basilicum* was observed after plants were brought into the system three weeks after sowing, with 6–8 leaves and 4 cm shoot axis height (Pribbernow, 2020, pers. comm.). Most studies indicate that basil seedlings are transplanted into the experimental systems 2–3 weeks after sowing, or with 1–3 true, fully expanded leaf pairs (Matsumoto et al., 2013; Saha et al., 2016; Dou et al., 2019). Young basil plants in the present study were planted in hydroponic subsystems with equal 4 cm shoot heights. However, only one pair of true leaves occurred, and thus, a lower leaf mass as the most relevant photosynthetic organ was present. This might have been caused by contamination of the seed material but also by adaptation of light (Meng & Runkle, 2019) and heat (Ramin, 2006). The further development of the plants was thus inhibited and delayed, which could explain the basil's relatively low biomass and leaf development.

Root Development: The wet weight of the roots was best in DRF (35.00 g) and raft (28.65 g), whereas the wet weight between the roots of the grow pipes (25.11 g) was not significantly different compared with raft (DRF = raft, raft = grow pipes; Table 2). The dry weight of the roots showed no differences between the hydroponic subsystems (DRF = raft = grow pipes) and exhibited comparable root development. In general, the DRF system was developed to stabilize the production of leafy vegetables during the monsoon season, when plant growth in NFT and raft deteriorated, and root activity was significantly reduced by oxygen depletion at higher temperatures (Kao & Hsiang, 1991). In the DRF system, root activity is maintained at high temperatures by the development of additional hair roots or “aero roots” that occupy the air space above the water (Kao & Hsiang, 1991). The two root types, aero roots and nutrient roots (Kao & Hsiang, 1991), were beneficial in the DRF system and promoted biomass development compared with plant culture in the raft system and growth pipes. In contrast, mint (*Mentha spicata*) production in decoupled aquaponics at lower temperatures (25.64 ± 1.91 °C) and humidity showed a lignification of aerial roots with a brown coloration (Pasch 2018). The growth performance of mint was significantly lower in DRF compared with grow pipes, and root dry weights were not significantly different between DRF, raft, and grow pipes (Pasch, 2018). Thus, advantageous DRF hydroponics was seen only at high temperatures above 30 °C and should be used at northern latitudes only during the hot summer season when the oxygen content in the process water of comparable systems, such as raft and grow pipes, becomes suboptimal.

Plant Height Development: Total plant height was comparable between the hydroponic subsystems and not significantly different (DRF = raft = grow pipes; Table 2). However, height of the shoot axis was significantly higher in the plants in both DRF (54.09 ± 8.86 cm) and grow pipes (55.75 ± 10.65 cm), followed by raft (46.78 ± 7.22 cm; DRF = grow pipes > raft). With the same experimental design, basil showed higher shoot axis heights above-ground in grow pipes (79.7 ± 8.1 cm) and raft (84.9 ± 10.3 cm) after 35 days (Knaus et al., 2020a). In contrast to our study, the potassium availability was four-fold higher (Knaus et al., 2020a), the plants were transplanted into the system one week later with a higher leaf development, and artificial lighting was used during the growth period (Knaus et al., 2020a; Pribbernow, 2020, pers. comm.). Compared to conventional basil cultivation, plant height (shoot axis) in the present study was lower, as described with heights ranging between 75 and 95 cm, but at a growing period of 120 days from sowing to transplanting to the fields (30 days) to maturity (85–90 days) (Srivastava et al., 2018). In hydroponics, the shoot axis height was higher by about 74 cm, after 70 days and an EC value of 640 μ S/cm (Elhindi et al.,

2017). In contrast, basil plants were only 46.4–49.2 cm tall after 12 weeks when algae extracts were provided as fertilizer (Elansary et al., 2016). At a comparable growth time of 8 weeks (3 weeks from sowing until transplanting + 5 weeks of growth), plant heights of approximately 45 cm were determined in an aquaponic raft system during an interim evaluation, while basil grown in a hydroponic raft system only reached about 28 cm at this time (calculated from original data of Figure 3.2) (Saha et al., 2016). At high EC values of 5000 and 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and a growth time of 70 days, shoot heights of approximately 62 and 49 cm were measured, also in hydroponics with arbuscular mycorrhizal fungi inoculations (Elhindi et al., 2017). Summarizing the above and under consideration that the plant height during the present study was assessed after a short growth period (15 days sowing to transplanting + 36 days growth), basil growth, especially inside the DRF and grow pipes, performed moderately.

3.5. Conclusions

O. basilicum showed adequate growth performance in a decoupled aquaponic system design, by using aquaculture effluents of *C. gariepinus* cultivation under 25% of the recommended feed input. High water temperatures of 28 ± 2.4 °C and nutrient concentrations at a mean conductivity level of 2155.9 ± 238.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ were not optimal for basil production, limiting the plant growth. The dynamic root floating technique performed significantly better in 11 (total wet weight, leaf mass wet weight, shoot axis wet weight, shoot axis height, root wet weight, leaf wet weight, leaf length, leaf width, total dry weight, leaf dry weight, and shoot axis dry weight) of 16 *O. basilicum* growth parameters than raft or grow pipes (DRF > raft = grow pipes). Total biomass production was highest in plants cultured in DRF in wet and dry weight (2261.68 g, 218.06 g) compared with raft (1722.31 g, 169.55 g) and grow pipes (1635.04 g, 172.36 g). In comparison to earlier studies, the nutrient concentration ratio in the process water was suboptimal. In particular, the lack of potassium, phosphorus, and iron must have reduced plant growth. For better plant performance under low feed input and high water temperatures, partial fertilization or a feed with a different nutrient composition should be considered. The high water temperatures of up to 34.4 °C resulted in reduced root activity in raft and grow pipes and thus, reduced biomass. Aero roots in the DRF were also poorly developed, but still better than in both other sampled subsystems. Consequently, the DRF can be recommended for summer basil production in northern latitudes under glasshouse conditions when the water temperatures reach above 28 °C.

4. Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics (s.s.)⁷

Abstract

Basil (*Ocimum basilicum*) was cultivated in three hydroponic subsystems (i) a modified commercial aeroponics, (ii) a dynamic root floating (DRF) system, and (iii) a floating raft system in a decoupled aquaponic system in Northern Germany, Mecklenburg–Western Pomerania. For plant nutrition, aquaculture process water from intensive rearing of African catfish (*Clarias gariepinus*) was used without fertilizer. After 39 days, 16 plant growth parameters were compared, with aeroponics performing significantly better in 11 parameters compared with the DRF, and better compared with the raft in 13 parameters. The economically important leaf wet and dry weight was over 40% higher in aeroponics (28.53 ± 8.74 g; 4.26 ± 1.23 g), but similar in the DRF (20.19 ± 6.57 g; 2.83 ± 0.90 g) and raft (20.35 ± 7.14 g; 2.84 ± 1.04 g). The roots in the DRF grew shorter and thicker; however, this resulted in a higher root dry weight in aeroponics (1.08 ± 0.38 g) compared with the DRF (0.82 ± 0.36 g) and raft (0.67 ± 0.27 g). With optimal fertilizer and system improvement, aquaponic aeroponics (s.s.) could become a productive and sustainable large-scale food production system in the future. Due to its simple construction, the raft is ideal for domestic or semi-commercial use and can be used in areas where water is neither scarce nor expensive. The DRF system is particularly suitable for basil cultivation under hot tropical conditions.

Keywords

Basil; African catfish; Dynamic root floating technique (DRF); Floating raft; Deep flow technique (DFT); Aeroponics; Aquaponics; Hydroponics

⁷ Dieser Artikel wurde publiziert unter: Pasch, J., Appelbaum, S., Palm, H. W., Knaus, U. (2021) Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics (s.s.). *AgriEngineering*; 3(3):559-574.

4.1. Introduction

Aquaponics, the sustainable and resource-friendly cultivation of aquatic organisms and plants in recirculating systems, has become an increasingly popular field of science (Palm et al., 2018a). Different hydroponic subsystems have been tested with various fish and plant combinations in recent years. Nevertheless, there is still the need for research in testing the various hydroponic subsystems for the highest possible yield. Best suited to evaluate the performance of different hydroponic subsystems in aquaponics are plants and fishes that have already achieved good results.

Herbs such as sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) are particularly suitable for aquaponics because they grow rapidly (Rakocy, 2012; Love et al., 2015), their essential oil is used in medical treatments (Simon et al., 1990), and they are among the economically most important herbs worldwide (Beaman, 2008; Makri & Kintzios, 2008). In various experiments, excellent yields were achieved under both hydroponic and aquaponic conditions (Raimondi et al., 2006; Dunwoody, 2013; Knaus et al., 2020a). It has also been shown that high basil stocking densities lead to a beneficial relationship between the African catfish *C. gariepinus* and the plants. Fish injuries were reduced and behavioral patterns were positively influenced (Baßmann et al., 2018).

African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) is an important aquaculture species with a worldwide production of 200 k tons (FAO, 2020b). It is also applied for aquaponic research due to its uncomplicated breeding and excellent feed conversion ratio (FCR) (Knaus & Palm, 2017; Knaus et al., 2020a; Knaus et al., 2020b). In combination with basil, the African catfish has shown good growth performance (Pantanella, 2012; Palm et al., 2014a) and was able to produce juvenile fish (initial weight of <10 g) with an FCR of 0.61 (Knaus & Palm, 2017), small fish (40 g) at 0.74, medium fish (350 g) at 0.84, and larger fish (>1 kg) at 0.91 (Knaus et al., 2020a). The aquaponic fish–plant combination *C. gariepinus* and *O. basilicum* is suitable to compare the basil growth performance in different hydroponic subsystems under coupled or decoupled aquaponics conditions. In a decoupled aquaponics system, the aquaculture and hydroponic units are separated from each other, and there is, in contrast to coupled systems, no backflow of the process water from the plants to the fish.

One of the most popular aquaponic cultivation systems is the floating raft system (raft or the deep flow technique (DFT)). In a comparison of the raft with media bed systems under a combination of sweet basil and channel catfish, the raft system performed best in aquaponic yield, fresh leaf mass, and total vegetative (non-root) biomass (Dunwoody, 2013). In a hydroponic comparison, different basil cultivars were able to produce 2.6 g more fresh mass in a raft system after 3 weeks compared with the nutrient film technique (NFT) (Walters & Currey, 2015).

One of the least-known hydroponic systems is the DRF (dynamic root floating technique), which has only been used four times in aquaponic research so far (Silva et al., 2015; Pasch, 2018; Silva et al., 2018; Pasch et al., 2021a). It was originally developed for the year-round production of vegetables in Taiwan (Kao & Hsiang, 1991) but can also be used as a technique to reduce electric power consumption (Silva et al., 2018). By creating an air space between shoot and nutrient solution, root activity can be maintained at high water temperatures (Pasch et al., 2021a; Kao & Hsiang, 1991). In a decoupled experiment with African catfish and Moroccan mint (*Mentha spicata*) during spring in Northern Germany, the DRF produced less leaf biomass and shorter plants compared with the raft (Pasch, 2018). In a subsequent summer experiment (cet. par.) at an average water temperature of 28.0 ± 2.4 °C, the DRF system performed better than raft in 8 of 16 investigated plant growth parameters (Pasch et al., 2021a).

Another new hydroponic cultivation system is aeroponics, and the literature about this subsystem in aquaponics is scarce. It was originally developed in the 1920s by botanists who used earlier aeroponic

techniques as a research tool for root physiology (Buckseth et al., 2016). The basic principle of modern aeroponics is to grow the plants in a closed or semi-closed environment by spraying the roots continuously or intermittently with a nutrient-rich fertilizer solution (Barack et al., 1996; Mbiyu et al., 2012; Buckseth et al., 2016). The system design can vary greatly, whereby the correct combination of pressure, nozzles, and thus droplet size, misting intervals, and root zone volume have a significant influence on the growth performance of the plants (Salachas et al., 2015; Li et al., 2018). According to NASA, aeroponic systems can reduce water usage by 98%, fertilizer usage by 60%, and pesticide usage by 100%, while increasing crop yields by 45–75% (NASA, 2006). In addition, aeroponics allows better control over plant growth parameters as well as pests or diseases. Thus, through the elimination of growth media substrates, the resource input consequently decreases, also making aeroponics attractive as a crop production option for (interplanetary) space flights (Clawson et al., 2000).

Aeroponics is especially useful for crops whose roots are harvested as the end product, such as potatoes, yams, or ginger, but is also increasingly used for the cultivation of numerous vegetable crops, such as lettuce, tomatoes, and herbs (Li et al., 2018). Aeroponics has been successfully applied in the production of potato minitubers (Mbiyu et al., 2012) since the harvest is convenient and clean and allows better size control (Farran & Mingo-Castell, 2006). There is so far little research on aeroponic cultivation of crops where above-ground parts are to be used for harvesting. In an experiment with valerian (*Valeriana officinalis*), the aeroponics system formed less fresh weight of both leaves and roots and less leaf area than the floating media system, along with the concentration of essential oils (Tabatabaei, 2008). In contrast, in an experiment with tomatoes, the aeroponics system was able to produce significantly higher yields (40 kg/m²) than a stone wool system (32 kg/m²) and soil cultivation (36 kg/m²) (Phan-Hui, 1994). Another study concluded that basil plants grown aeroponically were of superior nutritional quality (Salachas et al., 2015).

This study examined the growth of sweet basil (*O. basilicum*) in three different hydroponic subsystems under decoupled aquaponic conditions with the intensive culture of African catfish (*C. gariepinus*). The plants grew in (i) a modified commercial aeroponics (AERO), (ii) a dynamic root floating (DRF) system, and (iii) a floating raft (raft) system without the addition of fertilizers under controlled greenhouse conditions. The plant and fish growth performance, together with the physicochemical water parameters, are analyzed and discussed.

4.2. Materials and Methods

The experiment was carried out in a 100 m² greenhouse cabin and in an intensive aquaculture unit (IAU) in the FishGlassHouse (FGH) (latitude: 54.075714, longitude: 12.096591) of the University of Rostock, Rostock, Germany. The IAU consisted of nine fish tanks (1 m³) with a stocking density of 120 fish/tank (max 200 kg/m³), a sedimentation tank (1.7 m³), a pump sump (6 m³), and a trickling filter (17 m³). The effluent from the production of *C. gariepinus* was pumped twice a week through transfer tanks into the greenhouse cabin. A drum filter (Wasserfilteranlage ITF 30, 25–30 m³/h, Fackler Gewächshaustechnik, Munningen, Germany) was interposed between the transfer tank and the planting cabin for solids removal. The aquaponic principle was decoupled, and no additional fertilizer was used.

4.2.1. Hydroponics Unit

The three techniques— aeroponics (AERO), the dynamic root floating (DRF), and floating raft (raft)— were tested in triplicates and a randomized block design (Figure 4.1). The cabin contained a pump sump and nine hydroponic channels, each with seven basil plants at a distance of 20 cm. A total of 2450 L was

pumped from the IAU into the system at the start of the experiment. On Tuesdays and Fridays, the water was drained from the pump sump, and 540 L of process water was refilled. A 780-W pump distributed the nutrient solution to the DRF and raft channels, and another 780-W pump supplied the AERO channels; here, an additional filter (Universalfilter II, BWT, Schriesheim, Germany) was interposed without a filter sleeve to prevent clogging of the AERO nozzles. Using flow regulators, the inflow was set to 4 L/min/channel.

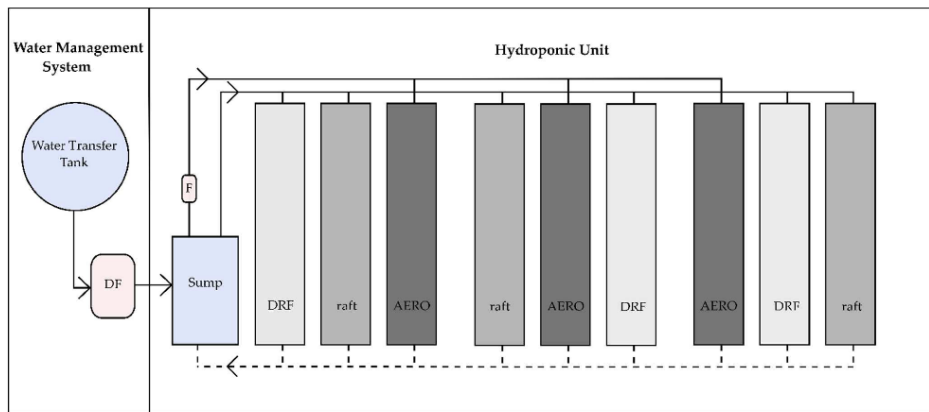


Figure 4.1. Schematic illustration of the decoupled experimental hydroponics cycle with DRF, raft, and AERO hydroponic subsystems in cabin 1_05 of the FischGlasHaus. DF: drum filter; F: filter. Aquaculture effluent water from *C. gariepinus* production was pumped to the water transfer tank.

Dynamic Root Floating Technique (DRF): Glass fiber channels made of reinforced plastic with the dimensions 280 cm × 40 cm × 45 cm, filled with 317 L of water, were used. The seedlings were placed in grid pots with a diameter of 8 cm, which were placed in the holes of 40-mm-thick polystyrene rafts. Over a period of 14 days, a membrane pump (Aqua Medic Mistral 4000, MEDIC GmbH, Bissendorf, Germany) pumped approximately 4000 L/h of air through 4/6 mm air hoses with two air stones per tank into the process water. Afterward, the grid pots were closed by using transparent film, and the water level was continuously lowered by 1 cm daily with the help of a variable drain regulator until a total air space of 5 cm was reached (Figure 4.2).

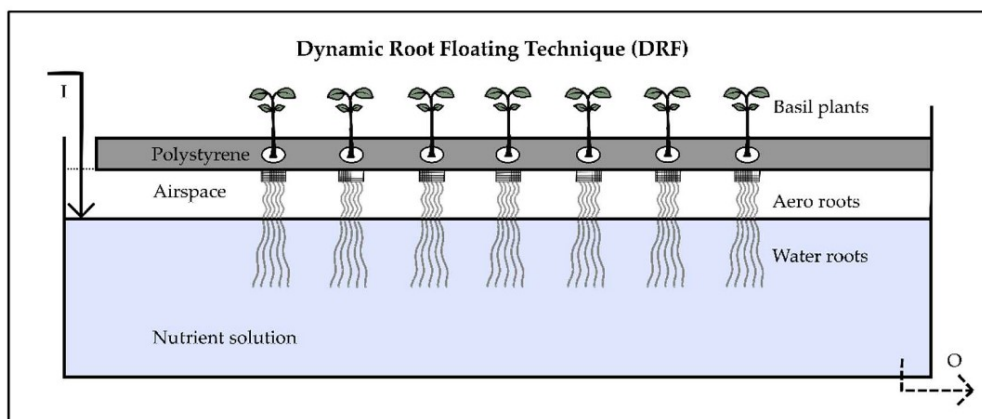


Figure 4.2. Schematic illustration of the dynamic root floating (DRF) system with air space of 5 cm. I = inflow, O = outflow.

Floating Raft Culture (Raft): The raft system used glass fiber channels made of reinforced plastic (280 cm × 40 cm × 45 cm). Each channel was filled with 317 L of water. The 40-mm-thick polystyrene rafts had holes for grid pots with a diameter of 8 cm in which the seedlings were placed. A membrane pump (Aqua Medic Mistral 4000, MEDIC GmbH, Bissendorf, Germany) transported about 4000 L/h of air through 4/6 mm air hoses, with two air stones per channel, into the process water during the entire experiment.

Aeroponics (AERO): For aeroponics, modified square channels from the commercial GHE AeroFlo40 system (GHE, Fleurance, France) were used. The channels were made of polyvinyl chloride (PVC) and had a length of 200 cm, a height and width of 12 cm, and a slope of 2.12%. Each pipe had seven holes at 20-cm intervals for the basil seedlings in the 8-cm diameter grid pots (Figure 4.3). At the edge of the channels, eight 180° spray nozzles (micro-drip-system, Gardena, Ulm, Germany) were installed around the roots, which sprayed them constantly with the African catfish process water from the sump. The grid pots were closed using transparent film.

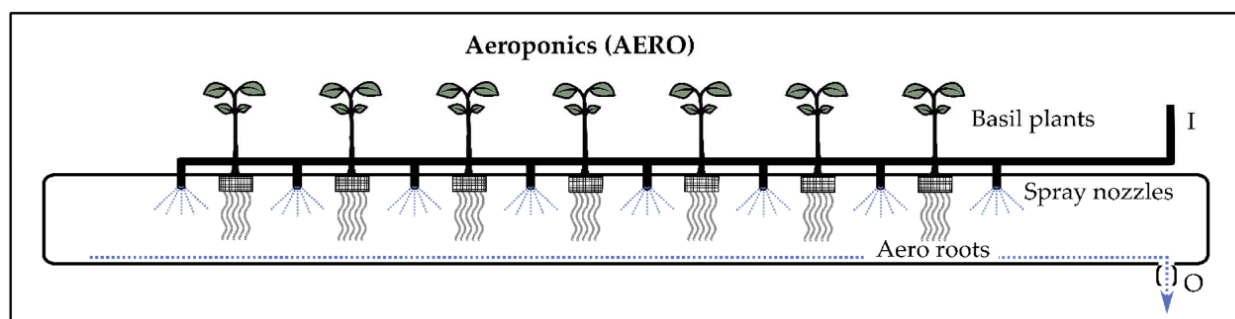


Figure 4.3. Schematic illustration of the aeroponics system (AERO). I = inflow, O = outflow.

4.2.2. Fish Production and Feeding

African catfish (*Clarias gariepinus*) was cultivated in the intensive aquaculture unit (IAU) of the FishGlassHouse. In nine tanks, three weight-size classes were cultured in three tanks, each with 120 fish/tank. Size class 1 was the largest fish with an average weight of 1266.68 g (± 86.46). Size class 2 was 838.46 g (± 17.66), and size class 3 was 42.78 g (± 0.69). A commercial African catfish feed, SPECIAL PRO EF 4.5 mm (Alltech Coppens BV, Leende, The Netherlands), was used, with 42% crude protein, 13% crude fat, 1.5% fiber, 7.6% ash, 1.02% phosphorus, 1.9% calcium, and 0.3% sodium. The fish feeding was conducted according to the protocol of PAL Anlagenbau GmbH (Abtshagen, Germany) and was adjusted to 50% of a commercial African catfish farm.

4.2.3. Plant Cultivation

The watered seeds of *Ocimum basilicum* were sown in seed coats with a substrate of peat, perlite, and coconut fibers (Eazy Plug, Goirle, The Netherlands) on 2 March 2020 and placed in seedling trays. On 22 March 2020, 63 randomly selected plants with an average height of 6.56 cm and 3.5 leaves were transplanted into the grid pots of the hydroponic subsystems. Supplemental lighting from high-pressure sodium lamps (400-watt MASTER SON-T, Philipps, Amsterdam, The Netherlands) was automatically switched on between 06:00 a.m. and 22:00 p.m. when greenhouse light intensities fell below 10.00 klx. The plants were illuminated with 14.50 klx and supplemented with a photosynthetic photon flux density (PPFD) of 270 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. No fertilizer was added.

The following parameters were examined 39 days after the plants were transplanted into the hydroponic subsystems (30 April 2020): total wet weight (g), total height (cm), leaf mass wet weight (g),

number of leaves no longer than 3 mm (No.), shoot axis wet weight (g), shoot axis height (cm), root wet weight (g) and root length (cm). The weights (g), lengths (cm), widths (cm), chlorophyll content, and colorimeter index of the leaves were determined using the mean values of the two leaves of the third upper shoot node. Chlorophyll content was measured using a SPAD (Soil Plant Analysis Development) meter (SPAD-502PLUS, Konica Minolta, Inc., Marunouchi, Japan). The colorimeter index was determined using a colorimeter (PCE-CSM 2, PCE Deutschland GmbH, Meschede, Germany). After data acquisition, the samples were dried for 72 h at 60 °C and then for 2 h at 120 °C in a drying oven (UF750 plus, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany). Subsequently, the total dry weight (g) and the dry mass of leaves (g), shoots (g), and roots (g) of all plants were determined. Once a week, the number of leaves (No.) and shoot height (cm) were measured.

4.2.4. Physicochemical Parameters

Physical water parameters were taken from the pump sump of the hydroponics unit on the weekdays by using a HQ40d multimeter (Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Germany). Oxygen saturation (%), oxygen concentration (mg/L), water temperature (°C), pH value, conductivity (µS/cm), redox potential (mV), and salinity (‰) were measured. Water samples from the pump sump were taken Tuesdays and Fridays before the water exchange and analyzed with the Gallery™ Analyzer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) to determine the concentrations of the following chemical parameters: ammonium (NH₄⁺), nitrite (NO₂⁻), nitrate (NO₃⁻), phosphate (PO₄³⁻), potassium (K⁺), magnesium (Mg²⁺), calcium (Ca²⁺), iron (Fe²⁺), and sulfate (SO₄³⁻). TON (total oxidized nitrogen) as N and nitrate (calculation: TON-nitrite) was analyzed by using the colorimetric hydrazine method (template: D08896_01© 2015 Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA USA). Nitrate was reduced to nitrite using hydrazine under alkaline conditions. The total nitrite ions were converted to a pink azo dye by using *N*-1-naphthylethylenediamine dihydrochloride and sulfanilamide under acidic conditions. The absorbance was determined at 540 nm and related to the TON concentration by means of a calibration curve.

4.2.5. Mathematical and Statistical Analysis

The fish data were collected on 13 March 2020 and 49 days later on 1 May 2020. The total weight and the number of fish per tank, as well as three animals per tank, were measured individually. Feed conversion ratio (FCR, Equation (1)), the specific growth rate (SGR, 2), the biomass increase, the condition factor (C, 3), the percentage growth (G, 4), and the total color difference ($\Delta E_{x,y}$, 5) between plants of the different systems by using the L*a*b coordinates were calculated as follows:

$$\text{FCR} = \text{fish feed quantity (kg)} / \text{weight gain (kg)} \quad (1)$$

$$\text{SGR (\%/day)} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100 \quad (2)$$

where W_t = final biomass (kg); W_0 = initial biomass (kg); t = time in days.

$$C = (W \times 100) / L^3 \quad (3)$$

where W = fish weight (g); L = fish length (cm).

$$G = \text{Growth fish weight class} \times (\%) = (F_x - I_x) \times 100 / I_x \quad (4)$$

where F_x = final weight, fish weight class x ; I_x = initial weight, fish weight class x .

$$\Delta E_{x,y} = ((L_x - L_y)^2 + (a_x - a_y)^2 + (b_x - b_y)^2) \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

where L = difference in lightness and darkness (higher value = light); a = difference in red and green (higher value = red); b = difference in yellow and blue (higher value = yellow); x = color coordinate of system x ; y = color coordinate of system y .

Statistical analysis was performed for all plant growth and physico-chemical parameters and the following fish growth parameters: initial and final fish length (cm), fish mass (g), tank mass (kg), feed conversion ratio (FCR), specific growth rate (SGR), condition factor (C), and growth per tank (kg and %).

Microsoft Excel® 2010 (Microsoft, 2010) and the SPSS® 23 software package (IBM, 2019) were used for data processing and analysis. Normally distributed data were processed with One-Way Analysis of Variance (ANOVA), and at variance homogeneity, multiple mean comparisons were performed post hoc using Tukey-HSD (Honestly Significant Difference) test. For variance-inhomogeneous data, the Dunnett-T3 test was used. For non-normal distribution, the nonparametric Kruskal–Wallis test was applied. The significance level remained at $p < 0.05$.

4.3. Results

4.3.1. Fish Growth

The initial mean lengths were 56.93 cm (fish weight class 1, large fish), 48.10 cm (class 2, medium), and 17.33 cm (class 3, small), and the final mean lengths were 57.43 cm, 53.26 cm, and 27.81 cm (Table 4.1), respectively. The initial fish weights of the three fish weight classes were 1266.68 g (large, total tank biomass of 148.00 kg), 838.46 g (medium, 100.71 kg), and 42.78 g (small, 5.13 kg), respectively. The final fish weights were 1571.48 g (182.74 kg), 1147.13 g (133.44 kg), and 133.24 g (15.63 kg), respectively.

Table 4.1. Growth parameters (means \pm SD) of African catfish of different weight classes (class 1 = large fish, class 2 = medium fish, class 3 = small fish) held in the intensive aquaculture unit (IAU) (49 days); different letters represent significant differences between the groups ($p < 0.05$).

Parameters	Weight Class 1	Weight Class 2	Weight Class 3	P-I 1	P-II 1	P-III 1
Fish initial length (cm)	56.93 \pm 1.38 a2	48.10 \pm 1.81 b	17.33 \pm 1.58 c	0.001	0.001	0.001
Fish final length (cm)	57.43 \pm 3.01 a	53.26 \pm 1.98 b	27.81 \pm 1.28 c	0.001	0.001	0.001
Fish initial weight (g)	1266.68 \pm 86.46a	838.46 \pm 17.66 b	42.78 \pm 0.69 c	0.023	0.003	0.001
Fish final weight (g)	1571.48 \pm 44.06 a	1147.13 \pm 11.52 b	133.24 \pm 2.20 c	0.005	0.001	0.001
Tank initial mass (kg)	148.00 \pm 3.69 a	100.71 \pm 2.29 b	5.13 \pm 0.08 c	0.001	0.001	0.001
Tank final mass (kg)	182.74 \pm 1.71 a	133.44 \pm 3.21 b	15.63 \pm 0.30 c	0.001	0.001	0.001
Growth per tank (kg)	34.74 \pm 2.00 a	32.73 \pm 1.07 a	10.50 \pm 0.25 b	0.226	0.001	0.001
Growth per tank (%)	23.50 \pm 1.93 c	32.73 \pm 0.65 b	204.56 \pm 4.29 a	0.020	0.001	0.001
Feed conversion ratio (FCR) 3	1.27 \pm 0.09 a	1.17 \pm 0.03 a	0.84 \pm 0.02 b	0.132	0.001	0.001
Specific growth rate (%/day) 3	0.45 \pm 0.03c	0.60 \pm 0.01 b	2.37 \pm 0.03 a	0.001	0.001	0.001
Condition factor (C)	0.83 \pm 0.10a	0.76 \pm 0.07 a	0.81 \pm 0.15 a	0.447	0.931	0.665

¹ Significances, with P-I = between fish weight class 1 and 2, P-II = between weight class 1 and 3, P-III = between weight class 2 and 3. ² Means in each row followed by the same superscript letters indicate no significant differences among the fish growth parameters. Means with different letters are statistically different, in that the mean with the lower alphabetical order letter (e.g., a > c) has a mean statistically greater than the mean it is compared to. ³ FCR and specific growth rate based on tank biomasses: n = 3.

The growth per tank for fish weight class 1 was 34.74 kg or 23.50%. Class 2 had 32.73 kg, 32.73%, and class 3 had 10.50 kg with an increase of 204.56%. The FCR was highest for large fish (1.27), followed by medium fish (1.17) and small fish (0.84). For SGR, fish weight class 1 had 0.45%/day, class 2 0.60%/day, and class 3 2.37%/day. The condition factor was highest for the fish weight class 1 with 0.83, followed by class 3 (0.81) and class 2 (0.76).

4.3.2. Plant Growth

The growth of *O. basilicum* showed plant-typical exponential growth. The total wet weight was similar in the DRF (46.80 g) and raft (44.28 g) and significantly higher in AERO (62.29 g) (Table 4.2, Figure 4.4). The total height was just above 70 cm in all plants. Leaf mass wet weight was similar in the DRF (20.19 g) and raft (20.35 g), while AERO had almost 40% more leaf biomass (28.53 g). There was no significant difference in the number of leaves, although AERO (119.45 leaves) had more leaves than the DRF (102.25 leaves) and raft (101.33 leaves) (Figure 4.5).



Figure 4.4. Average basil plants at the end of the experiment with visibly longer and finer roots and similar shoot growth performance in DRF (left) and raft (middle). Short but compact root growth and a better shoot growth performance in AERO (right).

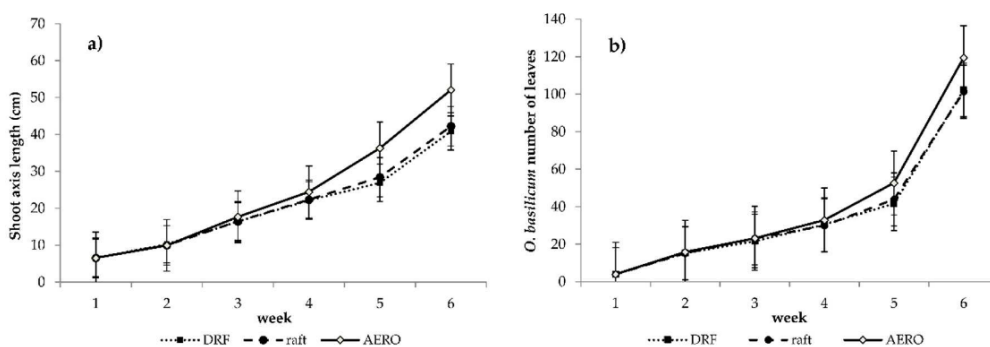


Figure 4.5. Weekly increase of (a) shoot axis length (cm) and (b) number of leaves of *Ocimum basilicum* in DRF, raft, and AERO hydroponic subsystems over the trial period (39 days). From the fourth week of the experiment, the AERO system showed increased growth performance.

Table 4.2. Growth parameters (means \pm SD) wet and dry mass of *Ocimum basilicum* in the three hydroponic subsystems (dynamic root floating technique: DRF, floating raft culture: raft, aeroponics: AERO) at the end of the experiment (39 days); different letters represent significant differences between the groups ($p < 0.05$, $n = 21$). The third part of the table shows total and leaf mass of *Ocimum basilicum* (wet and dry) produced by one system over the experimental period without statistical comparison. The last two parts show the color differences of the plants from the colorimeter indexes L^*a^*b and the total color differences between the systems.

Growth Parameters	DRF	Raft	AERO	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
Total wet weight (g)	46.80 \pm 13.78 ^{b2}	44.28 \pm 13.19 ^b	62.20 \pm 17.01 ^a	0.694	0.002	0.007
Total height (cm)	70.38 \pm 10.40 ^a	70.62 \pm 10.46 ^a	70.96 \pm 6.81 ^a	0.996	0.979	0.993
Leaf mass wet weight (g)	20.19 \pm 6.57 ^b	20.35 \pm 7.14 ^b	28.53 \pm 8.74 ^a	0.997	0.003	0.003
Leaves (No.)	102.25 \pm 23.67 ^a	101.33 \pm 29.42 ^a	119.45 \pm 29.55 ^a	0.994	0.131	0.100
Shoot axis wet weight (g)	12.48 \pm 4.20 ^b	12.22 \pm 3.92 ^b	17.93 \pm 5.51 ^a	0.996	0.004	0.002
Shoot axis height (cm)	40.81 \pm 5.48 ^b	42.22 \pm 7.29 ^b	52.04 \pm 6.83 ^a	0.772	0.001	0.001
Root wet weight (g)	14.13 \pm 3.74 ^a	11.71 \pm 2.90 ^b	15.72 \pm 4.24 ^a	0.031	0.364	0.002
Root length (cm)	29.58 \pm 6.44 ^a	28.41 \pm 6.11 ^a	18.80 \pm 5.00 ^b	0.800	0.001	0.001
Leaf wet weight (mg) ³	696.83 \pm 143.47 ^b	704.62 \pm 138.11 ^b	789.33 \pm 159.41 ^a	0.927	0.031	0.036
Leaf length (cm) ³	7.31 \pm 0.69 ^b	7.35 \pm 0.72 ^b	7.89 \pm 0.74 ^a	0.820	0.005	0.010
Leaf width (cm) ³	4.81 \pm 0.59 ^b	4.79 \pm 0.52 ^b	5.14 \pm 0.52 ^a	0.928	0.017	0.020
Leaf SPAD-Value ³	37.00 \pm 2.86 ^a	33.58 \pm 3.15 ^b	36.58 \pm 4.08 ^a	0.006	0.921	0.019
Dry Weight Parameters	DRF	Raft	AERO	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
Total dry weight (g)	5.20 \pm 1.63 ^b	4.96 \pm 1.78 ^b	7.60 \pm 2.21 ^a	0.913	0.001	0.001
Leaf mass dry weight (g)	2.83 \pm 0.90 ^b	2.84 \pm 1.04 ^b	4.26 \pm 1.23 ^a	0.999	0.001	0.001
Shoot axis dry weight (g)	1.55 \pm 0.50 ^b	1.45 \pm 0.55 ^b	2.26 \pm 0.75 ^a	0.848	0.001	0.001
Root dry weight (g)	0.82 \pm 0.36 ^b	0.67 \pm 0.27 ^b	1.08 \pm 0.38 ^a	0.336	0.047	0.001
Total Weight Parameters ⁴	DRF	Raft	AERO			
Total wet mass (g)	935.90	929.90	1244.00	-	-	-
Wet mass of leaves (g)	403.80	427.40	570.60	-	-	-
Total dry mass (g)	103.95	104.10	151.99	-	-	-
Dry mass of leaves (g)	56.55	59.65	85.24	-	-	-
Colorimeter Index ⁵	DRF	Raft	AERO	P-I ¹	P-II ¹	P-III ¹
L	42.96 \pm 1.89 ^a	44.36 \pm 1.95 ^a	44.24 \pm 2.33 ^a	0.084	0.134	0.983
a	-13.46 \pm 0.82 ^a	-14.11 \pm 0.71 ^b	-13.60 \pm 1.03 ^{ab}	0.045	0.861	0.150
b	23.89 \pm 2.04 ^b	25.56 \pm 1.59 ^a	25.41 \pm 2.01 ^a	0.017	0.039	0.965
Color Difference ($\Delta E_{x,y}$)	$\Delta E_{DRF,raft}$ ⁶	$\Delta E_{raft,AERO}$ ⁶	$\Delta E_{DRF,AERO}$ ⁶			
	2.59	0.15	1.98	-	-	-

¹ Significances, with P-I = between DRF and raft, P-II = between DRF and AERO, P-III = between raft and AERO. ² Means in each row followed by the same superscript letters indicate no significant differences among the fish growth parameters. Means with different letters are statistically different, in that the mean with the lower alphabetical order letter (e.g., a > c) has a mean statistically greater than the mean it is compared to. ³ Measured on the leaf of the third upper shoot node. ⁴ Total weight parameters calculated as the sum of all individual plants of the respective experimental group. ⁵ L = difference in lightness and darkness (higher value = light), a = difference in red and green (higher value = red), b = difference in yellow and blue (higher value = yellow). ⁶ Total color difference with $\Delta E_{DRF-raft}$ = between DRF and raft, $\Delta E_{raft-AERO}$ = between raft and AERO, $\Delta E_{DRF-AERO}$ = between DRF and AERO.

Shoot axis wet weight and shoot axis height differences were not significant in the DRF (12.48 g; 40.81 cm) and raft (12.22 g; 42.22 cm) and were significantly higher in AERO (17.93 g; 52.04 cm) (Figure 4.5). The root wet weight showed no statistical difference in the DRF (14.13 g) and AERO (15.72 g), but was significantly higher than in the raft (11.71 g). The root length was again similar in the DRF (29.58 cm) and raft (28.41 cm) and significantly longer than AERO (18.80 cm) (Figure 4.6). An average leaf of the third node (leaf 3) was similar in weight, length, and width for the DRF (696.83 mg; 7.31 cm; 4.81 cm) and raft (704.62 mg; 7.35 cm; 4.79 cm). AERO showed statically heavier and longer leaves in the three parameters than the other two systems (789.33 mg; 7.89 cm; 5.14 cm). The SPAD value in the DRF (37.00) and AERO (36.58) was significantly higher than in the raft (33.58).



Figure 4.6. Roots of *O. basilicum* at the end of the experiment: (a) DRF system with roots growing in 5 cm airspace; (b–d) roots of the aeroponics system are shorter and tangled but with more lateral roots.

Plants in AERO were significantly higher in all four dry weight parameters than in the other two systems. With a total weight of 7.60 g, leaf mass 4.26 g, and shoot axis 2.26 g, AERO was, in each case, more than 45% above the values for the DRF (total 5.20 g, leaf mass 2.83 g, and shoot axis 1.55 g) and raft (4.96 g, 2.84 g, 1.45 g). The root dry weight of AERO with 1.08 g was more than 61% heavier than the raft (0.67 g) and about 32% heavier than the DRF (0.82 g). Figure 4.6 illustrates the different root growth in the subsystems.

The third part of Table 4.2 shows the summed total weights of the three systems without statistical comparison. With 1244.00 g, AERO produced more than 32% or 300 g more wet mass than the DRF and raft, which is almost the total output of a single channel. A similar calculation is given for the total mass of the leaves, where the DRF produced more than a third more leaves each, with 570.6 g. Regarding the total and leaf dry mass, AERO produced between 40 and 50% more biomass than the DRF and raft.

The last two parts of Table 4.2 show that AERO and raft had no difference in leaf color, but the DRF showed significant differences to both other systems.

4.3.3. Physicochemical Parameters

The average oxygen concentration during the experiment was 8.3 mg/L at an oxygen saturation of 101.2%. The development of the temperature and the EC (Electric Conductivity) value is shown in Figure 4.7. The water temperature was 26.2 °C at the beginning, dropped to 21.1 °C over the following 10 days, and stabilized at 27–28 °C at the end. The average water temperature was 26.0 °C. The conductivity increased steadily from 1530.7 to 2780.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ during the experiment and averaged 2131.3 $\mu\text{s}/\text{cm}$. The mean pH was 6.4 but was above 7.0 at the beginning, decreased continuously, and was 6.0 at the end. Mean

redox potential was 163.5 mV and mean salinity 1.1‰. The average room temperature and humidity were 19.9 °C (min 8.3 °C, max 30.6 °C) and 40.6% (min 6.8%, max 73.7%), respectively.

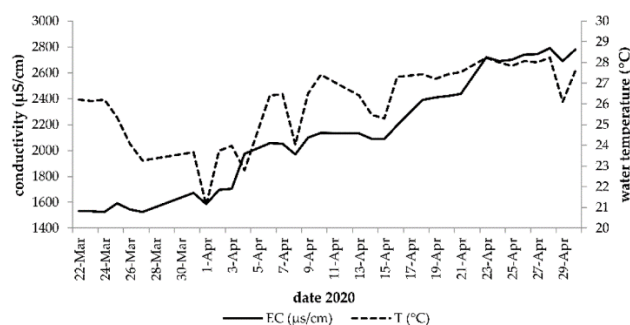


Figure 4.7. Electric conductivity (µS/cm) and water temperature (°C) increase during the experiment.

The mean nitrate–nitrogen concentration ($\text{NO}_3\text{-N}$) was 164.54 mg/L and nitrite–nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$) 0.01 mg/L, which resulted in a concentration of 164.55 mg/L total oxidized nitrogen (TON). With an ammonium–nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) concentration of 0.05 mg/L, this results in an average concentration of 164.60 mg/L of total dissolved nitrogen (TDN). Further nutrient concentrations were: orthophosphate 20.38 mg/L, potassium 11.08 mg/L, magnesium 18.03 mg/L, calcium 262.83 mg/L, iron 0.05 mg/L, and sulfate 49.05 mg/L.

4.4. Discussion

4.4.1. Fish Growth

The African catfish showed very good growth parameters during the experiment. At a feeding rate of 50% of a commercial fish farm, the FCR values of 1.27 (fish weight class 1; initial weight 1267 kg), 1.17 (class 2; 0.839 kg), and 0.84 (class 3; 0.043 kg) were within the expected range. Comparable values were described in an experiment with *C. gariepinus* and *O. basilicum*, where a low-protein diet (31%) resulted in FCRs of 1.11–1.25 and a high-protein diet (40%) in FCRs of 0.97–1.30 for fish with initial weights of 81.2 g and 188.1 g, respectively (Pantanella, 2012). At feeding rates of 25%, *C. gariepinus* showed FCR values of 2.40; 1.43; 0.94 (class 3; 2; 1) (Pasch et al., 2021a), and 2.69; 1.23; 0.97 (Zimmermann, 2017), while feeding rates of 80% resulted in significantly improved FCRs of 0.97; 0.87; 0.72 (Pasch, 2018), and 0.91; 0.84; 0.74 (Knaus, 2020a). The good FCR values obtained from 80% feeding rates were also reported for homogeneous low-weight fish (83.0 ± 8.2 g) with an FCR of 0.80 and homogeneous medium-weight (140.2 ± 8.7 g), homogeneous heavy-weight (198.0 ± 8.1 g), and a heterogeneous group (139.7 ± 48.4 g) with FCRs of 0.90 each (Martins et al., 2005).

The specific growth rate (SGR (%/day)) of 0.45; 0.60; 2.37 (class 1; 2; 3) was also in a good range, confirming that smaller fish grows much faster than larger fish, which have a greater absolute requirement of energy for maintenance (Hepher, 1988). Comparative SGR values were described for fish with a lower initial weight (365 g) where a 38.7% protein diet resulted in an SGR of 0.60%/day and a 31.3% protein diet in an SGR of 0.40%/day (Degani et al., 1988). The condition factor (C) of 0.83; 0.76; 0.81 demonstrates that the fish were proportionally heavier than, for example, at a 25% feeding rate (0.70; 0.69; 0.67) under similar conditions (Pasch et al., 2021a), and thus were in a better physiological state (Anene, 2005). The results show that higher feeding rates result in better FCR, SGR, and C values. Under intensive stocked conditions, however, low pH values and high nutrient loads (higher EC value) can be expected under heavy feeding.

4.4.2. Physicochemical Parameters

The physical and chemical parameters showed mostly sufficient values for plant growth (Table 4.1). The water temperature of 26.0 ± 1.9 °C was slightly above the optimal value for basil growth of 20.0–25.0 °C (Walters & Currey, 2015; Saha et al., 2016) but still under the recommended maximum of 30.0 °C (Somerville et al., 2014). In principle, the pH value of 6.4 ± 0.5 was also in the upper tolerance range of 5.5–6.5 for soilless culture (Somerville et al., 2014), but it was problematic that the pH did not remain constant and ranged between 5.92–7.44 during the experiment, thus worsening the availability of some nutrients for the plants (Somerville et al., 2014, Saaid et al., 2015). The electrical conductivity (EC) of 2131.3 ± 449.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ was within a range with good basil yields in hydroponics (Wortman, 2015), while recommended EC ranges can greatly differ from 300 to 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Rakocy et al., 2006; Morano et al., 2017). However, the EC value was also lowest at the beginning of the experiment, and therefore, lower nutrient concentrations were present. For a more precise analysis of the EC value, the individual nutrient concentrations must be examined; the total dissolved nitrogen (TDN) levels, with 164.60 mg/L (with nitrogen nitrate 164.54 mg/L), calcium 262.83 mg/L, and sulfate (49.05 mg/L), were in a good or acceptable concentration range (Bittsanszky et al., 2016; Trejo-Télez & Gómez-Merino, 2012). The nitrite concentration was 0.01 mg/L and the ammonium concentration 0.05 mg/L, which indicates that the nitrification process of the aquaculture unit's biofilter worked very well (Tyson et al., 2011). Furthermore, high nitrate/ammonium ratios, as in this experiment ($\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$; 164.54/0.05), have positive effects on plant growth (Frerichs et al., 2017). Acceptable concentrations of phosphate 20.38 mg/L and magnesium 18.03 mg/L were present (Bittsanszky et al., 2016), whereby pH values below 7 may have led to a constant reduction in the availability of these two nutrients (Somerville et al., 2014). As is often observed in aquaponics, the bottlenecks were mainly potassium with 11.08 mg/L and iron with 0.05 mg/L (Bittsanszky et al., 2016; Pasch et al., 2021a), which were considerably lower than the recommended ranges of about 262 mg/L potassium and about 2 mg/L iron (Morano et al., 2017). The too-high pH value at the beginning of the experiment further worsened the uptake of the too-low iron concentration, leading to, along with the lack of potassium, typical deficiency symptoms, such as yellow coloring of the leaves and even necrosis (López-Millan et al., 2013). Nutrient deficiencies should be strictly avoided, e.g., by using fertilizers, because they make the plants vulnerable to diseases and can considerably reduce the yield (Lucena, 2006; Hafsi et al., 2014). The decrease of the pH value and the simultaneous increase of the electrical conductivity significantly improved the health and appearance of the plants as the experiment proceeded. For professional growth and final evaluation, the experiment should be replicated under commercial conditions with pH monitoring and sufficient nutrient addition.

4.4.3. Plant Growth

Basil growth showed significant differences in the three hydroponic subsystems. Of the 16 investigated parameters (without colorimeter indexes), aeroponics (AERO) performed significantly better ($p < 0.05$) than the DRF in 11 and better than the raft in 13 parameters (Table 4.2). The total wet weight (62.20 g) in AERO was 33% higher than the DRF (46.80 g) and 40% better than raft (44.28 g). AERO also produced heavier (789.33 mg), longer (7.89 cm), and wider leaves (5.14 cm). This resulted in a total leaf biomass in wet and dry weight of 28.53 ± 8.74 g and 4.26 ± 1.23 g, which, however, was similar in the DRF (20.19 ± 6.57 g; 2.83 ± 0.90 g) and raft (20.35 ± 7.14 g; 2.84 ± 1.04 g). In another herb experiment with valerian (*Valeriana officinalis*), aeroponics produced less biomass and leaf area than the floating raft and substrate culture systems, whereby it was suspected that the higher proliferation of roots within the frame might have reduced the performance of the nozzles (Tabatabaei, 2008). An aeroponic experiment with sweet basil

demonstrated that the plants with less root zone volume at a canal growth depth of 15 cm and 30 cm resulted in higher dry biomass production, plant heights, and leaves per plant due to better nutrient availability and uptake compared with a depth of 70 cm (Salachas, 2015). The results show that limited space inside the aeroponic channels has a decisive effect onto plant growth, but that this space must ensure sufficient nozzle performance in the case of strong root growth. In the present experiment, the relatively small root zone volume within an aeroponic channel with a depth and width of 12 cm each has increased the economically important leaf productivity (wet and dry mass) in AERO by more than 40% compared to the DRF and raft.

The DRF system showed only two differences to raft in root wet weight and SPAD but otherwise showed almost identical growth. This is best illustrated by the summed total weight (wet; dry) of all individual plants of the respective experimental group, where AERO clearly performed best (1244.00 g; 151.99 g), and the DRF (935.90 g; 103.95 g) and raft (929.90 g; 104.10 g) produced almost identical total biomasses (Table 4.2). In a preliminary experiment during summer, the DRF system performed significantly better than the raft (82.02 g; 34.94 g) in economically important growth parameters such as total wet weight and leaf mass wet weight (107.70 g; 45.36 g) at an average water temperature of 28.0 ± 2.4 °C with peaks of almost 35.0 °C (Pasch et al., 2021a). The DRF system was originally developed to maintain root activity during the summer season under high temperatures (Kao & Hsiang, 1991). However, since the average water temperature of 26.0 °C cannot be considered too high (Kao & Hsiang, 1991, Somerville et al., 2014), similar growth was expected in the raft and DRF during this experiment. In contrast, the highest SPAD values (chlorophyll content) were found in the DRF (37.00) and AERO (36.58), and both were significantly higher than the raft (33.58). In a basil (*Ocimum basilicum*) study with different fertilizers, the basil plants in the control group had a SPAD value of 32.02, and the fertilized plants ranged from 35.18–43.87 (Teliban et al., 2020). Present values show that chlorophyll content of raft was similar to unfertilized plants while the DRF and AERO were comparable to fertilized basil. The aero roots in the DRF and AERO may have altered the plant availability of nitrogen, as chlorophyll is a nitrogen-containing molecule (Sifola & Barbieri, 2006).

The total basil length showed no differences in the three systems with just over 70 cm, but it must be considered that AERO has a significantly higher shoot/root ratio with a longer shoot axis (52.04 cm) and smaller roots (18.80 cm) than the DRF (40.81 cm; 29.58 cm) and raft (42.22 cm; 28.41 cm) (Table 4.2). At a comparable growth time of 6 weeks, an interim evaluation determined similar plant sizes in an experiment where basil grown in an aquaponic raft system averaged about 53 cm in height, while basil grown in a hydroponic raft system measured only about 32 cm (Saha et al., 2016). With a considerably longer growth period of 12 weeks, substrate-grown basil (*O. basilicum*), fertilized with seaweed extracts, had a maximum height of 49.2 cm (control 46.6 cm) (Elansary et al., 2016). It is noteworthy that despite the roots in AERO being over 50% shorter than the other two systems, they formed 32% more dry weight (1.08 g) compared with the DRF (0.82 g), and were 61% heavier than raft (0.67 g). A closer look at the roots (Figure 4.4 and Figure 4.6) reveals that the roots in the AERO system have an altered morphology. Basil grown in soil usually has a central taproot and many horizontally developing hairy roots (Ekren et al., 2012). The plants grown in the DRF and raft formed a large number of long, thin, fibrous-looking roots instead of a central taproot. In contrast, the AERO roots were strongly fused, which makes the overall appearance much more compact. In addition, the root base showed an increased occurrence of thickened, first-order lateral roots. The main function of lateral roots is anchoring, which increases water uptake and facilitates nutrient extraction (56). Aeroponics seems to accelerate the plants' ability of first-order lateral root development and rapid root induction, and has therefore repeatedly proven its suitability for the clonal propagation of

a wide variety of plants such as tomatoes (*Solanum lycopersicum*), potatoes (*Solanum tuberosum*), and peppers (*Capsicum* spp.), as well as medicinal plants (Mehandru et al., 2014; Sharma et al., 2018; Valle-Echevarria et al., 2019). Better root growth was also reported in an experiment with lettuce, in which aeroponics formed a significantly higher root biomass compared with NFT and substrate culture. However, unlike the present experiment, this did not result in increased shoot growth (Li et al., 2018). In contrast, in potato (*Solanum tuberosum*) seed tuber production, plants in aeroponics had significantly more root vitality, shoot fresh and dry weight, and total leaf area than in aero-hydroponics and deep-water culture (Chang et al., 2012). Due to the significantly better basil growth parameters in the AERO system, it can be assumed that the altered root morphology and larger root biomass triggered by the AERO treatment resulted in better nutrient uptake and, thus, in improved growth of the above-ground parts of the plants. Further studies should investigate which other plant species respond with increased shoot growth to the aeroponic treatment.

Aeroponics is not only capable of inducing enhanced growth in certain plant species, but the technique itself is also superior in terms of disease vulnerability, water, time and space requirements, and large-scale plant production (Kumari & Kumar, 2019). The biggest challenge for future commercial applications of aeroponics in aquaponics is finding the right balance between the filter stage of the fish process water and the nozzle and droplet size. The herewith utilized original aeroponics system (GHE AeroFlo40 system) had a too-large droplet size and thus could not spray all areas in the AERO channels sufficiently and evenly with the nutrient-enriched process water. Thus, it was modified and tested with different and finer nozzle sizes. If the nozzles are too small, they clog due to the suspended solids in the fish process water, and if the final filter stage is too fine, the filters clog too quickly and require continuous maintenance. Under both scenarios, there is a risk that the roots would dry out due to undersupply. Future research should focus on finding the right balance between the best nozzle and droplet size and economically reasonable filter stages.

4.5. Conclusions

This study investigated the growth of basil (*Ocimum basilicum*) by using the process water from intensive cultivation of African catfish (*Clarias gariepinus*) in three hydroponic subsystems: AERO, DRF, and raft. AERO produced shorter but heavier roots in dry weight (18.80 cm; 1.08 g) compared with the DRF (29.58 cm; 0.82 g) and raft (28.41 cm; 0.67 g). AERO also performed better in the growth of the above-ground plant parts, such as shoot axis height (52.04 cm), than the DRF (40.81 cm) and raft (42.22 cm), and also had a 40% better economically important leaf wet and dry weight (28.53 g; 4.26 g) compared with the DRF (20.19 g; 2.83 g) and raft (20.35 g; 2.84). Total biomass was highest in plants cultured in the AERO hydroponic subsystem in wet and dry weight (1244.00 g; 151.99 g) compared to the DRF (935.90 g; 103.95 g) and raft (929.90 g; 104.10 g). Overall, AERO performed significantly better than the DRF and/or raft in 13 of 16 examined parameters, while the DRF and raft were almost identical (AERO > DRF = raft). We suggest that aeroponics is so far underestimated and, due to the outstanding productivity coupled with the resource-saving principle of aquaponics, its application can be considered as a food production system of the future. For the large scale-commercial application of aeroponics in aquaponics (s.s.), the addition of fertilizer is required to cope with deficient potassium and iron. Technologically, future research focus must be placed on finding the best suitable filter systems and nozzle sizes that match the applied fish process water. Floating raft culture systems are particularly suitable for domestic or semi-commercial basil production due to the simple construction, and can be used in areas with no water shortages or where the water use does not result in high operational costs due to the higher water demand. The DRF system is especially useful under high water temperatures and tropical conditions.

5. Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany ⁸

Abstract

A farmland based African Catfish recirculation aquaculture system with a production volume (PV) of 300 m³ was modelled under realistic market conditions in order to analyse the impact of price fluctuations on profitability. As a monoculture recirculating aquaculture system (RAS) for whole fish and the wholesaler's market, the model northern German catfish aquaculture is currently gainless, but the production is sufficient to cover all costs. The most decisive economic parameter is the low selling price (2.20 EUR/kg whole fish), which affects the returns by ±70,463 EUR/year for every ten percent (0.22 EUR) price change. Among the variable costs, feed has by far the largest impact with a share of 61.4% (42.1% of total costs). Based on the initial model every ten percent price variation of this variable input factor changes the returns by ±29,691 EUR/year, followed by energy (±5913 EUR/year), fingerlings (±4804 EUR/year), wages (±3972 EUR/year) and water (±2464 EUR/year). Larger system sizes (600 m³ PV) significantly save costs due to economies of scale and achieve returns of 175,240 EUR/year and an ROI of 11.45%. Increasing max. stocking density from 450 kg/m³ to 550 kg/m³ improves returns and ROI (40,379 EUR/year; 4.40%), but also involves higher production risks. An own fingerling production with a production of 300% above the own requirements improves returns and ROI (39,871 EUR/year; 3.57%) and leads, above all, to independence from foreign suppliers. Aquaponic integrations can generate profits, but are associated with high investment costs and the challenges of entering a new business sector. Product diversification into fillet (50% of the production) and smoked fillet (30%) generates lucrative returns and ROI (212,198 EUR/year; 20.10%). Profitability is further increased by direct marketing in the form of a farm store and the establishment of a regional "producer organisation". Our results demonstrate that under current market conditions northern German catfish aquaculture covers all costs, mainly increasing profitability through altered sales prices and feed costs. Retaining a larger part of the fishery value chain within the farm through additional benefits, further processing and product diversification improves profitability, making African catfish RAS a sustainable and economically profitable aquaculture business in Germany.

Keywords

Aquaculture; Aquaponics; Economies of scale; RAS; Profitability; ROI; Value chain

⁸ Dieser Artikel wurde publiziert unter: Pasch, J., Palm, H. W. (2021) Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany. *Sustainability*; 13(24):13569.

5.1. Introduction

Global aquaculture production has increased significantly by 193% from 1999 (41 mil. tons/year) to 2019 (120 mil. tons/year), with the majority of the production (91.6%) coming from Asian aquaculture (FAO, 2021a). Europe had a small share of global aquaculture (2.7%) in 2017 with an annual growth rate of 2.27% per year since 2000 (Tacon, 2020). The past years European Aquaculture growth is stagnating in many countries (FAO, 2020a), also in Germany (BMEL, 2021). This is despite the fact that the European Commission is seeking for new solutions increasing sustainable aquaculture production inside the member states (European Commission, 2021b). Recirculation aquaculture systems (RAS) have been recognised as an alternative to open water and netcage aquaculture, enabling higher stocking densities, reducing water consumption and controlling nutrient and wastewater release (Martins et al., 2006; Badiola et al., 2012). With a yearly production volume of 23,000 tons in 2018, European RAS always had stable shares between 1.5–2% of the total production volume since 2009 (EUMOFA, 2020). In combination with plant production, so called aquaponics can be considered a contemporary and ecologically sustainable agricultural production system that supports the development of a recycling economy (Palm et al., 2018b). It can be integrated into the existing value chains, either coming from the aquaculture or the plant production side.

While the intensive production of salmonids in RAS has been established in Scandinavia, Denmark (Jokumsen & Svendsen, 2010; Asche et al., 2013) and Poland (Summerfeldt et al., 2015), more challenging species such as pikeperch (*Sander lucioperca*) are still under development (FAO, 2021b). Successful RAS of African catfish (*Clarias gariepinus*) in Europe has been developed in the Netherlands and also introduced to Germany and other European countries (FAO, 2021c). Combined with alternative energies and cheap warm water sources, e.g., from biogas plants (Schmidt-Puckhaber, 2010), commercial production of *C. gariepinus* in warm water RAS has increased in Germany notably by 221% between 2011 (319 t/year) (Palm et al., 2018b) and 2020 (1025 t/year) (Destatis, 2021). African catfish RAS has the advantage that *Clarias gariepinus* can be cultivated under high stocking densities (Hengsawat et al., 1997; Hossain et al., 1998; van de Nieuwegiessen et al., 2009), reaches survival rates above 90% (Pasch et al., 2022, submitted) and can withstand adverse water conditions (Schram et al., 2010; Roques et al., 2015). Therefore, the combination of African catfish and RAS is applicable under regular farming conditions, reducing costs of energy and water as well as reutilising the nutrient enriched solids and wastewater on the farm.

African catfish products reach quality attributes of fillets superior to other catfish species such as European catfish (*Silurus glanis*), African catfish hybrid (*Heterobranchus longifilis* x *Clarias gariepinus*) distributed under the brand name Claresse® and Pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) (Wasenitz et al., 2018). This is nowadays recognised also on German markets, seeking new investments into African catfish RAS and further increasing production capacity. In addition, several studies demonstrated that African catfish effluents can be used in aquaponics to produce valuable plant products such as basil (*Ocimum basilicum*) (Knaus et al., 2020a; Pasch et al., 2021a, b), mint (*Mentha spicata*) (Knaus et al., 2020b) and pumpkin (*Telfairia occidentalis*) (Oladimeji et al., 2020). However, the development of African catfish farms in Germany were primarily promoted by the European Maritime and Fishery Fund (EMFF) (European Commission 2021c) in the form of investment subsidies of up to 49%, but were also supported by the Renewable Energy Law (EEG), where the use of warm water from biogas production inside the RAS was compensated with an additional subsidy (Combined Heat and Power bonus – CHP) (Umweltbundesamt 2021; BMWI 2021). The different market conditions, locations and policies, but also reports about RAS unprofitability (BMEL, 2021; Engle et al., 2020) and whitewashed figures of plant manufacturers make it difficult for the future investor to calculate profitability of new African catfish RAS. In addition, the systems currently in use in northern Germany have not been further developed under consideration of new water filtration systems, cultivation conditions, and management strategies.

There is a variety of recent publications on RAS systems with a scientific focus on water or solid treatment (Xiao et al., 2019; Gibson et al., 2020; Heiderscheidt et al., 2020), nutrient flows (Yogev et al., 2020; Chen et al., 2021; Villar-Navarro et al., 2021), bacterial activities (Rojas-Tirado et al., 2017; Jiang et al., 2019; Ruiz et al., 2019), or aquaponic adaptation (Calone et al., 2019; Supajaruwong et al., 2020; Ekawati et al., 2021). Although economic performance is the most critical issue for the long-term successful operation of RAS, research on this issue, especially for particular species is scarce. A detailed economic review of a Tilapia prototype RAS dates from 1996 and describes three tools or models for analysing a Tilapia RAS or an investment in such a system (O'Rourke, 1996). A 2012 study on management issues in RAS identified the main problem as inadequately trained employees taking responsibility for water treatment and mechanical problems (Badiola et al., 2012). In addition, a lack of research on commercial scale RAS was identified, which is a key priority to improve performance. Similar findings were again published in a 2020 study, which identified poor management, lack of technology knowledge, high investments, and incidence of disease and pathogens as the main problems for the RAS industry (Aich et al., 2020). A study on the economic feasibility of pangasius RAS in Vietnam concluded that 99% of investments in medium or large RAS are profitable and crucial parameters are price, yield, fingerlings, feed and investment (Ngoc et al., 2016). A recent EUMOFA (European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products) publication on RAS has identified financial risk as one of the main risks, primarily due to high capital expenditure and uncertainty regarding future costs (EUMOFA, 2020). Further actual studies on RAS profitability primarily address topics such as nursery of marine fish seeds (Ranjan et al., 2019; Om et al., 2020), hatchery of carp or overwintering of carp juveniles (Kristan et al., 2018; de Souza et al., 2019), or the production of ornamental fish (Mohammad et al., 2018; Pereira & Henriques, 2019). Whereas there are many recent economic studies for the African catfish particularly from Africa and Asia (Oké & Goosen 2019; Oluwalola et al., 2019; Diatin et al., 2021), and the importance of input factors like the feed price onto profitability of regular aquaculture systems has been very well described (Guttermomsen, 2002; Asche et al., 2009; El-Sayeed et al., 2015) the driving cost factors for African catfish RAS including the key production factors have not been analysed.

We herewith calculate the actual cost structure of African catfish RAS in northern Germany based on a model farm and regular market conditions. The different variable costs are arranged in a descending order, and allow analyses of the real effects of price fluctuations and different entrepreneurial decision scenarios on key performance indicators (KPI), illustrating the potential of cost control and system improvements. Two aquaponic scenarios allow an estimation of additional costs and benefits. Profitability and the best options to improve the economic and ecologic sustainability of these highly productive aquaculture systems are discussed.

5.2. Materials and Methods

All data and information for this study originate from regional African catfish farms, feed producers, energy providers, seedling producers and water suppliers, greenhouse producers as well as own data from running African catfish RAS systems and experiments in the FishGlassHouse, University of Rostock. Depending on the location, supplier contract, and scaling, the values may differ to a certain degree. The possible price and value ranges are given and an average calculation basis (CB) was chosen for the initial model.

5.2.1. African Catfish RAS – Initial Model

An average catfish recirculating aquaculture system (RAS) in Mecklenburg-Western Pomerania with a production volume (PV) of 300 m³ (recirculation volume 390 m³) was modelled (Figure 5.1). The facility was divided into four closed loops (Unit 1–4), each with 14 rearing tanks of 5 m³ and two fingerling fish tanks of 2.5 m³ each. A simplified smaller sized system has been described for the FishGlassHouse (Palm et al., 2018b). Each unit consists of four settling tanks (sedimenter) and four pump sumps, each with a biofilter installed above. The fish are fed with an automatic feeder. On average, 2.5% of the tanks are empty due to fish slaughter, restocking or cleaning, resulting in a net production volume of 292.5 m³. The investment costs are significantly influenced by scaling and location and range from 4500–7500 EUR/m³ PV. As a calculation basis (CB) 6000 EUR/m³ PV was chosen, which resulted in total investment costs (TIC) of 1,800,000 EUR.

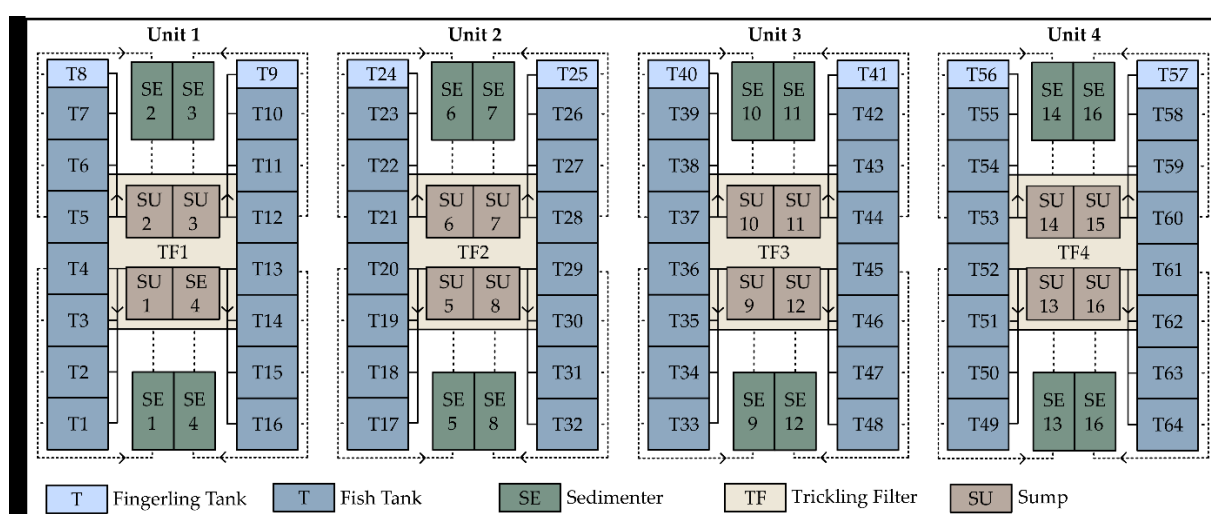


Figure 5.1. Illustration of the 300 m³ African catfish RAS initial model. The system is divided into four independent loops.

The stocking density at slaughter or the average stocking density is a crucial variable and influences the total production output of any aquaculture farm and thus almost all other variables. For instance, the main input factors feed, seedlings, labour and water increase while energy consumption remains similar with increasing stocking densities. Average stocking densities of commercial African catfish RAS in northern Germany range between 350–550 kg/m³ PV stocking density at slaughter. The max stocking density at slaughter of 450 kg/m³ PV was chosen as CB, which corresponds to an average stocking density of 180 kg/m³ PV or 300 fish/m³ PV. This yields an annual production of 320,288 kg/year.

Variable Costs: Feed is the main cost driver in intensive aquaculture. Depending on the FCR (Feed Conversion Ratio) and feed type, feed costs vary. Economies of scale also result in better contract conditions and higher kickbacks. For this research, the use of three feeds differing in size and expense from Coppens (Alltech Coppens BV, Leende, Netherlands) was assumed. It is common to feed the fingerlings 2 weeks with 2 mm feed, then 3 weeks with 3 mm and in the fattening phase approx. 17 weeks with 4.5 mm feed (Coppens, 2021a). The different feed costs and quantities added together result in ranges of 0.90–1.16 EUR/kg feed. For this work, an average price of 1.03 EUR/kg (CB) was chosen. The FCR depends on many factors such as stocking density, feed (frequency), fish homogeneity and other husbandry conditions such as physico-chemical water parameters. Feed manufacturers report an average FCR of 0.85 for the entire growth period (Coppens 2021b). Dutch catfish farming is reported at 0.80, while studies on intensive

production come to a different range with FCRs of 0.83–0.90 for adult catfish > 1 kg (van de Nieuwegiessen et al., 2009) or 0.94–1.07 for staggered production semi-commercial experiments (Palm et al., 2018b). The CB for this study was set at an FCR of 0.90, which corresponds to a total feed consumption of 288,259 kg/year and costs of 296,907 EUR/year.

Energy costs depend on whether the energy is produced in-house or by an affiliate company, or whether it is purchased publicly. In African Catfish aquaculture of Mecklenburg-Western Pomerania, companies are usually integrated into a group of affiliated companies and complement each other in production. It is common for large catfish farms to have an affiliate's biogas-CHP plant generate electricity and heat that is used by the fish farm. It depends on the type of desired taxation and accounting by each company, but relatively low purchase prices are standard. A gas price range of 0.02–0.04 EUR/kWh (CB 0.03 EUR/kWh) with a consumption range of 8–12 kWh/m³PV/d (CB 10 kWh/m³PV/d) would lead to a gas demand of 1095 MWh/year and costs of 32,850 EUR/year. Since the biomass for energy production is usually produced in affiliate companies, a possible CHP bonus will not be counted towards aquaculture in this work. An electric energy purchase price ranges between 0.06–0.10 EUR/kWh (CB 0.08 EUR/kWh) with an electricity consumption range of 2–4 kWh/m³PV/d (CB of 3 kWh/m³PV/d), and results in an annual consumption of 328.5 MWh/year and costs of 26,280 EUR/year. Heat and electricity thus result in total energy costs of 59,130 EUR/year.

The fingerlings (12 g) are purchased from local or Dutch fingerling producers. The price range is 0.07–0.33 EUR per fish. As CB, 0.20 EUR/fish was chosen. *C. gariepinus* grows from 12 g to a slaughter weight of 1.5 kg in 5 months. For each kg of catfish growth, an average of 0.72–0.78 fingerlings is needed, which includes mortality. As CB, 0.75 fingerlings/kg were chosen, which, with an annual production of 320,288 kg/year, leads to a total requirement of 240,216 fingerlings at a price of 48,043 EUR/year.

The working hours and thus the wages depend on the desired processing stages and the working speed. For the initial model, the production of 100% whole fish or living fish is assumed, which means employees would mostly sort fishes and clean. As the jobs do not require special qualifications, a full-time unskilled employee can be hired slightly above minimum wage with a range of 29,000–33,000 EUR/year (incl. non-wage labour costs). For this farm, a CB of 31,000 EUR/year was chosen. One worker can handle approx. 150–350 t/year depending on the degree of automation of the RAS. With a CB of 250 t/year, 1.28 employees/year are required at labour costs of 39,716 EUR/year.

The costs for fresh, industrial and wastewater depend on whether the water is drawn from one's own well or comes from suppliers and whether the wastewater is treated on own land or can be further used. The total water costs therefore range from 0.35–2.70 EUR/m³, including wastewater. Since all large catfish farms obtain their water from own wells and partly also have their own treatment and utilisation possibilities, the CB of 0.90 EUR/m³ was chosen. The stocking density is the decisive variable for water consumption. The higher the stocking density, the higher the water exchange rate must be to ensure sufficient water quality. At a slaughter density of 450 kg/m³ (average stocking density 180 kg/m³), the exchange rate must be 22.5–27.5%/day, including the consumption of veterinary facilities and slaughtering. With a CB of 25%, 27,375 m³/year are consumed at costs of 24,638 EUR/year.

Further variable costs such as veterinary drugs, external services or material and production costs were summarised as an amount of 15,000 EUR. The transport costs are included in the sales prices. The total variable costs in the initial model are 483,433 EUR/year.

Fixed Costs: Depreciation is listed as the main costs among the fixed costs. The total investment (1.80 mil. EUR) is divided into material and equipment (1,309,091 EUR) and construction (490,909 EUR). Material and equipment have, depending on the equipment, a straight-line depreciation period of 8–12 years. The CB was therefore simplified to 10 years, which corresponds to a depreciation of 130,909 EUR/year.

Construction is more persistent and is depreciated on a straight-line basis over 20 years, which corresponds to 24,545 EUR/year and leads to a total depreciation of 155,455 EUR/year. The system needs a manager/administrator, who incurs costs of 45,000 EUR/year. Other fixed costs, such as demand rate net (electric energy), insurance, maintenance, etc., were summarised as costs of 20,745 EUR/year. Investments are financed with different proportions of equity, debt and subsidies. For the purpose of this paper, the KPI analysis of one year of operation, a simplified form of mixed financing with 51% equity and 49% subsidies was assumed, which eliminates interest. Since the North German investors are farmers, land ownership was assumed, which also eliminates rent. A possible rededication of available production halls, significantly reducing investment costs, was not considered. Total fixed costs of 221,220 EUR/year occur.

Revenues: The revenues are determined by the processing stage and the sales price. For the initial model it is assumed that 100% of the fish is sold as whole fish or living fish. Assuming a mixed distribution of 80–90% to wholesale and 10–20% to Retail, the producer prices for whole/living *C. gariepinus* in 2021 in northern Germany range between 1.70–2.70 EUR/kg. An average selling price (CB) of 2.20 EUR/kg can be achieved. The total production of 320,288 kg/year generates revenues of 704,633 EUR/year.

5.2.2. Entrepreneurial Decision Scenarios

In the following analyses, the impact of decision scenarios on the profitability of the initial model was investigated.

Scenario 1, Double Production Volume: Doubling the production volume from 300 m³ to 600 m³ would result in a doubling of all input quantities (feed, fingerlings, energy, water), but at the same time quantities can be economised or prices reduced through improved economies of scale (Summerfelt et al., 2015). This primarily concerns the investment costs, which drop to 5000 EUR/m³ PV (3 mil. EUR). The costs for feed and fingerlings are reduced by 5% each due to double purchase quantities, energy costs by 10%. The doubled production volume requires only 85% more labour. Other fixed costs increase by 75%.

Scenario 2, Higher Stocking Density: The increase in max. stocking density from 450 kg/m³ to 550 kg/m³ (Average stocking density 220 kg/m³, 367 fish/m³) results in the FCR decreasing to 0.93 and 0.77 fingerlings/kg growth being required. In addition, due to increased filter cleaning and water monitoring, one employee only manages 200 t/year and the water exchange rate increases to 30%/day.

Scenario 3, Fingerling Production: Fingerlings are produced in-house and require a separate room. As a result of its complexity, broodstock facility and maintenance was not separated in this calculation because the broodstock can also be co-cultivated in the main fish farm.

Option 1: Fingerlings are produced for the company's own use only. In-house fingerling production raises total investment costs to 7000 EUR/m³ PV (2.1 mil. EUR) for the production volume of 300 to and fingerlings due to the need for an additional protected rearing room with tanks and equipment. Larval and fingerling feed requirements increase feed costs by 3%, and energy and water costs increase by 10%. Fingerling production requires the hiring of a higher-skilled employee which increases labour costs by 75%. Other fixed costs increase by 10%. Saved variable costs are used to calculate KPIs for fingerlings.

Option 2: The farm produces 300% of its own needs (720,647 fingerlings/year) and resells 200% for 0.20 EUR/fingerling. The rearing room and special equipment from option 1 are already existing and the rearing tanks, pipes and pumps lead to a small increase in investment costs to 7300 EUR/m³ PV (2.19 mil. EUR). The initial feed costs increase by only 7.5% due to better contract conditions, while energy and water costs increase by 15%. The trained employee learns cheaper labour for the repetitive tasks and the original labour costs increase only by 90%. The other fixed costs increase by 25%.

Scenario 4, Aquaponic Integration: For the calculation of an aquaponic integration, two greenhouse models were calculated using KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen) online applications, which

include costs of debt (KTBL, 2021a, b). The price level from 2013 was increased by a factor of 1.33 using the price index of the Federal Statistical Office for commercial buildings and thus adjusted to the level of the second quarter of 2021.

Option 1 is a small 1000 m² greenhouse for the production of one series of tomatoes on the vine per year that are distributed to food retail market (decoupled aquaponics s.s. according to Palm et al., 2018a). Tomatoes were chosen because they achieve high market prices and can produce competitive yields with improved fertiliser use efficiency in decoupled aquaponics (Suhl et al., 2016). A Venlo greenhouse was chosen, with special glass, gutter culture, drip irrigation and blackout/shading/heat insulation screen on roof and side walls which costs 509,548 EUR (509.55 EUR/m²) without artificial lighting. The variable costs include seeds and seedlings, culture pots and substrates, plant protection, fertilisation and irrigation, packaging, wages and other costs and amount to 0.99 EUR/kg tomato. Due to the 28 °C warm water of the fish farm, heating, water and fertiliser costs of the greenhouse reduce the variable costs by 3.03% to 0.96 EUR/kg. For tomatoes on the vine, a yield of 53 kg/m² are to be expected, resulting in 53 t/year and variable costs of 50,880 EUR/year. Fixed costs (depreciation, interests, repairs, insurance and other costs) amount to 65,690 EUR/year. Tomatoes produced in aquaponics can be marketed alike organic tomatoes and achieve a selling price of 2.50 EUR/kg.

Option 2 is a 10,000 m² Venlo greenhouse for basil production with special glass and screens on the roof and side walls but with ebb and flow cultivation systems and LED assimilation lighting (decoupled aquaponics s.l. according to Palm et al. 2018a). Despite economies of scale, the greenhouse costs a total of 4,474,565 EUR (447.46 EUR/m²) due to high-quality lighting. The variable costs are highly dependent on the season. The variable production costs of a pot are 0.57 EUR/pot in winter due to the increased heating and electricity costs and only 0.36 EUR/pot in summer. The average variable costs are 0.429 EUR/pot and are reduced by 4.66% to 0.409 EUR/pot due to the yearly warm water supply with the aquaculture process water. Assimilation lighting enables ten five-week growth cycles, which, with 25 basil pots/m², results in an annual production of 2.5 million pots and thus variable costs of 1,021,875 EUR/year. The fixed costs amount to 748,832 EUR/year. Marketing the product as aquaponic sustainable food, the average sales price of the plants achieves 0.85 EUR/pot for mixed sales by wholesale and retail. If at least 95% of the 2.5 million pots are marketable products, 2,375,000 basil pots/year will be sold.

For aquaponic integration, transition tanks and piping from the fish farm to plant farm must be installed, which increases the investment costs of the fish farm to 6300 EUR/m³ PV (1.89 mil. EUR). In addition, management and administrative costs can be saved by overlapping administrative tasks. For this model, savings were attributed to aquaculture, and 20% lower management costs are calculated. The main benefits of aquaponic integration are the improved marketing opportunities of fish and plants, which in aquaculture leads to an increase in the fish selling price of 5% (2.31 EUR/kg).

Scenario 5, Higher Value-Added Level: Scenario 5 analyses the impact of a higher value-added level through higher processing stages and direct marketing. Labour costs for simple, repetitive tasks such as filleting, smoking and selling remain at a CB of 31,000 EUR/year. For the whole process of fillet production, from emptying a tank to slaughtering, filleting, packing and freezing, there is a wide range given from 15–35 kg fillet/hour/worker (CB 25 kg/hour). From higher finishing levels such as smoked fillet, 7.5–12.5 kg/hour/worker (CB 10 kg/hour) can be produced. The average fillet price ranges between 5–8 EUR/kg (CB 6,50 EUR/kg), the average smoked fillet price varies between 10–15 EUR/kg (CB 12,50 EUR/kg). The African catfish has a fillet yield of 41%. The trimmings (59%) produced at slaughter can be sold for 40–60 EUR/t (CB 50 EUR/t). Transport, packaging and smoking requirements are included in the selling prices. Three different marketing and price variants were modelled and analysed.

In option 1, 20% of the total output is sold as whole fish and 80% is filleted. Due to the integration of a slaughter room including a cooling plant, the investment costs increase by 10% to 6600 EUR/m³ PV (1.98 mil. EUR). The cooling system and the additional consumption of drinking water lead to an increase in electricity and water costs of 10%. Labour costs increase by 77,540 EUR/year due to an additional 2.5 workers/year. The yearly production amounts 64,058 kg of whole fish, 105,054 kg of fillets and 151 tons of trimmings.

In option 2, 20% of the production is sold as whole fish, 50% is filleted and 30% as smoked fillet. Investment costs increase by 15% to 6900 EUR/m³ PV (2.07 mil. EUR) due to the slaughtering, cooling and smoking plant. Filleting and smoking lead to an additional need of 3.91 workers/year and therefore additional costs of 112,156 EUR/year. Water costs increase by 10% and electricity costs by 15%. 64,058 kg of whole fish, 65,659 kg of fillets, 39,395 kg of smoked fillets and 151,176 kg of trimmings are produced annually.

Option 3 extends option 2 by a farm store for direct sales to final customers. The investment costs increase by another 20% to 8280 EUR/m³ PV (2.48 mil. EUR) due to the construction of a farm store including fish counter and refrigeration. In the farm store, 1.50 salesmen/year are hired for 54,250 EUR/year. Gas, electricity and water costs increase by a further 10%. Management and administration costs increase by 50% due to increased administrative demands. Of the production, 75% is sold to wholesalers and retailers and 25% is sold directly in the farm store. In the farm store, a 75% mark-up generates sales prices of 3.85 EUR/kg (whole fish), 11.38 EUR/kg (fillet) and 21.88 EUR/kg (smoked fillet).

5.2.3. Calculations

The calculations were performed using Microsoft Excel® (Microsoft, 2010), with all different costs in a single output sheet. This software was chosen because, besides its simplicity, it has been used effectively for economic calculations (Benker, 2014). The enterprise budget was designed to provide economic assistance to existing plant operators and companies interested in building a catfish RAS. Existing plant operators can transfer their present values and, by adjusting individual variables, evaluate which parameters need to be changed in order to maximise returns. People interested in building a RAS can find out whether the construction of a plant can be profitable under given location factors. To calculate the different entrepreneurial decision scenarios, the new values were calculated in a separate sheet and the resulting values were transferred into a separate output file. For the respective entrepreneurial decision scenarios, the formulas were adapted in each case in separate sheets. For all scenarios, the respective business figures were transferred to a separate file and used to create the related tables.

For the calculation of the return on investment (ROI) of the aquaculture units, the operating result was divided by the capital employed (net investment minus 49% subsidies), as Mecklenburg-Western Pomerania and the European Fisheries Fund (EFF) and the European Maritime and Fisheries Fund (EMFF) supported the investors with subsidies amounting to 49% of the net expenses (European Commission, 2021c) (see above). The EMFF is replaced by the European Maritime Fisheries and Aquaculture Fund (EMFAF) in 2021, which subsidises sustainable aquaculture investments up to 50% until 2027 (European Commission, 2021a). The greenhouses of the aquaponic extension are subsidised by 20% through the agricultural investment promotion program of Mecklenburg-Western Pomerania (AFP: Agrarinvestitionsförderungsprogramm) (Dienstleistungsportal MV, 2021).

5.3. Results

5.3.1. Initial Model

In the initial model (Table 5.1), the catfish farm does not generate profits, but the output based on realistic current market prices is sufficient to cover all costs. Additional benefits such as the CHP bonus, EEG reallocation charge and integration benefits into the own farming practices have not been evaluated and do not account for the aquaculture activity. The main cost driver of variable costs in the initial model is feed with a proportion of 61.42% of variable costs and 42.14% of total costs. At great distance follow the costs of energy (12.23%; 8.39%), followed by fingerlings (9.94%; 6.82%), wages (8.22%; 5.64%) and water (5.10%; 3.50%). Depreciation accounts for 22.06% of total costs.

Table 5.1. Yearly revenues and costs of the initial model of an African catfish farm with 300 m³ production volume with a max stocking density of 450 kg/m³ (average 180 kg/m³) and an output of 320,288 kg/year.

		Units	Price or Cost per Unit (EUR)	Quantity	Value or Costs (EUR)
Revenues					
	Whole Fish	kg	2.20	320,288	704,633
Variable Costs (VC)					
	Fish Feed	kg	1.03	288,259	296,907
	Energy				59,130 ¹
	-Gas	kWh	0.03	1,095,000	(32,850)
	-Electricity	kWh	0.08	328,500	(26,280)
	Fingerlings	each	0.20	240,216	48,043
	Wages	unit	31,000	1.2812	39,716
	Water	m ³	0.90	27,375	24,638
	Others	unit	15,000	1	15,000
	Total VC				<u>483,433</u> ²
	Contribution Margin				221,200
Fixed Costs (FC)					
	Depreciation	unit	155,455	1	155,455
	Managing	unit	45,000	1	45,000
	Others ¹	unit	20,745	1	20,745
	Total FC				<u>221,200</u>
	Total Costs (TC)				<u>704,633</u>
	Returns				0

¹ Energy is the sum of Gas and Electricity. ² Underlines denote the sum of the respective costs.

5.3.2. Change in Costs and Prices

Among the main variable input factors, a change in feed has the highest impact on the key performance indicators (KPI) (Table 5.2 and Table 5.3). Each ten percent change of ± 0.103 EUR/kg feed changes the returns by ± 29.691 EUR/year, the ROI by $\pm 3.23\%$ and the profit per kg of output produced by ± 0.093 EUR/kg. The percentage deviations of the KPI from the initial model are $\pm 13.42\%$ for the contribution margin (initial model: 221,200 EUR/year; 0.691 EUR/kg; new value: EUR/year; 0.783 EUR/kg), $\pm 6.14\%$ for variable costs (483,433 EUR/year; 1.509 EUR/kg) and $\pm 4.21\%$ for total costs (704,633 EUR/year; 2.200 EUR/kg). The second largest impact among the variable input factors on the changes in KPI (Table 5.2) is a change in energy costs. However, relative to feed, the influence of an equal percentage change in energy

prices is 80% less, or the influence of energy is 20% of the influence of feed. In third place are fingerlings, which have an 84% lower influence on the KPI changes in relation to feed, followed by wages with an 87% lower influence. In last place among the variable main input factors is water with a 92% lower influence, or with only 8% of the influence of feed. The fixed costs are mainly determined by the depreciation, i.e., by the investment costs (EUR/m³ PV). Each ten percent change (± 600 EUR/m³ PV) changes the investment costs of the initial model by $\pm 180,000$ EUR and thus the depreciation and at the same time the returns by $\pm 15,546$ EUR/year. ROI changes by $\pm 1.88\%$, profit by ± 0.049 EUR/kg and total costs by $\pm 2.21\%$. Compared with feed, the impact on the changes in Table 5.2 is thus 48% lower for each equal-percentage change in investment costs. In the case of ROI, the impact is only 42% lower due to the exclusion of subsidies. Contribution margin and variable costs remain unaffected by changes in fixed costs. The biggest impact on the profitability is a change in the selling price. Each ten percent change (± 0.220 EUR/kg) causes a change in revenue of $\pm 70,463$ EUR/year, ROI of $\pm 7.68\%$, profit/output of ± 0.220 EUR/kg and contribution margin of $\pm 31.86\%$. Thus, the impact of the selling price on the changes in the KPI is 137% higher than that of feed. Water compared to selling price has a nearly 97% lower impact for each equal percent change. Total and variable costs remain unchanged.

Table 5.2. Change of key performance indicators for each ten percent change ($\pm 10\%$) in variable costs, investment costs and sales price. Returns (EUR/year), ROI (%) and Profit/Unit (EUR/kg) are total numbers. Percentage change of contribution margin (CM), variable costs (VC) and total costs (TC) shows the proportional change from the value of the initial model (EUR/year and EUR/unit).

	Unit	Change of Price or Cost/Unit (EUR)	Returns Per Year (EUR/year)	ROI ¹ Total (%)	Profit Per kg Fish (EUR/kg)	Percentage Change of CM (%)	Percentage Change of VC (%)	Percentage Change of TC (%)
Feed	kg	± 0.103	$\pm 29,691$	± 3.23	± 0.093	± 13.42	± 6.14	± 4.21
Energy total			± 5913	± 0.64	± 0.018	± 2.67	± 1.22	± 0.84
-Gas	kWh	± 0.003	± 3285	± 0.36	± 0.010	± 1.49	± 0.68	± 0.47
-Electricity	kWh	± 0.008	± 2628	± 0.29	± 0.008	± 1.19	± 0.54	± 0.37
Fingerlings	ea.	± 0.020	± 4804	± 0.52	± 0.015	± 2.17	± 0.99	± 0.68
Wages	unit	± 3100	± 3972	± 0.43	± 0.012	± 1.80	± 0.82	± 0.56
Water	m ³	± 0.090	± 2464	± 0.27	± 0.008	± 1.11	± 0.51	± 0.35
Invest. costs	m ³ PV	± 600	$\pm 15,546$	± 1.88	± 0.049	± 0.00	± 0.00	± 2.21
Sales price	kg	± 0.220	$\pm 70,463$	± 7.68	± 0.220	± 31.86	± 0.00	± 0.00

¹ ROI = Return on Investment is calculated as returns/(investment-subsidy). Fisheries investments in Mecklenburg-Western Pomerania are subsidised at 49%.

Table 5.3. Impact of a ten percent reduction (-10%) in respectively one of the variable costs or investment costs or a ten percent increase (+10%) in the sales price on the key performance indicators (KPIs). The initial model is the calculation basis (CB) with annual returns of 0 EUR.

	Unit	New Price or Cost/Unit (EUR)	Investment Cost (mil. EUR)	CM ² per year (EUR/year)	Variable Costs per Year (EUR/year)	Fixed Costs per Year (EUR/year)	Revenues per year (EUR/year)	Returns per year (EUR/year)	ROI ¹ (%)	CM per kg fish (EUR/kg)	Variable Costs per kg fish (EUR/kg)	Total Costs per kg fish (EUR/kg)	Profit per kg fish (EUR/kg)
Initial Model			1.80	221,200	483,433	221,200	704,633	0	0.00	0.691	1.509	2.200	0.000
Feed	kg	0.927	1.80	250,890	453,742	221,200	704,633	29,691	3.23	0.783	1.417	2.107	0.093
Energy (Total)			1.80	227,113	477,520	221,200	704,633	5913	0.64	0.709	1.491	2.182	0.018
-Gas	kWh	0.027	1.80	224,485	480,148	221,200	704,633	3285	0.36	0.701	1.499	2.190	0.010
-Electricity	kWh	0.072	1.80	223,828	480,805	221,200	704,633	2628	0.29	0.699	1.501	2.192	0.008
Fingerlings	each	0.180	1.80	226,004	478,628	221,200	704,633	4804	0.52	0.706	1.494	2.185	0.015
Wages	unit	27,900	1.80	225,171	479,461	221,200	704,633	3972	0.43	0.703	1.497	2.188	0.012
Water	m ³	0.810	1.80	223,663	480,969	221,200	704,633	2464	0.27	0.698	1.502	2.192	0.008
Invest. costs	m ³ PV	5400	1.62	221,200	483,433	205,654	704,633	15,546	1.88	0.691	1.509	2.151	0.049
Sales price	kg	2.420	1.80	291,636	483,433	221,200	775,096	70,463	7.68	0.911	1.509	2.200	0.220

¹ ROI = Return on Investment is calculated as returns/(investment-subsidy). Fisheries investments in Mecklenburg-Western Pomerania are subsidised at 49%. ² CM = Contribution Margin.

5.3.3. Entrepreneurial Decision Scenarios

Double Production Volume: By doubling production from 300 m³ to 600 m³ production volume, the variable costs per unit (VCU) of the initial model is reduced by 7.6% from 1.509 EUR/kg to 1.395 EUR/kg and the total costs per unit (CPU) is reduced by 12.4% from 2.200 EUR/kg to 1.926 EUR/kg (Table 5.4). With double the output, the savings generate returns of 175,240 EUR/year (0.274 EUR/kg fish) with an ROI of 11.45% (Table 5.5). A ten percent increase in the retail price of whole fish in this scenario results in an increase in returns and ROI of 80.4% (316,167 EUR/year; 20.66%).

Table 5.4. Sales price, contribution margin per unit (CMU), variable costs per unit (VCU), total costs per unit (CPU) and profit per unit (PPU) of the respective products in the different scenarios.

Scenario	Units	Sales Price (EUR/unit)	CMU (EUR/unit)	VCU (EUR/unit)	CPU (EUR/unit)	PPU (EUR/unit)
Initial Model						
300 m ² ; 450 kg/m ³ PV	kg whole fish	2.200	0.691	1.509	2.200	0.00
Double Production Volume						
Opt. 1 (600 m ³ PV)	kg whole fish	2.200	0.805	1.395	1.926	0.274
Higher Stocking Density						
Opt. 1 (max. 550 kg/m ³)	kg whole fish	2.200	0.668	1.532	2.097	0.103
Fingerling Production						
Opt. 1 (Own Requirements)	each fingerling	0.200	0.004	0.196	0.312	-0.112
Opt. 2 (300% Fingerling Prod.)	each fingerling	0.200	0.112	0.088	0.142	0.058
Aquaponic Integration						
Aquaculture	kg whole fish	2.310	0.801	1.509	2.196	0.114
Opt. 1 (Tomato Prod.)	kg tomato	2.500	1.540	0.960	2.199	0.301
Opt. 2 (Basil Prod.)	each pot basil	0.850	0.399	0.430	0.746	0.104
Higher Value-Added Level						
Opt. 1 (Filet Prod.)	kg filet	6.500	2.042	4.458	6.189	0.311
Opt. 2 (Smoked Filet Prod.)	kg smoked filet	12.500	6.925	5.575	7.365	5.135
Opt. 3 (Direct Sales)	kg whole fish	3.850	2.147	1.703	2.648	1.202
	kg filet	11.375	6.484	4.891	7.125	4.250
	kg smoked filet	21.875	15.877	5.998	8.232	13.643

Table 5.5. The impact of the different scenarios on the total investment costs (TIC), and yearly variable costs (VC), fixed costs (FC), revenues, returns and return on investment (ROI). In addition, the impact of a ten percent change (+10%) in the sales price of the respective production unit on the key performance indicators in the respective scenarios is calculated. In case of price variations, TIC, VC and FC remain unchanged.

Szenario	TIC (EUR)	VC (EUR/year)	FC (EUR/year)	Revenues (EUR/year)	Returns (EUR/year)	ROI ¹ (%)
Initial Model						
300 m ² ; 450 kg/m ³ PV	1,800,000	483,432	221,199	704,632	0.00	0.00%
Double Production Volume						
Opt. 1 (600 m ³ PV)	3,000,000	893,630	340,395	1,409,265	175,240	11.45%
+10% Fish Price				1,550,192	316,167	20.66%
Higher Stocking Density						
Opt. 1 (max. 550 kg/m ³ PV)	1,800,000	599,639	221,200	861,218	40,379	4.40%
+10% Fish Price				947,339	126,501	13.78%
Fingerling Production						
Opt. 1 (Own Production)	2,100,000	482,460	249,183	704,633	-27,011	-2.52%
Opt. 2 (300 % Fingerling Prod.)	2,190,000	505,967	260,068	800,719	34,684	3.11%
+10% Fingerling Price				810,327	44,293	3.97%
Aquaponic Integration						
Aquaculture	1,890,000	483,433	219,972	739,864	36,459	3.78%
Opt. 1 (1000 m ² Tomatoes)	509,548	50,880	65,690	132,500	15,930	3.91%
Total Aquaponic	2,399,548	534,313	285,662	872,364	52,389	3.82%
+10% Tomato Price				145,750	29,180	7.16%
Total Aquaponic				885,614	65,639	4.79%
Opt. 2 (10,000 m ² Basil)	4,474,565	1,021,875	748,832	2,018,750	248,043	6.93%
Total Aquaponic	6,364,565	1,505,308	968,804	2,758,614	284,502	6.26%
+10% Basil Price				2,220,625	449,918	12.57%
Total Aquaponic				2,960,489	486,377	10.70%
Higher Value-Added Level						
Opt. 1 (80% Filet)	1,980,000	566,065	236,745	831,338	28,529	2.83%
+10% Filet Price				899,624	96,814	9.59%
Opt. 2 (30% Smoked, 80% Filet)	2,070,000	610,995	244,518	1,067,710	212,198	20.10%
+10% Smoked Filet Price				1,116,955	261,442	24.76%
Opt. 3 (Direct Sales)	2,480,000	666,512	302,772	1,266,489	297,204	23.46%
+10% Direct Sales Price				1,312,870	343,586	27.12%

¹ ROI = Return on Investment is calculated as returns/(investment-subsidy). Fisheries investments in Mecklenburg-Western Pomerania are subsidised at 49% and agricultural investments (aquaponic integration option 1 and 2) at 20%.

Higher Stocking Densities: The increase in max. stocking density from 450 kg/m³ to 550 kg/m³ (average stocking density 220 kg/m³) slightly increases VCU by 1.5% to 1.532 EUR/kg and CPU is reduced by 4.7% (Table 5.4). The 22% increase in output (391,463 kg/year) generates returns of 40,379 EUR/year (0.10 EUR/kg) with an ROI of 4.40% (Table 5.5). In this scenario, a ten percent increase in the selling price leads to a 213.3% increase in returns and ROI (126,167 EUR/year; 13.78%).

Fingerling Production: With fingerling production, in the case of exclusive self-supply (Opt. 1) of the farm (240,216 fingerlings/year), a fingerling has VCU of 0.196 EUR/each, CPU of 0.312 EUR/each and a PPU of -0.112 EUR/each (Table 5.4). Considered as a single investment, the fingerling production has an ROI of -17.65%. Despite the elimination of fingerlings costs, the excessively high production costs result in negative returns of -27,011 EUR/year (-0.08 EUR/kg) with an ROI of -2.33% (Table 5.5). In option 2, the farm produces 300% of its own needs (720,647 fingerlings/year) and resells 200%. VCU are reduced by 55.3% to 0.088 EUR/each, CPU decrease by 54.7% to 0.142 EUR/each due to economies of scale (Table 5.4). Thus, at a selling price of 0.200 EUR/each, a saving, or PPU of 0.058 EUR/each can be achieved. Considered as a single investment, the hatchery has an ROI of 21.18%. This results in returns of 34,684 EUR/year and an ROI of 3.11% (Table 5.5). A ten percent increase in fingerling prices increases returns and ROI by 27.7% (44,293 EUR/year; 3,97%).

Aquaponic Integration: Due to the aquaponic integration, the VCU in the fish farm remain unchanged, the CPU decrease minimally by 0.2% (Table 5.4). Due to the increased sales price of the aquaponically distributed fish, fish farm returns increase to 36,459 EUR/year (0.114 EUR/kg) and ROI increases to 3.78% (Table 5.5). In option 1, the tomato greenhouse generates returns of 15,930 EUR/year (0.301 EUR/kg tomato) and an ROI of 3.91%. Fish and plant farming considered as a single aquaponics enterprise generate returns of 52,389 EUR/year and an ROI of 3.82%. A 10% increase in tomato prices increases returns and ROI of the greenhouse by 83.2% (29,180 EUR/year; 7.16%) and of the aquaponic enterprise by 25.3% (65,639 EUR/year; 4.79%). In option 2, the large 10,000 m² basil greenhouse generates returns of 248,043 EUR/year (0.10 EUR/pot) and an ROI of 10.87%. Together with fish farming, this results in returns of 284,502 EUR/year and an ROI of 8.76%. A ten percent increase in basil prices increases returns and ROI of the greenhouse by 81.4% (449,918 EUR/year; 12.57%) and of the aquaponic farm by 71.0% (486,377 EUR/year; 10.70%).

Higher Value-Added Level: In option 1, 80% of the production is filleted and 20% is sold as whole fish. The 20% whole fish (64,058 kg/year) returns 140,927 EUR/year. With a fillet yield of 41%, 105,054 kg/year of fillet are produced and generate 682,853 EUR/year. In addition, the trimmings (151 tons) contribute 7559 EUR/year, if sold outside. Possible internal use on the farms has not been considered. The total revenue of 831,338 EUR/year results in returns of 28,529 EUR/year and an ROI of 2.83% (Table 5.5). A ten percent increase in fillet price increases the two KPIs by 239.4% (96,814 EUR/year; 9.59%). Labour costs in this scenario increase by 195.2% to 127,027 EUR/year, with a total costs share (TC) of 15.82% (22.44% VC).

In option 2 (20% whole fish, 50% fillet, 30% smoked fillet), the 20% whole fish and the 151 tons of trimmings continue to generate 140,927 EUR/year and 7559 EUR/year, respectively. The 50% fillets (65,659 kg/year) generate 426,783 EUR/year and the 30% smoked fillets (39,395 kg/year) 492,442 EUR/year. The total revenue of 1,069,710 EUR/year leads to returns of 212,198 EUR/year with an ROI of 20.10%. If the smoked fillet price increases by 10%, both KPIs increase by 23.2% (261,442 EUR/year; 24.76%). In this scenario, labour costs increase by 423.6% compared to the initial model to 168,220 EUR/year with a significantly higher TC share of 19.66% (27.53% VC).

Option 3 extends option 2 with direct marketing to end consumers (25% of production). The marketing of 75% of the production to wholesalers and retailers generates revenues of 802,673 EUR/year. The 25% direct marketing, with selling prices of 3.85 EUR/kg (whole fish), 11.38 EUR/kg (fillet) and 21.88 EUR/kg (smoked fillet), generate 463,816 EUR/year, almost 37% of the 1,266,489 EUR/year total revenue. In total, returns of 297,204 EUR/year and an ROI of 23.46% are realised. A ten percent increase in prices in the direct marketing makes the two key figures rise by 15.6% (343,586 EUR/year; 27.12%). Labour costs increase by 440.6% to 214,720 EUR/year, ranking clearly behind feed and before energy costs with a TC share of 22.15% (32.22% VC).

5.4. Discussion

The present study calculates the cost structure of African catfish RAS in northern Germany based on a model farm and current market conditions. The northern German catfish aquaculture is a very young industry, which was indirectly initiated by the European Commission through the EFF 2007–2013 and EMFF 2014–2021. Subsidised fishery investments at 49% motivated farmers to enter this new sector. Along with the additional benefits of an internal use of the electricity and heat from own biogas plants, the integration into regular farming practices, the ecological sustainability of production and the CHP bonus and EEG reallocation charge, an investment in heat-utilising catfish RAS is particularly attractive. However, under the current economic market conditions for a less established fish species and due to management and fish disease-related production stoppages/shortages, the northern German catfish farms have not yet managed to achieve the promised long-term operating results. In the following, the effects of price variations and different entrepreneurial decision scenarios on key performance indicators of German catfish farms are listed and discussed.

5.4.1. Initial Model with Price Variation

An average African catfish RAS (recirculating aquaculture system) with a production volume of 300 m³ and an output of 320 t/year can cover all costs, but has difficulties to reach profitably (Table 5.1) without consideration of additional benefits (see above). The most important economic variable in African catfish RAS is the low selling price, caused by a less established market environment for this relatively unknown species. If the average selling price (2.20 EUR/kg) changes by 10%, the returns change by ±70,463 EUR/year (Table 5.2). The average selling price and the total production costs of 2.20 EUR/kg as well as the variable costs of 1.51 EUR/kg can be considered as critical prices. For catfish (*Ictalurus furcatus* × *Ictalurus punctatus*) split-pond aquaculture in Arkansas and Mississippi, critical price thresholds are lower with a range of 1.72–2.05 USD/kg (Kumar et al., 2016) due to cheaper production in pond aquaculture and not RAS. Production costs in areas where African catfish are most economically cultivated vary from <1 USD/kg to 2.5 USD/kg (FAO 2020b). The selling prices of living African catfish in sub-Saharan Africa (2.5–5.0 USD/kg), alternatively Central Africa (3.3–5.2 USD/kg) or Nigeria (3.5 USD/kg) (FAO 2020b), demonstrate clearly that 2.20 EUR/kg in Germany is very low for regionally produced high valuable animal proteins (Wasenitz et al., 2018) and African catfish still has a lot of marketing potential.

In northern Germany, most of the production is sold as whole fish to wholesalers, whereby far the lowest returns are achieved compared to retail and direct marketing. The difficulty of selling larger quantities to retailers is that catfish farms are located in the most sparsely populated, agriculturally dominated regions of northern Germany, with a low incidence of retail trade. This makes it more difficult to distribute larger quantities on better price conditions. Nevertheless, the focus of the plant operators should be to build upon more retail contract partners. Slightly higher selling prices already cover the increased transportation costs and labour hours. When selling to retailers, it is important to ensure that the contractually agreed purchase quantities are adhered, otherwise there is a risk of contractual penalties. A general prognosis regarding African catfish prices is difficult to make. However, there are studies that predict a decrease in animal protein consumption and an increase especially in fish and seafood substitutes in Europe (Morach et al., 2021). Annual per capita consumption of fish and fishery products in Germany also decreased by 19% from 2011 (15.7 kg) to 2019 (13.2 kg) (Statista, 2021a). After a slight increase in 2020, further decrease in consumption is predicted by 2022 (Statista, 2021b). From 2021 to 2026, the industry's revenue is expected to increase by 1.2%/year and the average price of fish and fishery products is expected

to increase by 11.3% over the entire period (Statista 2021b). These values indicate the trend direction of the German fish industry but a full extrapolation to the northern German catfish market cannot be made.

Fish feed accounts for 42.14% of the TC (total costs) and 61.42% of VC (variable costs), which is similar to catfish split-pond aquaculture in Arkansas and Mississippi, where feed accounts for 47–56% TC (54–61% VC) (Kumar et al., 2016). The returns change by $\pm 29,691$ EUR/year for each ten percent change in purchase prices (Table 5.2). In Nigerian pond culture, feed costs average 64% of TC (Omobepade et al., 2015), while in Thai and Vietnamese Pangasius pond culture feed costs reach 81% and 86% of TC (Hasan 2010), respectively, making them even more sensitive to price changes. This difference is caused by a different degree of investment costs, which is higher in RAS operations compared with pond aquaculture. Catfish feed has a protein content of at least 40% with the majority coming from fish meal. While the demand for fish meal increased, its production decreased by 26.5% from 2000–2018 due to climatic events, resulting in a price increase during the same period from 452 USD/t to 1597 USD/t (Jannathulla et al., 2019). Occasionally, *C. gariepinus* growers had to close their operations as high production costs exceeded the selling prices due to high feed costs (FAO 2021c). In order to compensate for the resulting increase in the price of fish feed, catfish farmers must be in a position to pass on the price increases to their customers or to secure long-term price commitments from suppliers by contract. In addition, researchers and farm operators need to continue research on plant-based fish meal substitutes that are accepted by catfish and achieve better growth performance. The declining fish-in/fish-out ratio from 0.63 in 2000 via 0.33 (2010) through to 0.22 (2015) shows the resilience of the sector for fish meal replacement (Jannathulla et al., 2019). It was also demonstrated that a feed additive of 0.5% 1g557 to regular African catfish feed already resulted in a 2% (0.8–3.2%) better growth performance of juveniles, raising the returns by 4367 EUR/year including extra costs (Palm et al., 2022). This suggests high potentials for the further development of more adequate African catfish feed in future.

The investment costs per m³ of production volume are largely determined by the farm size, structural conditions and degree of mechanisation and influence the annual operating result through depreciation. With a share of 22.06% of TC, each ten percent variation changes the returns by $\pm 15,546$ EUR/year. The catfish split-ponds in North America have very low depreciation shares of 3–6% of TC due to lower investment costs, but also have considerably more inefficient production at FCRs of 1.8–2.6 (Kumar et al., 2016) compared with the northern German RAS averaging FCRs of 0.9. Energy costs are far behind feed costs, accounting for 8.39% of TC (12.23% VC). Every ten percent change in gas and electricity prices changes the returns by ± 5913 EUR/year (Table 5.2). Since the farmers in northern Germany produce electricity and waste heat through their own biogas plants, future increases in energy costs are not considered critical. In general, the principle of on-site supply with renewable energies is not only more sustainable, but also more cost-efficient than fossil-based fuels and thus of potential use to RAS (Badiola et al., 2018). In addition, the new government elected in 2021 will promote the expansion of renewable energies (Bündnis 90/Die Grünen, 2021), which makes new subsidies for biogas plants with utilisation of waste heat in the upcoming years likely. Fingerlings account for 6.82% of TC (9.94% VC) and result in a change in returns of ± 4804 EUR/year for each ten percent price change. In Cameroon (0.15–0.25 USD/each) or Nigeria (0.1–0.2 USD/each), prices are also high due to high demand, causing many farmers to prefer collecting wild seed with poor growth performance (FAO, 2021c). In terms of cost, this variable is considered less critical for German farmers, but nevertheless a part of the production is still dependent on fingerlings from the Netherlands. In the case of supply shortages of Dutch producers, it can be assumed that Dutch bulk buyers will be preferred over the northern German catfish farms, which could lead to production bottlenecks. This could in turn jeopardise the supply of customers in the lucrative retail trade

due to contractual quantities that cannot be met. In order to be less dependent on foreign suppliers, a stable regional catfish hatchery producing high quality fingerlings must be established in the medium term.

Wages represent 5.64% of TC (8.22% VC) for a highly mechanised plant without hand slaughtering. Each ten percent price variation changes the returns by ± 3972 EUR/year. In the case of internal hand slaughtering and filleting or a lower level of automation, labor costs increase and they should be considered in more detail. Since mainly unskilled labor is hired for repetitive tasks, payments at or slightly above statutory minimum wage are common. In this context, it should be noted that Germany is planning a successive increase in minimum wages in the coming years, especially with the new government (DGB, 2021; SPD, 2021). Above a certain labor wage, it may be reasonable to dispense with hand slaughtering and outsource this activity or to invest into a filleting machine. Water costs amount to 3.50% of TC (5.10% VC) and change returns by ± 2464 EUR/year for each ten percent change. Since all northern German catfish RAS already have their own wells for industrial water production, further costs can be saved by reducing the price of drinking water and wastewater. The price of drinking water can hardly be influenced and depends on regional conditions and internal consumption in sanitary facilities and slaughtering. Wastewater costs, on the other hand, can be reduced by irrigation on own fields or by further use in hydroponic cultivations (aquaponics).

The list demonstrates that the main focus for African catfish farmers in northern Germany must be on improving sales prices and reducing feed costs in order to run the RAS profitably. The ROI shows that despite the deduction of subsidies only in the scenario of a price increase the ROI already reaches an attractive value (7.86%). Although there are economically more interesting investment objects, from the sustainability perspective and in the light of the current climatic development, regional food production in Europe is to be evaluated as an indispensable future supply model. For this reason, the EMFF, which expired in 2020, was replaced in 2021 by the EMFAF (European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund) (European Commission, 2021a), which runs until 2027. This will continue to support aquaculture projects at 50%, allowing investments to remain attractive under the right conditions. In addition, it aims to support and form “producer organisations”. A producer organisation in northern Germany for the joint creation of synergies and utilisation of resources is assessed as imperative. Thus, joint bulk purchase deals for feed could be closed in order to significantly reduce costs and also to develop an own feed production in the long term. Furthermore, a regional fingerling hatchery could be created in order to produce the entire regional demand cost-efficiently and to achieve independence from Dutch suppliers. In addition, know-how could be exchanged and human resources shared, or investments could be made in jointly used machinery and equipment such as a filleting machine. Furthermore, larger contracts with retail chains could be concluded jointly, as it would be easier to meet contractually agreed purchase quantities at agreed times. This would result in a significant price increase. Moreover, investments could be made in marketing campaigns that increase the image and popularity of the African catfish, thus increasing its demand and sales price. For the establishment, the competitive thinking of the individual actors and personal interests must be overcome, and action plans must be drawn up together with research institutions.

5.4.2. Entrepreneurial Decision Scenarios

Entrepreneurial decision scenarios on the economics of catfish aquaculture are analysed in order to envision future potential for this industry. A RAS twice as large (600 m³ PV) as in the initial model (300 m³ PV) is modelled, which saves costs through economies of scale. In a large plant, the fish can be produced at lower CPU 1.926 EUR/kg and VCU 1.395 EUR/kg which enhance the PPU to 0.274 EUR/kg (Table 5.4). Returns of 175,240 EUR/year and an ROI of 11.45% are achieved (Table 5.5). With a 10% increase in the catfish price to 2.42 EUR/kg, returns and ROI increase by 80.4% (316,167 EUR/year; 20.66%) and would

transform a catfish RAS into an attractive investment. A model study of the profitability of U.S. pond, raceway, and RAS aquaculture showed that RAS systems were not profitable at any size or with any species, but larger systems showed fewer losses (in USD/kg) than smaller systems (Engle et al., 2020). The study found economies of scale for all species/systems/sizes studied, which is consistent with observed trends of generally increasing farm size in aquaculture. The present results show that new investments into larger sized RAS are highly recommended in order to further develop the northern German catfish aquaculture into a profitable business sector. It is advisable to divide larger farms into two or more hygienically separated halls in order to avoid the loss of the entire stock in the event of a disease outbreak.

The scenario of increasing the maximum stocking densities from 450 kg/m³ to 550 kg/m³ increases the VCU slightly (1.532 EUR/kg) but decreases the CPU (1.926 EUR/kg) due to a better utilisation of the production capacities, thus achieving a PPU of 0.103 EUR/kg (Table 5.4). This results in returns of 40,379 EUR/year and an ROI of 4.40% (Table 5.5). Although high stocking densities result in improved profitability, the likelihood of filter and pipe clogging and critical water levels being exceeded is increased. In addition, not all available feeds are suitable for RAS aquaculture and increase nutrient and total suspended matter loads and malfunctioning of biofilters. Therefore, more frequent water monitoring and filter cleaning must be carried out. High stocking densities also promote heterogeneous fish growth, resulting in uneven fillet sizes when slaughtered by hand and high discard rates when slaughtered by machine (Pasch et al., 2022, submitted). Mortality rates and also the FCR of African catfish in commercial RAS can slightly increase with increasing stocking density from extensive (FCR 0.96/0.87–1.14) to intensive (0.99/0.94–1.07) over the entire production cycle (Palm et al., 2018b). Superintensive stocking densities can be seen as questionable from an animal ethics point of view and can affect sales through negative publicity.

The entrepreneurial decision to produce own fingerlings is divided into two options. The first option of self-sufficiency is not recommended because the extra costs of the higher skilled employee and the investment costs for the hatchery are significantly higher than the savings. However, a hatchery can be profitable if production exceeds own requirements. Thus, by producing 300% of the own requirements (option 2), the CPU (0.141 EUR/each) and VCU (0.088 EUR/each) are approximately halved and the PPU improves from -0.090 EUR/each to 0.059 EUR/each (Table 5.4). Besides the returns of 39,871 EUR/year (Table 5.5), the biggest benefit is the independence from external suppliers. An increase in the costs of fingerlings would have only a minimal impact on the KPIs. The critical price threshold for fingerlings in this scenario is 0.128 EUR/fish. If this threshold is undercut at the same output a negative operating result will be achieved again. Among the main problems of own fingerling production, besides high mortality rates and high feed costs (Nyonje et al., 2018), there is still a lack of know-how for efficient breeding of healthy fingerlings, as successful hatcheries keep their know-how as company secret. To overcome this knowledge gap, companies need to work closely with research institutions to establish the best possible protocols for seedling production in future.

The scenario of aquaponics integration through a large-scale greenhouse is a critical economic decision. In addition to high investment costs, a greenhouse opens another economic sector with completely different products and requires additional know-how and distribution channels. In the first option, a 1000 m² tomato greenhouse is integrated. Aquaponic tomato production can be operated commercially and produce marketable fruit if mineral fertilisers are added and the cycles are decoupled, i.e., the fertilised process water from the plants is not recirculated to the fish (Suhl et al., 2016). Aquaponic tomato cultivation can increase fertilisation efficiency by 23.6% compared to hydroponic cultivation (Suhl et al., 2016), but the demand for fertilisation is still high. In the case of tomatoes, the main benefits of aquaponic production are improved marketing opportunities of both fish and plants. The increased sales prices improve the aquaculture KPIs (returns 36,459 EUR/year; ROI 3.78%) and achieve, together with the

greenhouse (returns 15,930 EUR/year; ROI 3.91%), returns of 52,389 EUR/year and an ROI of 3.82% (Table 5.5). A study in the U.S. Midwest found that aquaponics systems require higher investment and operating costs and concurrently lower crop production than hydroponics systems, and only become profitable with a 20% premium price (Quagraine et al., 2018). A 10% increase in tomato prices would increase the returns and ROI by 25.3% (65,639 EUR/year; 4.79%). Option 2 integrates a highly productive 10,000 m² basil greenhouse with artificial lighting for year-round production. Basil has already achieved promising results in aquaponics (Knaus et al., 2020a); only small amounts of additional fertilisation, especially with potassium and iron, would be necessary (Pasch et al., 2021a, b). The greenhouse (returns 248,502 EUR/year; ROI 6.93%) together with aquaculture would result in returns of 284,502 EUR/year and an ROI of 6.26%. In 2015, an international survey reported that of 257 aquaponics farms surveyed, of which 188 were classified as "commercial-scale", less than one-third were profitable in the past year (Love et al., 2015). However, the average commercial production site in the US in this study was only 100 m² of cultivation area and a water volume of 10.3 m³ (Love et al., 2015), suggesting that a large proportion of respondents were more likely to be classified as small-scale/semi commercial (≤ 100 m²) (Palm et al., 2018a). There are contradicting views of aquaponics profitability, but there is consensus that larger systems are economically superior to smaller ones and that profitability depends on retail prices (Valbuena et al., 2012). The integration of a smaller greenhouse is financially viable if the marketing effect spikes higher fish prices. A ten percent increase in basil prices would increase aquaponics KPIs by 71% (returns 486,377 EUR/year; ROI 10.70%). For a production of over 2 million pots, an increase in basil prices would primarily be realised through a larger number of retail customers. In the structurally weak northeast of Germany, this is associated with considerably higher transport costs. Furthermore, an integration on this scale is associated with enormous investment costs of several million euros. Larger investments could become interesting especially if European sustainability funds would also subsidise aquaponic investments with 50%. Aquaponic systems have created a strong public perception of sustainable, regional food production. Aquaponic integration would improve the publicity of the company and create a positive customer experience when buying aquaponic products. In order to use the marketing advantages most efficiently, the aquaponic principle including fresh plants should be publicly visible for the customers and an additional farm store should be integrated where the end-consumer can buy the fresh products with mark-ups of significantly more than 10%. Since aquaponics is a young field of science, there is still a lot of potential for development, especially with regard to increasing productivity. A particularly productive system for aquaponic basil cultivation has proven to be "aeroponics", a system where the roots grow in the air and are sprayed with process water from the fishes (Pasch et al., 2021b).

The last scenario of the higher value-added level is divided into three options. In option 1, hand slaughtering is integrated and 80% of the production is sold as fillet. At an average fillet price of 6.50 EUR/kg, the company generates still relatively unattractive KPIs with returns of 28,529 EUR/year with an ROI of 2.83% due to high labour costs (Table 5.5). However, the higher value of filleting becomes apparent when the fillet price increases due to higher sales to retailers and end-consumer. A ten percent increase in fillet price to 7.15 EUR/kg increases the two KPIs significantly by 239.4% and turns the farm into a lucrative business (96,814 EUR/year; 9.59%). An entrepreneur must calculate at what output the investment in an automated slaughter machine is worthwhile. The advantages for this would be the saving of wages and the identical trimming production. The disadvantages are high investment costs and poorer processing of heterogeneously grown fish. Another option to increase added value is incorporation of additional benefits, because the fish farm can be integrated into the regular farming practices, such as the biogas (CHP, EEG), animal husbandry, crop production and plant irrigation during summer. If a conventional pig fattening is part of the corporation, the ensiled trimmings can be added to the pig feed. The valuable nutrients of the

carcass are profitably reused, but only a certain amount can be processed and added to the pig feed (<10%), otherwise the pigs reject the feed. Accordingly, a larger pig fattening is required to fully utilise the trimmings. The remaining trimmings are sold far below value (50 EUR/t) to fish meal plants in Cuxhaven, where most of the added value takes place. If poorly planned, disposal to rendering plants (40–100 EUR/t) or biogas plants (10–12 EUR/t) may even incur costs (Valbuena et al., 2012). In order to shift the added value to Mecklenburg-Western Pomerania, the farms would have to chemically ensile or deep-freeze their trimmings and process them centrally (in cooperation) into fish meal or use them directly for the production of dry feed pellet.

In option 2, 30% of the production is processed into smoked fillets and 50% into fillets. As smoking is one of the highest processing stages of fish products in northern Germany, the high prices (12.50 EUR/kg) can already generate very lucrative returns of 212,198 EUR/year and an ROI of 20.10%. If the smoked fillet price increases by 10%, returns and ROI increase by 23.2% (261,442 EUR/year; 24.76%). In the European trout market, smoked trout accounted for 307 mil. EUR, more than the half of the total intra-EU trade flow (590 mil. EUR.) in 2020 (EUMOFA, 2021). The main importer among the member states was Germany (308 mil. EUR), with a share of 81% smoked products (249 mil. EUR). Of the global fish and seafood revenue (455.2 bil. USD), processed products accounts for only 28% and fresh products 55%, which can be justified by the high share of Asia (293.6 bil. USD), where consumers prefer fresh products (Frimpong, 2021). A 2011 analysis of the Egyptian aquaculture value chain concluded that the industry is (i.a.) under increasing financial pressure due to a lack of processing and exports, caused by distrust of processed/filleted products. (Macfadyen et al., 2012). The figures demonstrate that processing is one of the most important parts of the European value chain, which inevitably has to be generated internally within the company or inside the country. The third option extends option 2 by a farm store where 25% of the total production is sold and direct marketing prices lead to a mark-up of 75%. Despite the additional costs, the company can already generate returns of 297,204 EUR/year and a lucrative ROI of 23.46%. If the farm store can increase prices by another 10%, the two KPIs increase by 15.6% (343,586 EUR/year; 27.12%). The farm store could also generate sales by trading additional fishery and agricultural products. The difficulty is that the catfish farms are located in the structurally weakest regions in the northeast of Germany and farm stores integrated in the farm location might not have sufficient clientele to sell 25% of the production. The development of more remote farm stores in areas with higher purchasing power, such as Rostock, Schwerin or Greifswald, could be more profitable, but would incur further costs.

The results from the entrepreneurial decision scenarios show with the background of a 50% subsidy from the new European fund (EMFAF) that investments remain attractive. Especially by implementing the right entrepreneurial decisions, the industry can become a profitable economic sector. Since a large proportion of the fishery value chain is created in processing, in addition to filleting, higher levels of processing such as smoking should be targeted within the company. To improve sales prices, larger quantities must be distributed to retailers and end-consumer.

5.5. Conclusions

The farmland-based model catfish farm in northern Germany with an output of 320 t/year is currently gainless but economically viable, without consideration of additional benefits. The biggest impact on the profitability of the farm is the selling price, with each ten percent change changing the returns by ± 70.463 EUR/year. Among the variable costs, feed has the main impact and accounts for 42.14% of TC and 61.42%

of VC. This is much lower compared with already analysed pond aquaculture systems where feed can reach 86% of TC. Each ten percent change in feed price results in a change of returns of ± 29.691 EUR/year, followed in descending order by energy (10% price change changes returns by ± 5.913 EUR/year), fingerlings (± 4.804 EUR/year), wages (± 3.972 EUR/year), and water (± 2.464 EUR/year), which together account for only 24.35% of TC (35.49% of VC). If the investment costs can be reduced by 10%, the operating result will change by ± 15.546 EUR/year due to lower depreciation.

Different entrepreneurial decision scenarios have significant impact on profitability. A plant size with double the production output can achieve attractive returns of 175,240 EUR/year and an ROI of 11.45%. If the whole fish price increases by 10%, these two ratios increase by 80.4% (316,167 EUR/year; 20.66%). This suggests a larger investment if the investors have sufficient capital available. An increase of the maximum stocking density to 550 kg/m³ may increase the ROI by 4.40%, but risks system malfunctioning and bad publicity. An own fingerling production does not make sense in the case of an exclusive self-supply due to high labour costs, but economically turns positive if three times of the own demand is produced and 200% is resold to regional breeders. An aquaponic integration of a 1000 m² tomato greenhouse could result in returns and an ROI of the entire complex of 52,389 EUR/year and 3.82%. A 10,000 m² greenhouse with LED lighting for the year-round cultivation of basil, could generate 284,502 EUR/year and an ROI of 6.26%, together with fish farming. The main advantage of aquaponic farming is the principle of sustainable food production, with higher selling prices, reduced waste and reuse of water. Further strategies to enhance the profitability of northern German catfish aquaculture are to keep the added value within the company by increasing the processing stages.

Investments by northern German farmers in catfish aquaculture remain promising due to possible 50% subsidies of the EMFAF funding program. The farms must ensure that the plants not only contribute to the regional food supply, but also operate economically sustainable. The variable costs of 1,51 EUR/kg can be considered as critical, and investors must consider that also for aquaculture in rural areas larger systems (approx. 600 m³ PV) are significantly more profitable. Farm sizes of about 300 m³ PV are more price sensible and dependent on larger distribution volumes to retailers and end customers. Additional synergies can be generated through the establishment of a regional "producer organisation". Together with possible improvements of feed and cultivation techniques together with increasing fish prices, African catfish farms in northern Germany still have large potential for improvement, turning this economically viable aquaculture into an ecological and economical sustainable highly profitable business.

6. Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war, die Bedeutung rezirkulierender und integrierter Aquakultursysteme für die Landwirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern (MV) zu analysieren und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dazu wurden im FischGlasHaus der Universität Rostock (1) das Welswachstum über einen längeren Zeitraum untersucht, um herauszufinden, wie sich verschiedene Besatzdichten auf das Welswachstum auswirken und welche Bedeutung und Auswirkung dies für kommerzielle Zuchten und die aquaponische Anwendung hat; (2) die Produktivität von neuen aquaponischen Subsystemen zu vergleichen, mit bekannten Systemen zu vergleichen und kommerzielle Anwendungsmöglichkeiten zu diskutieren; (3) mithilfe einer Modellfarm wichtige wirtschaftliche Kennzahlen zu ermitteln und Verbesserungsvorschläge daraus herzuleiten. Die wirtschaftlichen und produktionsgebundenen Kennzahlen der Modellfarm sind realistische Marktdaten aus dem Jahr 2021 und stammen von regionalen Clarias-Zuchten, Futtermittelherstellern, Energieversorgern, Setzlingsproduzenten, Wasserversorgern, Gewächshausproduzenten sowie von eigenen Daten aus dem Betrieb afrikanischer Wels-RAS-Anlagen und Versuchen im FischGlasHaus (FGH) der Universität Rostock.

Die Erkenntnisse dieser Studien werden im folgenden Kapitel zusammengeführt und zusammenhängend mit der Entwicklung und den aktuellen Stand der Clarias- und Aquaponik-Wirtschaft in MV und Deutschland diskutiert. Dies ist die erste detaillierte Untersuchung zum aktuellen Stand und den zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten der Clarias-RAS und Aquaponik in MV.

6.1. Welswachstum

In der wissenschaftlichen Literatur, in dieser Arbeit und besonders im folgenden Kapitel 6.1. wird mit unterschiedlichen Angaben zu Besatzdichten gearbeitet, daher folgt eine kurze Erläuterung zu den möglichen Darstellungsformen. In den Afrikanischen Teichen wird in der Regel die Angabe Fische/m² verwendet, das heißt die Besatzdichte wird auf eine Produktionsfläche bezogen. In dem Thailändischen Netzkäfigversuch von Hensgawat et al. (1997) wird die Angabe Fische/m³ angewendet. Da Teichsysteme meist einen sehr simplen Aufbau haben und keine Filtertechnik außerhalb der Teiche stehen, gilt dort Produktionsvolumen = Anlagenvolumen.

Für die Europäischen RAS-Anlagen wird in dieser Arbeit einheitlich die Angabe max. Besatzdichte (kg/m³) verwendet. Der Wert gibt an wie hoch die maximale Besatzdichte am Tag der Schlachtung wäre. Da die Fische bei Schlachtung im Schnitt 1,5 kg wiegen, kann die max. Besatzdichte bei Schlachtung durch 1,5 dividiert werden, um die Besatzdichte in Fische/m³ zu erhalten. Um die durchschnittliche Besatzdichte der Tanks über den gesamten Zuchtzeitraum in kg/m³ zu erhalten, kann die max. Besatzdichte als Faustformel durch 2,5 dividiert werden. Eine max. Besatzdichte von 450 kg/m³ hat demnach 300 Fische/m³ und eine durchschnittliche Besatzdichte ⁹ von 180 kg/m³. In RAS-Anlagen beziehen sich alle Werte zu Besatzdichten ausschließlich auf das Produktionsvolumen (PV). Außerdem kann die Europäische Clarias-Zucht in drei Zuchtphasen unterteilt werden: In der ersten Phase findet die räumlich getrennte Aufzucht der Setzlinge bis zu einem Gewicht von ca. 12 g statt. In der zweiten Zuchtphase werden die Setzlinge in kleinere Aufzuchtanks der Kreislaufanlagen transferiert und wachsen, je nach Züchter, auf ein Gewicht von 100-300 g heran. In diesen Tanks sind die max. Besatzdichten geringer in kg/m³, aber signifikant höher in Fische/m³, als in den größeren Produktionstanks. Anschließend werden die Fische sortiert und wachsen

⁹ Die exakte durchschnittliche Besatzdichte berechnet sich aus der Summe der Gewichte je Volumeneinheit (m³) von Tag 1-n, dividiert durch n. Das n steht für den letzten Tag der Fische im Tank.

in der dritten Zuchtphase in den Produktionstanks bis zur Schlachtreife von 1,5 kg heran. Eine Anlage mit 300 m³PV hat durchschnittlich 90 m³ Filtervolumen, also insgesamt 390 m³ Anlagenvolumen. Von den 300 m³PV sind durchschnittlich 280 m³ Produktionstanks und 20 m³ Aufzuchtstanks. Die Besatzdichte-Angaben beziehen sich in diesem Kapitel auf die Produktionstanks.

6.1.1. Teichzucht vs. RAS

Aus Asiatischer und Afrikanischer Teichzucht ist bereits länger bekannt und mehrfach nachgewiesen worden, dass Afrikanische Raubwelse in geringeren Besatzdichten ein besseres Wachstum aufweisen (Micha, 1976; Hengsawat et al., 1997; Shoko et al., 2016). In dem ersten Clarias-RAS Besatzdichten Experiment, dass das Welswachstum über einen langen Zeitraum von 155 Tagen beobachtete, konnte in geringeren Besatzdichten ein homogeneres Wachstum beobachtet werden, was in einem besseren Fischwachstum resultierte (Abb. 6.1) (Pasch et al., 2022, eingereicht).

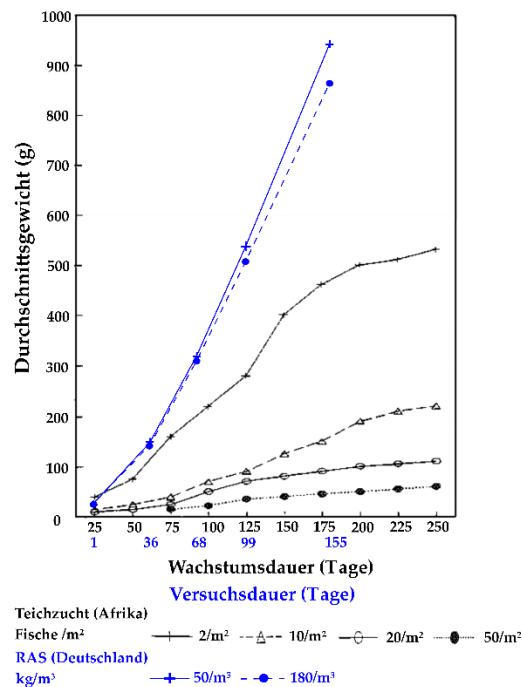


Abbildung 6.1. Verhältnis zwischen Besatzdichte und Wachstum von *C. gariepinus* in norddeutscher RAS (blau) und in Erdteichen in der zentralafrikanischen Republik (schwarz; eigene Darstellung, basierend auf Micha, 1976, zitiert auf FAO, 1996).

In einem Afrikanischen Teichzucht-Besatzdichteexperiment mit 3, 6 bzw. 9 Clarias/m² über den gesamten Wachstumszyklus von 180 Tagen hatte die höchste Besatzdichte zwar den höchsten Gewinn, aber eine signifikant geringere spezifische Wachstumsrate und ein geringeres Endgewicht der Fische (Shoko et al., 2016), wodurch der Gewinn/Fisch geringer ist. Für die Clarias-Teichzucht in Benin wurde beschrieben, dass die höchste Besatzdichte (10 Fische/m²) zur höchsten Nettoertragsrate führte, aber die mittlere Besatzdichte (7 Fische/m²) einen höheren Rentabilitätsindex (Nettoertrag pro Gesamtproduktionskosten) hatte (Oké & Goosen, 2019). Auch in Thailandischen Clarias-Teichkäfigen wurden mit den höchsten Besatzdichten größere Gewinne erzielt, aber das Fischgewicht war negativ besatzdichteabhängig und die geringeren Besatzdichten erzeugten die schwersten mittleren Fischgewichte (50 Fische/m³ = 386 g; 100 Fische/m³ = 365g; 150 Fische/m³ = 357 g; 200 Fische/m³ = 347 g) (Hengsawat et al., 1997). Ein besseres Fischwachstum bedeutet, dass das eingesetzte Futter effizienter in Fischbiomasse

umgewandelt wird, wodurch die geringeren Besatzdichten zu einer Verbesserung des Verhältnisses Futterkosten/kg Fisch führen. Der Anteil des Fischfutters an den Gesamtkosten (GK) in der norddeutschen Clarias-RAS beträgt 42,1% und an den variablen Kosten (VC) 61,4 % (Pasch und Palm, 2021), was vergleichbar ist mit der „split-pond“ („getrennter Teich“) Welsaquakultur in Arkansas und Mississippi, wo der Anteil des Futters an den GK 47-56 % beträgt (VC 54-61 %) (Kumar et al., 2016). In der nigerianischen Teichwirtschaft betragen die Futterkosten im Durchschnitt 64 % der GK (Omobepade et al., 2015), während in der thailändischen und vietnamesischen Pangasius-Teichwirtschaft die Futterkosten 81 % bzw. 86 % der GK erreichen (Hasan, 2010). Für den deutlich höheren Kostenanteil des Futters an den Gesamtkosten in Afrika und Asien sind vor allem drei Gründe verantwortlich. (1) Zum einen sind dort die Personalkosten deutlich geringer, wodurch der proportionale Anteil des Futters steigt. (2) Zudem verbrauchen die Teichzuchten im Gegensatz zur energieintensiven RAS keine bzw. kaum Energie durch Pumpen und Heizung. (3) Der Hauptgrund für diesen proportionalen Unterschied sind jedoch die hohen Investitionskosten der RAS-Anlagen, welche zu hohen Abschreibungen und damit einem hohen Fixkostenanteil an den Gesamtkosten führen, bzw. bei den Teichzuchten sehr gering sind. Die Wasserkosten machen grundsätzlich einen sehr kleinen Teil der Kosten aus und die Setzlingskosten steigen und sinken annähernd proportional mit der Besatzdichte und den benötigten Jungtieren.

Dies verdeutlicht, dass die Teichzuchten deutlich preissensitiver auf Futterpreisschwankungen reagieren als die Clarias-RAS in Europa. Grundsätzlich gilt, je höher der Anteil der Futterkosten an den gesamten Produktionskosten ist, desto mehr verschieben sich aufgrund der Verbesserung des Verhältnisses Futterkosten/kg produziertem Fisch die Vorteile hin zur extensiven Clarias-Zucht. Besonders im Falle von Versorgungsengpässen mit beispielsweise Setzlingen oder Fischfutter sollten die Teichzuchten geringe Besatzdichten bevorzugen. Teichzuchten, bei denen die Verfügbarkeit und Preise von Setzlingen und Futter keine Probleme bereiten, oder Zuchten, die nicht ausreichend Fläche zur Verfügung haben, sollten aufgrund des höheren Gesamtertrages höhere Besatzdichten bevorzugen. Aufgrund der offenen Aquakultursysteme müssen im Gegensatz zur RAS hierbei auch ökologische Faktoren berücksichtigt werden. Beispielsweise können hohe Besatzdichten eher zu Umweltschädigungen führen, welche zu schwer quantifizierbaren Umweltkosten, aber auch zur Unnutzbarkeit der Zuchtfläche führen können. Beispielsweise stehen in der Westafrikanischen Clarias-Teichwirtschaft die kurzfristige Gewinnmaximierung durch hohe Besatzdichten mit der langfristigen Nachhaltigkeit in direktem Zielkonflikt (Oké und Goosen, 2019).

In europäischer Clarias-RAS müssen aufgrund der hohen Investitionskosten, den unterschiedlichen Proportionen der Produktionsfaktorkosten und des begrenzten Produktionsvolumens andere betriebswirtschaftliche Überlegungen geführt und daraus unterschiedliche Produktionsempfehlungen abgeleitet werden. Die teuren RAS-Anlagen sind mit ihrer Filtertechnik dazu ausgelegt, hohe Besatzdichten zu fahren und durch größtmöglichen Output rentabel zu produzieren. Eine durchschnittliche deutsche Clarias-Farm mit 300 m³ Produktionsvolumen (Pasch und Palm, 2021) würde unter der Annahme der getesteten Besatzdichten in Pasch et al. (2022, eingereicht) hohe Verluste einfahren. Das Ausgangsmodell hat eine max. Besatzdichte von 450 kg/m³ und macht damit weder Gewinne noch Verluste. Eine zehnpromtente Senkung auf eine max. Besatzdichte von 405 kg/m³ würde der Farm Verluste von 30 Tsd. EUR/Jahr verursachen. Eine max. Besatzdichte von 50 kg/m³ (33 Fische/m³) würde in der Modellfarm Verluste von 265 Tsd. EUR/Jahr bedeuten. Eine max. Besatzdichte von 180 kg/m³ (120 Fischen/m³) würde ebenfalls zu hohen Verlusten von 179 Tsd. EUR/Jahr führen. Selbst unter der Annahme, dass geringere Besatzdichten zu einer Verbesserung des FCR von 0,9 zu sehr guten 0,8 führen würden, ständen immer noch Verluste von 165 Tsd. EUR/Jahr zu Buche. Geringere Besatzdichten führen in RAS-Anlagen zu beinahe proportionaler Senkung des Bedarfs und der Gesamtkosten von Fischfutter und

Setzlingen. Die Kosten je produzierter Einheit bleiben bei diesen zwei Inputfaktoren daher in etwa gleich hoch. Die Wasserkosten je produzierter Einheit nehmen bei höheren Besatzdichten leicht ab, da beispielsweise eine max. Besatzdichte von 50 kg/m³ ein Wasseraustauschrate von 5 %/Tag benötigt, während eine neunfach größere max. Besatzdichte von 450 gute Wasserwerte mit einer fünffach höheren täglichen Wasseraustauschrate von 25 %/Tag aufrechterhalten kann. Auch die Arbeitskosten je produzierter Einheit nehmen mit steigenden Besatzdichten leicht ab.

Die Energiekosten je produzierter Einheit nehmen jedoch stark mit zunehmender Besatzdichte ab, da zur Heizung der Halle, zum Betrieb der Pumpen, zur Beleuchtung, etc. weiterhin beinahe die gleiche Energie benötigt wird und nur die Wasserheizkosten durch den geringeren Wasserverbrauch verringert werden können. Die Gesamtkosten der Energie nehmen daher trotz der gesunkenen Produktionsmenge unterproportional ab, bzw. steigen um ein Vielfaches je produzierter Einheit. Dies führt bei einer maximalen Besatzdichte von 180 kg/m³ zu einem signifikanten Anstieg der variablen Produktionskosten. Das Hauptargument gegen geringe Besatzdichten in RAS ist jedoch, dass bei abnehmender Besatzdichte auch die gesamten Fixkosten unverändert hoch (221 Tsd. EUR/Jahr) bleiben, bzw. die Fixkosten je produzierter Einheit von 0,69 EUR/kg um knapp 150% auf 1,72 EUR/kg zunehmen.

Würde die max. Besatzdichte von 450 kg/m³ auf 180 kg/m³ verringert, würden die gesamten Produktionskosten von 705 Tsd. EUR um 35% auf 461 Tsd. sinken, aber zu einem Anstieg der Gesamtkosten je produzierter Einheit von 2,20 EUR/kg um 63% auf 3,59 EUR/kg führen (Ohne Berücksichtigung der geringfügigen Kosteneinsparungen). Bei aktuellen Abnahmepreisen des Großhandels von 1,80 EUR/kg Rundfisch (lebender oder toter ganzer Fisch, unausgenommen; Stand 2022) bedeutet eine solch geringe Besatzdichte in einer durchschnittlichen norddeutschen Clarias-Farm eine höchst unwirtschaftliche Produktion. Auch unter der Annahme, dass die gesamte Produktion filetiert werden würde, lägen die variablen, bzw. Gesamtkosten bei 5,37 EUR/kg Filet bzw. 9,80 EUR/kg Filet und würden damit bei einem aktuellen Abnahmepreis von 6,50 EUR/kg (Stand 2022) zu hohen Verlusten führen.

Die erste Arbeitshypothese besagt, „**Clarias-RAS in Norddeutschland kann wegen hoher Fix- und Energiekosten nur bei hohen Besatzdichten profitabel produzieren**“. Es wurde ersichtlich, dass RAS-Anlagen primär wegen der hohen Fixkosten aber auch aufgrund der nicht proportional zur Besatzdichte abnehmenden Energiekosten möglichst hohe max. Besatzdichten von > 450 kg/m³ (> 300 Fische/m³; durchschnittliche Besatzdichte > 180 kg/m³) fahren sollten, um die Fixkosten auf einer größeren Produktionsmenge zu verteilen und die hohen Investitionen amortisieren zu können. Solch hohe Besatzdichten sollten von einem erfahrenen Produktionsleiter unter regelmäßigen Wasserparameter- und Filter-Kontrollen beaufsichtigt werden. Geringe Besatzdichten in RAS machen nur Sinn, wenn aufgrund von Setzlings- oder Futtermittelengpässen absehbare Versorgungsprobleme auftreten. Als Managementmaßnahme könnten dann übergangsweise geringere Besatzdichten in den einzelnen Becken gefahren werden, um heterogenes Fischwachstum zu verhindern. Die Daten haben gezeigt, dass die Berechnung des Gewinns/kg Fisch durch die direkt zurechenbaren Kosten Futter und Setzlinge in Kombination mit dem besseren Fischwachstum schnell zu der falschen Annahme in Europäischer RAS führen kann, dass geringe Besatzdichten den Profit je Fisch verbessern. In Europäischen Zuchten, die hohe Energie- und Fixkosten haben, kommt diese Rechnung nicht auf, daher sollte aus wirtschaftlicher Sicht möglichst immer bei den größtmöglichen Besatzdichten gezüchtet werden.

6.1.2. Adultes Fischwachstum und Sortierung

In dem bis dato einzig veröffentlichten Besatzdichteexperiment von adulten Afrikanischen Raubwelsen in RAS mit 1044,6 ± 31,6 g schweren Fischen in vier Besatzdichten von 67, 155, 244, und 333

Fischen/m³ (entspricht max. Besatzdichte bei Schlachtung von 100, 233, 366, 500 kg/m³) konnten keine Auswirkungen auf Wachstum oder Mortalität festgestellt werden (van de Nieuwegiessen et al., 2009). Bemerkenswert hierbei ist jedoch, dass die Fische bei Versuchsstart eine sehr geringe Standardabweichung ($\pm 31,6$ g) aufwiesen, also vor Versuchsstart sortiert wurden und damit homogene Größen bzw. Körpergewichte hatten. In der kommerziellen Clarias-Zucht in RAS werden die Fische für zwischen 100-300 g einmal sortiert und wachsen im Anschluss auf ihr Endgewicht von 1,5 kg heran. Bei einem Gewicht von etwa 1 kg sind deutlich höhere Varianzen des Gewichts anzunehmen, welche die Wachstumsparameter beeinflusst hätten. Um eine realistische Aussage zum Wachstumsverhalten in unterschiedlichen, kommerziell angewendeten Besatzdichten treffen zu können, müssten die Fische mit einem homogenen Durchschnittsgewicht von 150 g mit einer realistischen Standardabweichung von etwa ± 10 g sortiert werden und anschließend Heterogenität und Wachstumsparameter der restlichen Wachstumsphase bis zur Schlachtreife von 1,5 kg untersucht werden. In der Arbeit von Nieuwegiessen et al. (2009) wurden keine Standardabweichungen der finalen Ergebnisse angegeben, welche auf ein heterogenes Wachstum der höheren Besatzdichten hätten hinweisen können. In einem weiteren Wachstumsversuch wurden nach sechs Monaten und auch ohne zwischenzeitige Sortierung bei der niedrigsten max. Besatzdichte von 100 kg/m³ das höchste Endgewicht von 1 831 g festgestellt, gefolgt von der mittleren max. Besatzdichte (200 kg/m³; 1 710 g) und der höchsten max. Besatzdichte (400 kg/m³; 1 615 g) (Baßmann et al., 2022, in Bearbeitung).

Die zweite Arbeitshypothese lautet „**Besatzdichten haben Einfluss auf das Wachstum Afrikanischer Raubwelse in RAS**“. Für afrikanische Welse konnte nachgewiesen werden, dass homogene Gewichtsgruppen weniger aggressives Verhalten und niedrigere Cortisolwerte aufweisen als heterogene Gruppen (Martins et al., 2006). Da chronischer Stress nachweislich das Wachstum von Fischen verringert (Barton, 2002; Conte, 2004; Huntingford et al., 2006), kann ein schlechteres Wachstum auf das heterogene Wachstum der Afrikanischen Raubwelse in erster Instanz zurückgeführt werden. Heterogenes Wachstum (hohe Standardabweichungen, bzw. Varianzen) treten bei höheren Besatzdichten des Afrikanischen Raubwelses verstärkt auf (Pasch et al., 2022, eingereicht) und sind ein Warnsignal für eine bevorstehende Verschlechterung des Fischwachstums. Um den Ertrag bei hohen Besatzdichten weiter zu optimieren, sollte daher ein heterogenes Wachstum der Fische vermieden werden. Da eine signifikante Verschlechterung der Fischlänge bei einem Fischgewicht bereits bei ca. 150 g auftrat, empfiehlt sich die Sortierung vor einem durchschnittlichen Fischgewicht von 150 g in beispielsweise drei Größenklassen. Bei der Sortierung ist problematisch, dass der Wels trotz seiner Robustheit aufgrund der nicht vorhandenen Schuppen sensibel auf das Sortieren und Abfischen reagiert und schnell Hautverletzungen auftreten können. Daher praktizieren die meisten Betriebe eine Handsortierung per Augenmaß, welche aber arbeits- und damit kostenintensiv ist und daher bevorzugt nur einmal während der Mastperiode vorgenommen wird. Eine zweite Sortierung beispielsweise bei 1 kg wäre effizienter und würde dazu führen, dass hohe Besatzdichten das Wachstum nicht mehr negativ beeinflussen würden, wie Nieuwegiessen et al. (2009) für homogen sortierte Fische nachgewiesen hat. Dies ist aber aufgrund der größeren Fische mit einem zusätzlichen und deutlich gesteigerten Arbeitsaufwand verbunden und das Kosten-Nutzenverhältnis muss abgewogen werden. Der Einsatz von Sortiermaschinen ist bei Afrikanischen Raubwelsen zwar möglich, aber problematisch, da sich herkömmliche Maschinen nicht gut auf die zum Körper unverhältnismäßig proportionierten Kopfgrößen der Welse einstellen lassen. Aufgrund der aktuellen Lage der Clarias-Wirtschaft und niedrigen Verkaufspreise wird bei der Schlachtung eher eine ineffiziente Filetausbeute bevorzugt und von Investition in teurere Sortiermaschinen oder eine zweite arbeitsintensive Sortierung der größeren Fische in der Regel abgesehen.

6.1.3. Einteilung von Besatzdichten

In Forschung und Wirtschaft existiert aktuell keine einheitliche Einteilung von Besatzdichteklassen für Afrikanische Raubwelse, daher wurde Tabelle 6.1 ein Vorschlag zu einer Klassifizierung erstellt.

Tabelle 6.1. Klassifizierung der unterschiedlichen Besatzdichten des Afrikanischen Raubwels in Teichwirtschaft und rezirkulierenden Aquakultursystemen (RAS).

Max. Besatzdichte ^{1,2}	Besatzdichte ²	Bezeichnung	Anwendung
<u>Teichwirtschaft</u>			
kg/m ²	Fische/m ²		
< 4	< 5	Extensiv	Bei begrenztem Futter und Setzlingen; hoher Gewinn/Fisch
4-< 8	5-< 10	Semi-Intensiv	Hoher Gewinn/Fisch und höhere Erträge als Extensiv
8-< 16	10-< 20	Intensiv	Hoher Gesamtertrag
16-< 40	20-< 50	Hoch-Intensiv	Hoher Gesamtertrag bei begrenzter Fläche
≥ 40	≥ 50	Super-Intensiv	Maximierung des Gesamtertrags bei begrenzter Fläche
<u>RAS</u>			
kg/m ³	Fische/m ³		
< 50	< 33	Extensiv	Heimische RAS und Aquaponik für Eigenbedarf
50-< 150	33-< 100	Semi-Intensiv	Heimische RAS und Aquaponik mit Gewinnerzielungsabsicht bei den Pflanzen
150-< 300	100-< 200	Intensiv	Semikommerzielle RAS
300-< 500	200-< 333	Hoch-Intensiv	Kommerzielle RAS
≥ 500	≥ 333	Super-Intensiv	Kommerzielle RAS mit erfahrener Personal und regelmäßigen Kontrollen

¹ Für die max. Besatzdichten wurden die Annahmen getroffen, dass die Fische auf 0,8 kg in der Teichkultur und auf 1,5 kg in RAS heranwachsen. ² Die Besatzdichten beziehen sich in der Teichwirtschaft auf die Produktionsfläche (m²) und in RAS auf das Produktionsvolumen (m³).

6.2. Aquaponik mit Afrikanischem Raubwels

6.2.1. Hydroponische Subsysteme

Kapitel 3 hat gezeigt, dass das DRF-System bei Wassertemperaturen über 30 °C eine höhere Produktivität bei Blattgemüse (Kao & Hysiang, 1991; Remy et al., 2005) und Basilikum (Pasch et al., 2021a) aufweist, als Raft- und NFT-Systeme. Die frühen Forschungsergebnisse von Kao & Hysiang (1991), die der DRF eine überlegene Performance bei hohen Wassertemperaturen gegenüber herkömmlichen Systemen belegten, konnten in den aquaponischen Studien dieser Arbeit, unter der integrierten Produktion von Afrikanischem Raubwels (*Clarias gariepinus*) und Basilikum (*Ocimum basilicum*), verifiziert werden. In einem 36 tägigen Vergleichsexperiment von DRF, Raft (= DWC) und Growpipes (deutsch: Wachstumsrinnen = NFT) im FischGlasHaus im Hochsommer, lag die durchschnittliche Wassertemperatur bei 28 °C, erreichte aber tagsüber Spitzen von bis zu 34,4 °C (Pasch et al., 2021a). Dies führte zu einer signifikant höheren Blattbiomasse im Nass- und Trockengewicht in DRF (45,36 g; 4,96 g) im Vergleich zu Raft (34,94 g; 3,74 g) und Growpipes (32,74 g; 3,75 g). In einem weiteren Versuch betrug die durchschnittliche Wassertemperatur 26 °C mit Spitzen < 30 °C, was in einem identischem Basilikumwachstum in Feucht- und Trockenmasse der Blätter in DRF (20.19 g; 2.83 g) and Raft (20.35 g; 2.84 g) resultierte (Pasch et al., 2021a).

Die dritte Arbeitshypothese „Das DRF System erzielt in der Aquaponik bei hohen Wassertemperaturen bessere Pflanzenwachstumsergebnisse als konventionelle hydroponische Subsysteme“ kann somit ebenfalls angenommen werden. Die Luftwurzeln im DRF- System sorgen für eine Aufrechterhaltung der Wurzelaktivität und führen damit zu einer signifikant höheren feuchten und trockenen Biomasse der wirtschaftlich wichtigen Blätter. Bei Wassertemperaturen, die förderlich für Basilikumwachstum sind (mittel 26 °C, max. 28,7 °C), war dieser Vorteil nicht mehr vorhanden und DRF

und Raft hatten eine ähnliche Wachstumsperformance, bei erhöhtem Arbeitsaufwand im DRF System (Pasch et al., 2021a). Eine kommerzielle Anwendung des DRF Systems macht nur unter der Voraussetzung Sinn, dass die Wurzeln der Zuchtorganismen längere Zeit Wassertemperaturen von über 30 °C ausgesetzt sind, ansonsten rechnet sich der Mehraufwand nicht. In gewöhnlicher deutscher Hydrokultur treffen diese Zuchtbedingungen aufgrund der geografischen Lage und den damit zusammenhängenden Temperaturen selten zu. Das DRF-System ist daher am besten für (sub-) tropischere Klimazonen geeignet um die Produktion ganzjährig aufrechtzuerhalten (Kao & Hysiang, 1991) und die Energiekosten um 11% zu reduzieren (Silva et al., 2018). In Deutschland könnte das DRF System jedoch als eine Technische Erweiterung gewöhnlicher DWC Systeme angewendet werden. In besonders heißen Gewächshäusern ohne ausreichende Kühl-, Belüftungs- und Schattiertechnik, in denen die Wassertemperaturen in den Sommermonaten über längere Zeiträume 30 °C übersteigen, könnte über eine Modifikation der Technik nachgedacht werden. Dabei könnten in einem simplen Design die Flöße um wenige Zentimeter angehoben oder die Wasserspiegel mithilfe eines regulierbaren Siphons tiefer eingestellt werden, so dass Teile des Wurzelansatzes atmosphärischer Luft ausgesetzt sind und dadurch die Wurzelaktivität aufrechterhalten wird. Zudem muss bei der Anwendung in Deutschland darauf geachtet werden, dass der Zwischenraum zwischen Floß und Wasser möglichst so isoliert ist, dass dort keine starken Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen auftreten, welche zur Verholzung die Luftwurzeln führen können (Pasch et al., 2021a).

Kostentechnisch ist kaum etwas bekannt über die Anwendung von DRF Systemen in unseren Breitengraden. Der Aufbau bedarf bei nicht-automatisierten Vorrichtungen jedoch nur geringe technische Modifikationen, wodurch sich die Mehrkosten in Grenzen halten. Für eine Investition von 27 700 USD in ein 862 m² Gemüsegewächshaus in Taiwan wurden im Jahr 1991 jährliche Bruttoeinnahmen von 35 718 USD, laufende Kosten von 26 190 USD und damit ein Gewinn von 9 529 USD/Jahr berechnet (Kao & Hysiang, 1991). Unter der Annahme, dass Preise und Kosten bis heute verhältnismäßig gleich angestiegen sind, deutet der ROI von 34% auf eine sehr rentable Investition in DRF Systeme in den entsprechenden Klimazonen hin. Unter den variablen Kosten hatte Arbeit mit 44,9% den größten Anteil an den variablen Kosten, gefolgt von Dünger 16,6%, Packmaterial 12,4%, Ernteverlusten 8,9%, Styroporblöcken 7,6%, Strom 7,5% und Samen, Wasser, Chemikalien 2,2%. Im Falle einer aquaponischen Integration kann durch das mit Nährstoffen angereicherte Prozesswasser von einer Reduktion der Düng- und Wasserkosten ausgegangen werden.

Die vierte Arbeitshypothese besagt **„Die Aeroponik ist ein hochproduktives Anbausystem, das sich zur kommerziellen aquaponischen Anwendung eignet“**. In der ersten wissenschaftlichen aquaponischen Anwendung der Aeroponik wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt. Basilikum hat in der Aeroponik über 40% mehr feuchte und 50% mehr trockene Blattmasse produziert als das für Kräuterzucht häufig verwendete DWC Raft System („deep water culture“; deutsch: Tiefwasserkultur) und das DRF System (Pasch et al., 2021b). In kommerzieller Anwendung würde dies zu signifikant gesteigerten Umsätzen durch schnellere Ernten oder Preisaufschläge durch bessere Pflanzen führen. Solch hohe Ertragssteigerungen können auch die höheren Investitionskosten eines Aeroponiksystems rechtfertigen. Die zusätzlichen Kosten der zwischengeschalteten Filtersysteme (z.B. Trommelfilter, Universalfilter, etc.) und Sprühdüsen-Technik könnten sich schon nach kurzer Zeit in kommerziellen Anlagen amortisieren. In einem 1 000 m² Gewächshaus mit einer Produktion von ca. 200 Tsd. Basilikumtöpfen/Jahr (KTBL, 2021b.) und einem Abgabepreis von 0,85 EUR/Topf an den Lebensmitteleinzelhandel (LEH) würden 50% schnellere Ernten, bzw. 50% Preisaufschläge zu einem Wachstum des jährlichen Umsatzes von 170 Tsd. EUR auf 255 Tsd. EUR (+ 85 Tsd. EUR/Jahr) führen, wodurch die Anschaffungskosten eines guten Filter- und Sprühdüsenteknik spätestens im zweiten Jahr amortisiert werden könnten. Die aeroponische Eignung

von Basilikum konnte bestätigt werden. Die wirtschaftlich relevanten Teile der Biomasse haben nicht nur quantitativ bessere Werte (Pasch et al., 2021b), sondern haben auch eine überdurchschnittliche Nährstoffqualität (Salachas et al., 2015).

Bezüglich des Systemdesigns hat die aquaponische Anwendung der Aeroponik noch viel Entwicklungspotential. Beispielsweise konnte süßes Basilikum (*O. basilicum*) in Wachstumsrinnen mit einer geringeren Tiefe von 15 cm und 30 cm eine höhere Produktion von Trockenbiomasse, Pflanzenhöhe und Blättern pro Pflanze im Vergleich zu einer Tiefe von 70 cm aufwiesen (Salachas et al., 2015). Das geringere Volumen der Rinnen hat zu verbesserter Nährstoffverfügbarkeit und -aufnahme geführt. Die richtige Systemgröße wird aber auch von den charakteristischen Wurzeleigenschaften der jeweiligen Pflanze bestimmt, als auch von der Sprüh- und Düsentechnik. So wird beispielsweise von einem gesünderen System mit gesünderem Wurzelwachstum berichtet, wenn Vernebelungsintervalle anstelle einer Dauerbenetzung oder hydroponischen Techniken eingesetzt werden (Clawson et al., 2000). Bei kontinuierlicher Vernebelung wurde vermehrtes Pilz- und Bakterienwachstum in der Nähe oder auf den Pflanzen festgestellt. Weitere wichtige aeroponische Parameter sind Tröpfchengröße und -geschwindigkeit, da diese die Nährstoffaufnahmeeffizienz der Wurzeln beeinflussen (Clawson et al., 2000). Die Anpassung der Düsentechnik, bzw. Tröpfchengröße an den Reinheitsgrad des Fischprozesswassers kann als größte Herausforderung dieser aquaponischen Implikation der Aeroponik gesehen werden (Kotzen et al., 2019; Pasch et al., 2021b). Außer der Arbeit von Pasch et al. (2021b) existieren bis dato keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu dem Thema. Aus den zahlreichen Videos und Diskussionsbeiträgen im Internet wird ebenfalls die Verstopfung von Sprühnebelgeräten und die Notwendigkeit der Feinfiltration von Aquaponik-Lösungen angesprochen (Kotzen et al., 2019).

In der ersten wissenschaftlichen Anwendung dieser Arbeit wurde in der Filtertechnik mit dem Trommelfilter (Wasserfilteranlage ITF 30, 25–30 m³/h, Fackler Gewächshaustechnik, Munzingen, Deutschland) eine professionelle Komponente verbaut, dennoch bedarf es bezüglich der zur Verunreinigung des Prozesswassers angepassten Filtergröße und Düsentechnik, sowie des generellen Systemaufbaus noch viel Forschungsbedarf und Entwicklungspotential (Salachas et al., 2015; Pasch et al., 2021b). Die verwendeten 180°-Sprühdüsen (Micro-Drip-System, Gardena, Ulm, Deutschland) haben das Wasser gut zerstäuben können, waren jedoch nicht fein genug zur Bildung von richtigem Nebel. Zur Bildung von feinem Nebel sind noch deutlich aufwendigere Filtertechniken notwendig, wobei fraglich ist, ob dieser (kostentechnische-) Aufwand auch durch weitere Produktivitätssteigerung rechtfertigt werden kann. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten einer hocheffizienten Filtertechnik ist die Aeroponik für kleinskalige und nicht gewerbliche Anlagen weniger geeignet, da die geringe Produktion die Anschaffungskosten in den meisten Fällen nicht amortisieren wird. Alternativ zur teuren Filtertechnik und den feinen Düsen könnten größere Düsen gewählt werden, die sich nicht mit den Partikeln des Prozesswassers zusetzen können und somit auf zwischengeschaltete Filter verzichtet werden kann. Ob diese Methode ähnlich produktiv ist wie die getestete Methode, muss überprüft werden. In einem Folgeversuch mit Clarias und Minze (*Mentha spicata*) wurden Ultraschallvernebler (Mist Maker, DK9-36) zur effizienten Vernebelung („Fogponik“) des Fischprozesswassers angewendet, um die Probleme der Filter- und Sprühdüsentechnik zu umgehen (Hummel, 2020). In dem Nebel wurden jedoch weniger als 5% der Nitratwerte (29 mg/l) wie in der Nährlösung gemessen (613 mg/l), in der sich die Vernebler befanden. Zudem wärmte sich das Prozesswasser, und dadurch der Nebel, durch den Einsatz der Ultraschallvernebler stark ($31,53 \pm 2,22$ °C) auf, was dem Pflanzenwachstum weiter schadete und zusammen mit dem Nährstoffmangel zu einem sehr schwachen Pflanzenwachstum in der Fogponik führte. Diese Technik könnte sich zur Zucht von tropischen Epiphyten (Aufsitzerpflanzen) mit geringem

Stickstoffbedarf und Anpassung an hohe Temperaturen und Luftfeuchtigkeit eignen, welche im terraristischen Handel hohe Preise erzielen.

Diese Steigerungszahl der Produktivität durch Aeroponik sollte für weitere Fisch-Pflanzen Kombinationen untersucht werden und bei weiteren Pflanzen, bei denen der oberirdische Teil der Pflanze der essbare Teil ist. Zudem sollte die Aeroponik mit höherpreisig gehandelten aquatischen Organismen getestet werden, welche eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, die Aquakultur des Aeroponikbetriebes rentabel gestalten zu können.

6.2.2. Betriebswirtschaftliche Herausforderungen

Zu den besonderen Schwierigkeiten und Herausforderungen gehören verschiedene Bereiche. Als Basis benötigt jede Anlage Experten der Fisch- und Pflanzenzucht, welche die Anlagentechnik beherrschen und die speziellen Zuchtanforderungen der zwei Organismen sowie ihrer Wechselwirkungen kennen. Neben dem komplexen biologischen-, physikochemischen- und technischen Wissen, welches das Personal einer Aquaponik benötigt, braucht die Unternehmung zudem Personen, die ein breites Wissen aus möglichst vielen Disziplinen der Betriebswirtschaftslehre besitzen. Zu den wichtigsten Kernkompetenzen zählen dabei gute Verkäuferqualitäten und ein breites Wissen im strategischen und operativen Marketing, da eine wichtige Aufgabe darin besteht, die ausgewählten Fisch- und Pflanzenarten als nachhaltige Premiumprodukte mit Preisauflagen zu vermarkten. Die Rentabilität ist der entscheidende Erfolgsfaktor jeder Unternehmung, daher braucht jede Anlage einen Geschäftsführer, der die Kosten überblicken und Budgets planen kann. Die Gründer benötigen Wissen über Finanzierung und Investition, da die hohen Investitionskosten ein Haupthindernis der kommerziellen Aquaponik sind (König et al., 2016). Die Suche nach öffentlichen Finanzierungsmöglichkeiten wird zudem durch die Tatsache erschwert, dass die Aquakulturfonds nicht die pflanzliche Seite der Produktion finanzieren und umgekehrt (Turnšek et al., 2020). Zum Erhalt der vollen Förderung durch den Europäischen Meeres-, Fischerei- und Aquakulturfonds (EMFAF) und das Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) wird daher doppelter Aufwand verlangt und die bürokratischen Hürden zum Bezug der EU Gelder haben in vielen Fällen schon zur Aufgabe geführt. Aus NRW wird beispielsweise berichtet, dass die aquaponischen Gewächshäuser nicht als AFP förderbar anerkannt werden. Die Führung einer Aquaponik erfordert die Kenntnis einer Vielzahl von Gesetzen (Lebensmittelrecht, Tierschutzrecht, Baurecht, Wirtschaftsrecht, etc.) und die Bewältigung der gesetzlichen und regulatorischen Hindernisse erfordert doppelten Aufwand, da der Betrieb sowohl die Vorschriften für die Aquakultur als auch für den Gartenbau einhalten muss (Reinhardt et al., 2019). Dies wird im städtischen Umfeld weiter verkompliziert (Tokunaga et al., 2015.). Eine weitere Hürde besteht darin, dass viele städtische Flächen nicht für landwirtschaftliche Lebensmittelproduktion vorgesehen sind, Aquaponik demnach nicht erlaubt ist und erhebliche Überzeugungsarbeit bei den zuständigen Ämtern und Behörden geleistet werden muss (Goddek et al., 2019b). Weiteres betriebswirtschaftliches Grundwissen zu Themen wie Buchhaltung, Steuern, Personal, Einkauf oder Produktionsplanung wird benötigt um die Betriebe möglichst effizient zu führen. Aufgrund der Sensibilität der meisten Zuchtorganismen gegenüber physikochemischer Wasserparameter wie Sauerstoff, pH-Wert, Ammoniak, etc. muss das Personal außerdem in ständiger Alarmbereitschaft stehen, was einen hohen Arbeitsaufwand erfordert (Engle, 2015).

Die wirtschaftlichen Interessen der Produktions- und Umsatzmaximierung durch hohe Besatzdichten und Wachstumsraten müssen zudem mit den biochemischen Möglichkeiten der Anlage im Einklang stehen und können zwischen den Abteilungsleitern zu Zielkonflikten führen. Wird ohne Kenntnis der maximalen Anlagenkapazität versucht die Produktion zu maximieren, kann ein System durch Überforderung der Filtersysteme überlastet werden und bei sensiblen Organismen zu Krankheiten

und Tot führen. Die Kenntnis und Wechselwirkung zweier biologisch unterschiedlicher Kultivierungstechniken mit den Gewinnmaximierungszielen in Einklang zu bringen, kann als besondere Herausforderung der Aquaponik gewertet werden. Je breiter das Wissen der Betriebs- und Produktionsführung ist und je mehr ihr Wissen ineinandergreift, desto näher kann eine Aquaponik am möglichen Optimum wirtschaften. Besonders bei neuen Anlagen sollten in der Fischzucht die maximalen Besatzdichten und Futterraten unter professioneller Aufsicht und kontinuierlicher Kontrolle der relevanten Anlagenparameter langsam ausgetestet werden.

Der wirtschaftliche Erfolg von Aquaponik hängt ebenso von dem Standort und den erzielbaren Preisen ab, die je nach lokalen und regionalen Gegebenheiten stark variieren können (Quagraine et al., 2018). Die Zielgruppe, also Verbraucher die bereit sind, Preisauflagen für aquaponische Produkte zu zahlen, haben in Großstädten wie beispielsweise Berlin, Hamburg, München und dem Ballungsraum in NRW eine deutlich höhere Dichte und sind leichter identifizierbar als im strukturschwachen Mecklenburg-Vorpommern. Die Nähe zu kostengünstigen Energiequellen wie beispielsweise Abwärme, stellt einen produktionskostentechnischen Vorteil dar (Baganz et al., 2020), welcher in stadtnahen Gewerbegebieten realisiert werden kann.

Zudem konnte die Erhebung feststellen, dass Bruttoumsatz und Rentabilität von den Anlagen höher waren, die ihre Einnahmequellen mit dem Verkauf von Non-Food-Produkten, Dienstleistungen oder Schulungen diversifizierten (Love et al., 2015a). Eine Aquaponikanlage kann neben der reinen Produktion den Kunden mit einer Vielzahl an zusätzlichen Angeboten und Serviceleistungen eine Customer Experience (=Einkaufserlebnis) bieten. Durch Führungen in einem begehbaren Zuchtgelände können die Kunden Fische und Pflanzen wachsen sehen, das aquaponische Prinzip vermittelt bekommen und haben ein gutes Gefühl beim Kauf der nachhaltigen Produkte. Da Aquaponik einen hohen pädagogischen Wert hat, kann das eigene Know-how auch durch Schulungen ausgewertet werden. Selbst ein Miniatur-System im Klassenzimmer bietet eine breite Palette von Möglichkeiten für den Unterricht auf verschiedenen Bildungsebenen, von der Grundschule bis zur Universität (Graber et al., 2014). Aquaponik kann in den MINT-Fächern (Mathematik, Ingenieurwesen, Technik und Naturwissenschaften) grundlegende biologische und ökologische Prinzipien erklären und den Schülern die Chemie, Physik und Mathematik näherbringen (Junge et al., 2017; Junge et al., 2019). In Norddeutschland baut beispielsweise ein Miniatur-Aquaponik Konstrukteur Vorführsysteme in Schulen auf. Die Vorteile der externen Schulungen und Führungen sind, dass diese einen vorteilhaften Marketingeffekt für das eigene Unternehmen, die Produkte und die Bekanntheit der Aquaponik allgemein haben. Ein gelungenes Beispiel für eine Diversifizierung in der deutschen Aquaponik ist die „Stadtfarm“ in Berlin, welche solidarische Landwirtschaft mitten in einem begehbaren Landschaftspark betreibt (Stadtfarm, 2022) und den Interessierten eine umfassende Customer Experience bietet. Dort wird neben Umweltbildung, Führungen und Markttagen auch die selbsternannte „Aquaterraponik®“ (Aquaponische s.l. Landwirtschaft, Palm et al., 2019) mit einer jährlichen Produktion von 50 t Afrikanischen Raubwels und 30 t Obst, Gemüse und Kräutern betrieben. Im eigenen Hofladen wird der Clarias in diversen Veredelungsvarianten wie Fischbällchen, -spieße, -bratwürste, gebeizter Fisch, und Räucherware zu Premiumpreisen ab 20 EUR/kg vertrieben. Die Gartenbauerzeugnisse werden ebenfalls zu verschiedenen Produkten veredelt und es können Monats- oder Jahresabonnements für diverse Paketboxen, als auch solidarische Mitgliedschaften abgeschlossen werden. Besonders im urbanen Raum findet diese Form der multifunktionalen Landwirtschaft, die kommerzielle mit ökologischen und sozialen Zielen verbindet, eine deutlich höhere Akzeptanz als rein produktionsorientierte oder technologieintensive Projekte (Specht et al., 2016). Der größte Teil der Wertschöpfung findet bei allen Agrarprodukten in der Verarbeitung statt und sollte daher wie bei der Stadtfarm im eigenen Unternehmen stattfinden. Beispielsweise kann der Verkaufspreis von Pesto zehnfach höher sein als von den

Einzelzutaten Basilikum, Olivenöl und Pinienkerne und zusätzlich werden Lagerfähigkeit und Haltbarkeit um ein Vielfaches erhöht (Goddek et al., 2019b). Besonders bei großskaligen, kommerziellen Systemen können durch Verarbeitung auch Fluktuationen zwischen Angebot und Nachfrage ausgeglichen werden. Zusätzlich können Produkte, die nicht den Standards für Frischware entsprechen, verarbeitet werden, was die Verluste nach der Ernte signifikant verringern kann und zusätzlich zur Verbesserung der Rentabilität beiträgt (Goddek et al., 2019b). Auch für den Afrikanischen Raubwels konnten Mergenthaler und Lorleberg (2016) nachweisen, dass Verarbeitung und hohe sensorische Produktqualität zu erhöhter Zahlungsbereitschaft führen. Zudem haben die Autoren festgestellt, dass die Fischkonsumenten in zwei Segmente unterteilt werden konnten: Kunden mit einer stärkeren Präferenz für verarbeitete Produkte (Räucherware) und Kunden, die frischen Fisch präferierten. Auf den unterschiedlich verarbeiteten aquaponischen Produkten können unterschiedliche Marketingstrategien aufgebaut werden (Mergenthaler und Lorleberg, 2016).

Ein Zielkonflikt bei Anlagen, die ihren Kunden durch Führungen und Einsicht in Fisch- und Pflanzenproduktion die Customer Experience erhöhen wollen, besteht darin, dass mit jedem Besucher die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass Viren, Bakterien oder Parasiten von außen in die Systeme eingetragen werden. Selbst bei der Einhaltung strengster Hygieneregeln steigt mit jedem Besucher die Gefahr einer Übertragung. Für großskalige Anlagen wird daher empfohlen, Externe nicht die Produktionshallen betreten zu lassen. Um dennoch den Kunden eine Customer Experience zu bieten, wäre eine Alternative, Teile der Produktion oder eine separate Show-Anlage hygienisch abgetrennt begehbar zu machen oder Fischproduktion und Gewächshaus von außen einsichtbar zu machen. Das Musterbeispiel in MV für eine erfolgreiche, umfangreiche Customer Experience ist Karls Erdbeerhof, der Erlebnispark, Manufakturen, Markt, Restaurants, Events und Hotels auf einer großen Fläche miteinander verbindet (Karls, 2022). Von diesem Konzept könnte eine Aquaponik viele Ideen übernehmen. Beispielfähig könnte wie bei Karls Erdbeerhof im Eingang bei den Verkaufsständen ein großer Bildschirm stehen, der den ankommenden Kunden die Zucht, Produkte und Erklärvideos vorführt.

Aquaponiksysteme haben besonders in der Fischzucht Probleme, rentabel zu produzieren (Bailey et al. 1997; Holliman et al., 2008; Baker, 2010; English, 2015; Tokunaga et al. 2015; Benjamin, et al., 2020). Besteht bei Aquaponikanlagenbetreibern eine Gewinnerzielungsabsicht auch in der Fischzucht, sollte daher von vorneherein ein größeres Produktionsvolumen im Aquakulturbereich geplant sein. Mit dem Hintergrundwissen der schwer profitabel zu gestaltenden Aquakultur, besteht die Intention der Betreiber jedoch häufig darin, ausschließlich mit der Pflanzenzucht Gewinne zu erwirtschaften. Aus den USA ist bekannt, dass Produzenten, die ausschließlich Pflanzen verkauften, optimistischer bezüglich Gewinnerzielung waren, als diejenigen, die Fisch und Pflanze vermarkteten (Love et al, 2015a). Die Aquakultur dient in diesen Fällen dazu, den Betrieb als Aquaponik Anlage bezeichnen zu dürfen und dadurch Preisaufschläge ihrer pflanzlichen Produkte rechtfertigen zu können. Gemäß der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1, dass geringere Besatzdichten zu besserem Fischwachstum, aber in Clarias-RAS aufgrund der hohen Fixkosten zu gesteigerten Kosten/kg Fisch führen, sollte von vorne herein eine andere Art gewählt werden oder trotzdem hohe Besatzdichten gefahren werden, um die Verlust/Fisch nicht weiter zu erhöhen. Selbst wenn nur Gewinnerzielungsabsicht in der Pflanzenzucht besteht, gilt immer bei der Auswahl der Besatzdichten, dass der Futtereintrag ausreichend Nährstoffströme für ein gesundes Pflanzenwachstum zur Verfügung stellt. Aus der Praxis ist bekannt, dass einige Betriebe lediglich ein „Show-Becken“ mit Fischen bestückt haben, durch welches sie Ihren Betrieb als Aquaponik bezeichnen, jedoch der Großteil der benötigten Pflanzennährstoffe aus Zudüngung kommt. Streng genommen stellt ein solcher Betrieb eine Hydroponik-Anlage dar, in der das aquaponische Prinzip aufgezeigt, aber nicht umgesetzt wird. Um den Begriff der Aquaponik vor dieser Art von „Verwässerung“ zu schützen, wurde daher eine Mindestmenge

der zum Pflanzenwachstum erforderlichen Nährstoffe von 50% festgelegt, die aus den Nährstoffströmen der Aquakultur kommen muss (Palm et al., 2018a).

Die Kostenersparnisse für das Gesamtunternehmen bei einer integrierten Zucht sind schwer bestimmbar und hängen von vielen Faktoren wie Standort, Zuchtorganismen, Skalierung, etc. ab. Vermeulen & Kamstra (2013) berichten, dass die Umweltvorteile der Nährstoffwiederverwendung und der Energieeffizienz nur eine marginale Kostenreduzierung bewirken, wenn Aquaponik mit separat betriebener RAS und Hydroponik verglichen wird. Für die integrierte Zucht von Salat und Barramundi wurde eine Verbesserung des Kapitalwerts von 4,6% berechnet. In jedem Fall können Management- und Verwaltungskosten um ca. 20 % durch die Überschneidung von Aufgaben eingespart werden (Pasch & Palm, 2021). Im besten Fall kann ein Aquakultur- und Hydroponikexperte eingestellt werden, wodurch ein Expertengehalt eingespart werden kann. Weitere Kosten können durch den reduzierten Bedarf an Düngemitteln eingespart werden. Die Kosten der Düngemittel sind in Deutschland ein zunehmend wichtigeres Thema. Die Kosten für Stickstoffdünger (z.B. Kalkammonsalpeter) haben sich innerhalb eines Jahres von 2020 (17 EUR/100 kg) bis 2021 (55 EUR/100 kg) mehr als verdreifacht. (Tagesschau, 2021a). Auch der Preis für Phosphatdünger hat sich in diesem Zeitraum verdoppelt. Neben den Düngerkosten führt auch die zunehmende Knappheit der Düngemittel in Deutschland zu Problemen. Als Ursache hierfür wird der außergewöhnliche Preisanstieg von Erdgas (verfünffacht) im Jahr 2021 angegeben, der zur Düngemittelproduktion benötigt wird (Tagesschau, 2021a). Da 55% des in Deutschland verwendeten Gases aus Russland kommt (Statista, 2022d), muss durch die aktuellsten politischen Entwicklungen mit dem Angriff Russlands auf die Ukraine (24.02.2022) und die damit einhergehenden Konsequenzen, mit einem enormen Anstieg der Gas- und Düngemittelpreise in 2022 gerechnet werden. Die Ackerbausaison 2022 ist durch die mangelnde Düngemittelverfügbarkeit mit vielen Unsicherheiten der Landwirte behaftet (Tagesschau, 2021a). Dieser starke Preisanstieg und die zunehmende Knappheit der Düngemittel steigert jedoch Relevanz und Wirtschaftlichkeit der Aquaponik. Die Aquaponik bietet durch die ressourcensparende Lebensmittelproduktion direkte Antworten auf diesen Negativtrend und wird bei anhaltender Entwicklung zunehmend an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnen. Bei einer aquaponischen Integration entstehen jedoch auch zusätzliche Kosten, die bei dem einzelnen Betrieb der zwei Systeme nicht entstanden wären. Dazu zählen primär die Anschaffungskosten für Übergangstanks und Verrohrungen von der Aquaponik zur Hydroponik (Pasch & Palm, 2021). Je nach Automatisierungsgrad und Technik sollten hier Aufschläge von ca. 5% der Investitionskosten der Aquakultur eingeplant werden.

6.2.3. Aquaponische Vermarktung

Eine weitere Herausforderung der Aquaponik besteht darin, das komplexe aquaponische Produktionssystem transparent und verständlich zu erläutern (Schröter et al., 2017) und die gesamte Produktion mit Preisauflagen vermarkten zu können. Bei einer Umfrage, welches 2021 die wichtigsten Kaufkriterien in Deutschland für Lebensmittel sind, liegen Geschmack (69%), Frische (66%) und Qualität (45%) auf den ersten Rängen. Die Regionalität (45%) kommt an vierter Stelle, der Preis an Platz sechs (41%) und Tierwohl (34%) und Bio (25%) liegen auf den mittleren- bis hinteren Rängen (Statista, 2022e). Diese Umfrage spiegelt aber nicht das tatsächliche Kaufverhalten der Deutschen wieder, sondern zeigt eher auf, worauf die Deutschen gerne Wert legen würden. In der Realität geben Deutsche im Schnitt nur 10,8% ihrer Konsumausgaben für Lebensmittel aus und liegen damit weit hinten im europäischen Ranking und hinter Ländern wie Italien (14,1%) oder Frankreich (13,1%) (Statista, 2020). Dies liegt zum einen an dem hohen Lohnniveau, wird aber auch durch die billigen Lebensmittelpreise und die Tiefpreisstrategien der Discounter wie Aldi, Lidl und Co. verstärkt, welche mit Tiefstpreisen gezielt das tief verwurzelte deutsche Sparverhalten ansprechen. Tatsächlich sind die Deutschen seit Jahren prozentual und gesamt die

sparsamsten Europäer (Tagesschau, 2021b) und die großen Discounter wie Aldi, Lidl, Netto, Penny & Co. zählen mit ihren Billigpreisen zu den umsatzstärksten Lebensmitteleinzelhändlern Deutschlands (Statista, 2021d). Die Dumpingpreise der Discounter setzen zudem die deutschen Lebensmittelhersteller unter Druck, da sie immer billiger produzieren müssen und dabei häufig Qualität, Nachhaltigkeit und Tierwohl in Mitleidenschaft gezogen werden. In der Umfrage für die Kaufkriterien der Europäer für Lebensmittel liegt der Kaufpreis mit 40% an dritter Stelle hinter Geschmack (45%) und Lebensmittelsicherheit (42%), aber vor der Lebensmittelherkunft (34%) und weit vor persönlicher Ethik und Überzeugung (hinsichtlich Umweltfragen, Tierschutz, etc.; 16%) oder Einfluss auf Umwelt und Klima (15%) (Statista, 2022f). Daraus wird ersichtlich, dass der durchschnittliche europäische Verbraucher nicht dazu bereit ist, für regional und nachhaltig erzeugte Aquaponikprodukte hohe Preisaufläge zu zahlen, sondern die günstigen Varianten bevorzugt. Da jedoch ein Teil der Bevölkerung bereit ist, höhere Preise zu zahlen, besteht die Kunst der effizienten Vermarktung darin, diese Zielgruppe im Verkaufsumfeld zu identifizieren und diese ohne große Streuverluste mit den richtigen Werbe- und Kommunikationsmaßnahmen anzusprechen. Eine Studie zur Europäischen Verbraucherakzeptanz gegenüber Aquaponik hat gezeigt, dass diese grundsätzlich positiv ist, aber die Zahlungsbereitschaft hauptsächlich mit Produkten zusammenhängt, die frei von Antibiotika, Pestiziden und Herbiziden sind und von bekannten lokalen Erzeugern stammen (Miličić et al., 2017). Aktuell ist das Bewusstsein und Wissen der Konsumenten zu aquaponischen Produkten noch als gering einzustufen und nur ein sehr kleiner Teil der Bevölkerung geht bewusst aquaponische Produkte einkaufen.

Damit die Kunden dazu bereit sind, höhere Preise zu bezahlen, muss ihnen die Nachhaltigkeit des Konzepts vermittelt werden und die Vorteile gegenüber den günstigeren Produkten erkenntlich sein, was eine besondere Schwierigkeit des aquaponischen Marketings ist (Morgenstern et al., 2017). Eine Herausforderung der Aquaponik besteht daher darin, ein Produktbewusstsein für aquaponische Erzeugnisse zu schaffen, was zum aktiven Kauf-, und der Bereitschaft Preisaufläge zu zahlen führt. Für Bio Produkte gehen Kunden beispielweise gezielt in Bio-Supermärkte oder in die Bio-Abteilungen der Handelsketten und treffen aktive Kaufentscheidungen. Eine Studie aus den USA hat festgestellt, dass Aquaponikbetriebe, die ihren Pflanzenanbau ökologisch betreiben und die Produkte mit einem Preisauflschlag von mindestens 20% vertreiben, rentabel sind (Quagraine et al., 2018). Im Gegensatz zur Aquaponik in den USA und Australien, die ihre Produkte mit „organic“ (Bio) Labels versehen dürfen, wird die Aquaponik in Europa nicht mit einem offiziellen Label anerkannt (Hoevenaars, 2018; Goddek et al., 2019b). Dies erschwert die Vermarktung mit Preisauflschlägen, und wird weiter verkompliziert, da mehr als die Hälfte der Befragten einer Europäischen Studie angegeben haben, noch nie etwas von Aquaponik gehört zu haben (Miličić et al., 2017). Obwohl der Großteil der Teilnehmer dieser Studie das Grundprinzip der Aquaponik schätzte, hatten Einige auch Bedenken hinsichtlich des Tierwohls oder Ekel bei der Vorstellung, dass Fischfäkalien als Pflanzennährstoff verwendet werden. In einer Umfrage in Berlin fand eine nicht öffentliche Landnutzung, wie z.B. durch Aquaponik, nur eine Akzeptanz von 40% (Specht et al., 2016). Für aquaponische Erzeugnisse müsste demnach erhöhter Kommunikationsaufwand betrieben werden um positiv assoziiert ins Bewusstsein einer breiten Bevölkerungsschicht zu gelangen, so dass diese aktiv die Produkte einkaufen gehen.

Um als einzelnes Unternehmen möglichst effiziente Marketingmaßnahmen in einem regional begrenzten Umfeld zu ergreifen, stehen je nach Skalierung/Produktionsmenge verschiedene Vermarktungsstrategien zur Verfügung, um ins Bewusstsein der potentiellen Zielgruppe zu gelangen:

(1) Bei einer großskaligen kommerziellen Produktion sollten mit einem betriebsnahen Lebensmitteleinzelhandel (LEH) vertragliche Vereinbarungen über größere Abnahmemengen getroffen werden. Mit diesem könnten gemeinsame Marketingstrategien entworfen werden und in den

entsprechenden Filialen dieses LEH umgesetzt werden, wodurch die Zielgruppe auf eine bestimmte Region begrenzt werden kann und Marketingmaßnahmen weniger Streuverluste erleiden. Dazu könnten beispielsweise aquaponische Informationstafeln, Gratisverkostungen, Kochunterricht, Sonderaktionen oder auch Einladungen zu Betriebsführungen dienen, um eine kleine Anzahl einer großen Palette möglicher Marketingwerkzeuge zu nennen. Dies führt im Stammklientel des entsprechenden LEH zu einem Marken- bzw. Produktbewusstsein und dadurch zum bewussten, aktiven Kauf der aquaponischen Produkte. Als Musterbeispiel in Deutschland beliefert die ECF Farm in Berlin mit einem einzigen Einzelhändler über 250 Supermärkten in Berlin. Dort wird das „Hauptstadtbasilikum“ ohne Bio-Siegel direkt neben Bio-Basilikum nicht regionaler Herkunft angeboten und kann trotz höherer Preise höhere Verkaufszahlen und Umsätze für den LEH generieren (Turnšek et al., 2019). Auch der LEH wird neben den Einnahmen den Imagegewinn als Zusatznutzen haben, da Kunden den LEH mit der Förderung nachhaltiger regionaler Betriebe und Lebensmittel in Verbindung bringen. Bei vernünftiger Argumentation und Darlegung dieser Win-win-Situation sollte die Verkaufsleitung eines Aquaponikbetriebes dazu in der Lage sein, lukrative Partnerschaften mit ausgewählten LEH einzugehen und ins Bewusstsein des Stammklientels der ausgewählten Standorte zu gelangen. Christian Echternacht, einer der Gründer und Geschäftsführer der ECF Farm in Berlin, berichtete in einem Interview über die Schwierigkeit, einen lokalen Direktvermarktungskanal für eine breite Palette von Produkten mit begrenzter Menge zu etablieren und begründete damit die Umstellung auf die Spezialisierung auf eine Kulturpflanze mit dem beinahe vollständigen Vertrieb an einen Partner im LEH (Turnšek et al., 2019). Ein zusätzlicher Ab-Farm-Verkauf im Hofladen zur Direktvermarktung sollte zur Umsatzsteigerung durch Endverbraucherpreise und zur Umsetzung von Kundenkommunikationsmaßnahmen und Customer Experience zusätzlich integriert sein.

(2) Bei kleinskaliger und semikommerzieller Aquaponik sollte die Strategie gefahren werden, dass der Vertrieb fast ausschließlich an den Endverbraucher erfolgt. Neue Aquaponikanlagen erlangen in der Regel hohes regionales Medieninteresse und sollten dieses für die Erschaffung eines Produktbewusstseins und die hofeigene Vermarktung nutzen. Zu der Zielgruppe, die bereits aktiv Aquaponikprodukte einkauft und bereit ist Preisauflschläge zu zahlen, zählen informierte, nachhaltigkeits- und ernährungsbewusste 20-40-Jährige (Figl, 2017). Die potentielle Zielgruppe, bei denen noch kein Aquaponikbewusstsein existiert und die aktiv beworben und informiert werden muss, sind aufgrund der teureren Preise Personen aus der höheren Mittelschicht (Figl, 2017). Um diese zu erreichen sollten Informationsbroschüren in den entsprechenden Nachbarschaften verteilt werden und Werbung in Radio, Zeitung und Zeitschriften platziert werden, in denen eine hohe Zielgruppendichte besteht. Für kleinere Betriebe ist besonders wichtig, gute Kontakte zu regionalen Gastronomiebetrieben und Hotels aufzubauen und sich zu diversifizieren (s.o.).

Der wirtschaftliche Hauptnutzen der aquaponischen Integration liegt in dem höheren Vermarktungspotential von Fischen und Pflanzen. Durch die geeigneten Marketingmaßnahmen muss dieses Potential so genutzt werden, dass der Kunde bereit ist, höhere Verkaufspreise zu zahlen. Je kleiner die Produktion, desto höher kann und muss dieser Aufschlag generell ausfallen um die Kostennachteile auszugleichen. Für große Systeme sollten mindestens 20% eingeplant werden, bei kleineren Systemen ist ein Aufschlag von 50-100% oder mehr nötig und durch einen höheren Verkaufsanteil an Endverbraucher realisierbar. Grundsätzlich müssen die Preise aber auch an die Gegebenheiten des Marktes und der Zielgruppe angepasst werden. Das Vorkommen zahlungswilliger Kunden ist in MV aufgrund der wirtschaftlich-demografischen Rahmenbedingungen deutlich geringer als in anderen Regionen Deutschlands. In strukturstärkeren Gegenden wie Berlin, Hamburg, München oder dem Ballungsraum NRW weist die Durchsetzung einer Premiumpreisstrategie höhere Erfolgswahrscheinlichkeiten auf. Gute

Beispiele für erfolgreiche aquaponische Premiumpreisstrategien fahren die zwei Berliner Aquaponikanlagen, „ECF Farm“ und „Stadtfarm“, welche mitten in Berlin hochpreisig Fisch und Pflanzen vertreiben.

Unabhängig von der Größe muss jedes Unternehmen das aquaponische Prinzip anschaulich und verständlich an die Kunden vermitteln können. Damit die Informationen möglichst imagefördernd an die Zielgruppe herangetragen werden, sollte die Natürlichkeit der aquaponischen Produktion im Informationszentrum stehen und bei Verwendung visueller Informationen sollten die Fische in ihrer Aufzuchtumgebung gezeigt werden, um die Transparenz der Aquaponik zu erhöhen (Schröter & Mergenthaler 2019). Dazu braucht jeder Betrieb eine eigene, moderne Webseite, die interessierten Kunden informative Inhalte mit ansprechenden Bildern bietet und zusätzlich sollten Führungen und Seminare gegeben werden. Das langfristige Marketingstrategieziel der gesamten EU-Aquaponikwirtschaft muss sein, die aquaponischen Lebensmittel im Bewusstsein aller Verbraucher mindestens neben einem Rang wie „Bio“ zu platzieren, für die die Konsumenten aufgrund der Frische, Regionalität und Nachhaltigkeit dazu bereit sind, entsprechende Preisauflagen zu zahlen und diese gezielt einkaufen gehen. Eine Einführung eines offiziellen „Aquaponik-Siegels“ als Qualitätsmerkmal für aquaponisch produzierte, saubere, umweltfreundliche und regionale Lebensmittel, die einheitliche Normen erfüllen, sollte ein weiteres übergeordnetes Ziel der Branche sein.

6.2.4. Skalierung

Grundsätzlich sollten Aquaponische Anlagen groß skaliert sein und eine Pflanzenanbaufläche von mindestens 1 000 m² aufweisen (König et al., 2016), um durch Skaleneffekte die Investitionskosten je m² und die Produktionskosten zu senken und mit den Preisen herkömmlicher Zuchten konkurrieren zu können. Um die Zuchtbedingungen für Fisch und Pflanze optimieren zu können, wird empfohlen die zwei Einheiten zudem entkoppelt in separaten Kreisläufen zu betreiben. Das Fischprozesswasser wird vor der Überführung in die Hydroponikeinheit mit Pflanzennährstoffen angereichert, die genau auf die Bedürfnisse des jeweiligen Zuchtorganismus angepasst sind. Für Gewächshäuser mit 1 000 m² müssen je nach Gewächshausstyp, Automatisierungsgrad, Beleuchtungstechnik, etc. Investitionskosten von ca. 318-762 Tsd. EUR eingeplant werden. Die günstigere Option für 318 Tsd. EUR wäre ein Breitschiffgewächshaus (Einfachglas), ohne Belichtung und Kulturfläche, Düsenrohrbewässerung, Tagschirm, Grundregelung für 2 Abteilungen (KTBL 2021a¹⁰). Die Premium-Variante für 762 Tsd. EUR wäre ein Venlogewächshaus (Spezialglas), mit LED Assimilationsbelichtung, Mobiltischen, Anstausystem für Tische, etc. (KTBL 2021a²). Die Investitionskosten eines zehnfach größeren Gewächshauses von 10 000 m² betragen bei gleicher Gewächshausstechnik durch Skaleneffekte durchschnittlich nur das Viereinhalb- bis Sechsfache eines 1 000 m² Gewächshauses (KTBL 2021a²), was bei gleichem Ertrag/m², die Produktionskosten senken, den Gewinn/Einheit und das Return on Investment (ROI) erhöhen und die Amortisationsdauer verkürzen würde. Diese Ausgaben können durch eine stabile Produktion bei vertraglich vereinbarten Abnahmemengen mit kleineren Aquaponik-Verkaufspreisauflagen amortisiert werden. Es wird ersichtlich, dass ökonomisch nachhaltige aquaponische Investition v.a. im Bereich der Pflanzenzucht von vorneherein groß bis sehr groß skaliert werden sollten, da diese der wirtschaftliche Treiber von Aquaponikunternehmungen sind. Bei groß skalierten Anlagen muss ein Trade-off bei der Standortwahl

¹⁰ Das Preisniveau aus dem Jahr 2013 wurde mit dem Preisindex des Statistischen Bundesamtes für gewerbliche Betriebsgebäude um den Faktor 1,33 erhöht und damit auf das Niveau des zweiten Quartals 2021, wie in Pasch und Palm (2021), angepasst.

getroffen werden, da die attraktive Stadtnähe zu deutlich höheren Mietkosten führt, aber dagegen bei nicht urbanen Gegenden Transport- und Vermarktungskosten steigen.

Kleinskalige und semikommerzielle Anlagen (50 -< 100 m²) können unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls profitabel sein (Goddek et al., 2015; Tokunaga et al., 2015). In Deutschland bleibt (kleinskalierte) kommerzielle Aquaponik bisweilen jedoch den Beweis schuldig, rentabel wirtschaften zu können. In sonnigeren Ländern wie Hawaii (Tokunaga et al., 2015) ist dies durch reduzierte Energiekosten aber auch die Möglichkeit, Freiland Aquaponik ohne teure Gewächshäuser zu betreiben, deutlich leichter umzusetzen, als in nördlichen Ländern mit kalten, sonnenarmen Wintern. Die Nachteile der kleinen Skalierung müssen in Deutschland durch eine Premiumpreisstrategie wettgemacht werden (Kapitel 6.2.3), welche durch ein knapperes Angebot leichter umsetzbar ist, als bei großen Produktionsmengen.

Neben der kommerziellen Anwendung, können heimische Anlagen auch als Hobby- oder Backyardanlagen zur Selbstversorgung einen volkswirtschaftlichen Nutzen stiften. Menschen haben die Möglichkeit, hochwertige tierische Proteine und frisches Gemüse im eigenen Garten oder in der Garage zu züchten und können sich damit gesünder ernähren und den CO₂-Fußabdruck von sich und der eigenen Familie reduzieren. In diesem Wirtschaftszweig schafft die Aquaponik ebenfalls Arbeitsplätze und Wirtschaftsleistung durch Schulungen, Hobbyanlagenbauer und Zubehörhändler. Im deutschsprachigen Internet gibt es unzählige Webseiten, Blogs und Videos zu dem Thema und die namhaften Online-Grow-Shops besitzen in der Regel eine breite Angebotspalette für heimische Aquaponik.

Die Produktionskosten eines Gewächshauses sind ebenfalls abhängig von der Skalierung aber auch von den klimatischen und geografischen Bedingungen wie der saisonalen Verfügbarkeit von Tageslicht, Temperaturextremen, Wärme- und Kälteschwankungen (Goddek et al., 2015). Um die variablen Produktionskosten zu senken, sollten in deutschen und urbanen Gewächshäusern die verhältnismäßig teure LED Belichtung installiert werden, da sich diese bei ganzjährigem Anbau durch deutlich geringere Strom- und Wartungskosten, als auch eine längere Lebensdauer amortisieren (Singh et al., 2015; Kozai, 2016). Im Verhältnis zu Natriumdampf-Hochdrucklampen kann LED den Energieverbrauch für Licht um 40-80% senken, während der Heizbedarf aufgrund der geringeren Wärmezeugung um 9-49% ansteigt (Katzin et al., 2021). Zusammengerechnet belaufen sich die Energieeinsparungen auf 10-25% bei LED Lampen. Die Anschaffungskosten für LED-Belichtung belaufen sich auf 219 Tsd. EUR für ein 1 000 m² Gewächshaus bis hin zu 2,19 Mio. EUR bei einem 10 000 m² Gewächshaus (KTBL 2021a ¹¹).

6.2.5. Aquaponik in MV und Deutschland

Eine kommerzielle aquaponische Produktion ist Anfang 2022 in MV nicht mehr existent. Im Vorjahr 2021 wurde die Fischzucht Abtshagen und die dazu gehörende Aquaponikanlage liquidiert und daneben existierte noch die letzte Aquaponikanlage bei den Müritzfischern in Waren, MV. Diese war ein wissenschaftlich-kommerzielles Gemeinschaftsprojekt, in dem auf 320 m² Netto-Gewächshausfläche 5 bis max. 13 t Tomaten/Jahr und in 26,4 m³ Produktionsvolumen (m³PV) 13 t bis maximal 22 t Clarias/Jahr gezüchtet werden konnte (Baganz et al., 2020). Diese Produktion der Anlage wurde Anfang 2022 aufgrund der Unwirtschaftlichkeit eingestellt. Der Standort Waren, MV zählt im Sommer durch die Müritz und die Mecklenburgische Seenplatte zu einem der beliebtesten Tourismusorte Deutschlands (Statistisches Amt MV, 2021), wodurch die Müritzfischer gerade in der Urlaubssaison hohe Einkünfte in ihren Fischverkaufsständen und im Fischkaufhaus haben. Die Aquaponikanlage befand sich unmittelbar neben

¹¹ Das Preisniveau aus dem Jahr 2013 wurde mit dem Preisindex des Statistischen Bundesamtes für gewerbliche Betriebsgebäude um den Faktor 1,33 erhöht und damit auf das Niveau des zweiten Quartals 2021, wie in Pasch und Palm (2021), angepasst.

dem Fischkaufhaus und Laufkundschaft hatte öffentliche Einsicht auf Tomatenproduktion und Informationstafeln zum aquaponischen Prinzip. Da die Anlage aufgrund der Unwirtschaftlichkeit geschlossen wurde, könnten jetzt anhand des Vergleiches von Verkaufszahlen des Fischkaufhauses vor und nach der Schließung und anhand von Kundenbefragungen wertvolle Daten zum marketingpsychologischen Nutzen von Aquaponikanlagen erhoben werden. Es ist davon auszugehen, dass die Integration der Aquaponik an einen Verkaufsstandort beim Kunden positive Assoziation eines nachhaltigen Unternehmens mit regionalen Produkten erzeugt. Dies kann wiederum direkt im Fischkaufhaus den Umsatz durch Mehrverkäufe steigern, aber auch indirekt in einer nachhaltigen Verbesserung der Kundenwahrnehmung und besseren Unternehmensreputation resultieren, was sich auf das gesamte Unternehmen positiv ausübt und umsatzfördernd wirkt. Eine Aquaponikanlage, die direkt an einem Verkaufsstandort mit hoher Kundenfrequenz und hohen Umsätzen integriert ist, sollte nicht ausschließlich an den Verkaufszahlen der aquaponischen Produkte, sondern auch am Beitrag zur Verkaufsförderung weiterer Produkte und dem marketingpsychologischen Zusatznutzen gemessen werden. Aquaponische Forschung wird im FischGlasHaus (FGH) der Universität Rostock betrieben und ein weiteres Gemeinschaftsprojekt mit integrierter Aquakultur ist auf Rügen mit dem liquidierten Gewächshaus der Fischzucht Abtshagen in Planung.

Die fünfte These besagt **„Die Voraussetzung für eine kommerzielle Aquaponik mit Afrikanischen Raubwels ist eine ökonomisch nachhaltige Clarias-RAS“**. Um die kommerzielle Aquaponik in MV voranzubringen, müssen entweder die bestehenden RAS Betreiber sich dazu entscheiden, ihre Anlagen mit Gewächshäusern zu erweitern, oder neue RAS-Anlagen würden direkt als integriertes System errichtet. Jedoch sollte der Hauptfokus der Clarias-RAS in MV aktuell primär darin liegen, die Fischzucht als eigenständigen Betrieb nachhaltig profitabel zu gestalten, bevor über eine aquaponische Erweiterung nachgedacht werden kann. Eine aquaponische Integration sollte nur in profitabel produzierenden RAS-Anlagen erfolgen, oder wenn durch eine aquaponische Erweiterung signifikante Preisaufschläge der Fischprodukte durch verbesserte Kundenwahrnehmung und damit eine profitable Fischzucht zu erwarten wären. Aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung der Clarias-RAS (Kapitel 1.5.2, 1.5.3, 6.3.1.) sind aquaponische Investitionen in An- oder Neubauten mit dem Afrikanischen Raubwels aktuell als unwahrscheinlich einzustufen. Die weiteren RAS in MV sind Shrimpzuchten (*Litopenaeus vannamei*) und werden mit Salzwasser betrieben, was hydroponische Anbauten grundsätzlich komplizierter macht. Die Kombination von Meer- bzw. Brackwasser RAS und Hydroponik wird Mariponik bzw. Halaponik genannt und ist eine neue aquaponische Technik (Gunning et al., 2016; Kotzen et al., 2019). Eine größere Investition in Anlagen mit nennenswerten Produktionsmengen kann für dieses relativ unbekanntes Konzept zumindest kurzfristig als unwahrscheinlich eingestuft werden. Das mariponische Konzept mit Shrimps wird aktuell in Frankreich von dem Aquaponik Start-Up „Agriloops“ entwickelt und erforscht, welches 2019 finanzielle Mittel von 1,4 Mio. EUR für ihre Pilotanlage inklusiver Forschungsarbeiten erhalten hat (Agriloops, 2022). Ob und wie genau diese integrierte Zucht funktioniert und wann sie aus der Entwicklung in die kommerzielle Produktion übergeht, bleibt abzuwarten. Diese Kombination kann jedoch bei funktionierender Produktion als äußerst attraktiv bewertet werden, da deutsche Shrimpzüchter Preise von 50-80 EUR/kg in der Direktvermarktung erzielen. Die Entwicklung des französischen Unternehmens sollte von den Anlagenbetreibern in MV genau beobachtet und als Erweiterungsmöglichkeit in Betracht gezogen werden. Für die neue Zanderanlage in Glücksstadt sollte der Hauptfokus darin bestehen, die Zanderproduktion von 500-700 t/Jahr die ersten Jahre stabil aufzubauen, bevor aquaponische Erweiterungen in Frage kommen. Die Aquaponik wird demnach neben der Forschung im FischGlasHaus produktionstechnisch mindestens kurzfristig keine entscheidende Bedeutung für die Landwirtschaft in MV besitzen.

Der Afrikanische Raubwels konnte in diversen Experimenten beweisen, dass er geeigneter Organismus für die Aquaponik ist (Palm et al., 2014a; Knaus & Palm 2017a; Baßmann et al., 2017, 2020; Knaus 2020a, b; Pasch 2021a, b). Er erzielt bei homogenen Gewichtsgruppen ausgezeichnete Wachstumsleistungen, kommt mit großen Schwankungen von physikochemischen Wasserwerten zurecht und kann atmosphärische Luft atmen, wodurch er besonders vorteilhaft für Aquaponikinteressierte ist, die sich nicht gut mit der Fischzucht auskennen und mit anspruchsvolleren Fischen Probleme hätten. Durch hohe Besatzdichten können durch seine Zucht auch disproportional höhere Nährstoffströme im Prozesswasser erzielt werden, jedoch muss in kommerziellen Zuchten das Prozesswasser mit bestimmten Makro- und Mikronährstoffe aufgedüngt und an das Nährstoffprofil der jeweiligen Pflanze angepasst werden (Strauch et al., 2018; Pasch et al., 2021a, b). Nachteilig ist, dass das Prozesswasser warm sein muss (27 °C), wofür den Großteil des Jahres in Deutschland Energie aufgewendet werden muss. Kleinskalierte- oder semi-kommerzielle Anlagen haben seltener Zugang zu kostengünstigen Energiequellen wie Biogasanlagen, wodurch in der Welszucht hohe Energiekosten entstehen würden. Der zweite große Nachteil ist, dass der Clarias auch in 2022 geringe Preise erzielt, mit welchen nur schwer in der Aquakulturabteilung Gewinne erwirtschaftet und hohe Produktionskosten rechtfertigt werden könnten. In Deutschland sollte der Clarias aufgrund aktueller Preise nur in Aquaponikanlagen genutzt werden, die die Produktionsinputfaktoren (Futter, Energie, Setzlinge, Arbeit, Wasser) günstig beziehen können. Eine weitere Alternative wäre, die Clarias-Becken in heimischer- oder kleinskaliger Aquaponik (heimisch oder kleinskalig nach Palm et al., 2018a) zwischen Mai-Oktober in ein Gewächshaus mit einjährigen Pflanzen zu integrieren, wodurch eine periodische Mast und Ernte mit reduzierten Heizkosten möglich wäre und im Winter die Anlage stillsteht. Ansonsten sind eher Fischarten empfehlenswert, die aufgrund höherer Abgabepreise rentabler gezüchtet werden können und damit dem gesamtwirtschaftlichen Erfolg der Aquaponikbetriebe dienlicher sind.

Die Aquaponik steht in MV, Deutschland und Europa weiterhin im Interesse der Öffentlichkeit, Wissenschaft und Medien, da sie Lösungsansätze für die aufkommenden Probleme der zunehmenden Ressourcenknappheit bietet. Dieses Interesse flacht jedoch seit 2017 in Deutschland ab (Abb. 6.2) und die Aquaponik bleibt bisweilen den Beweis schuldig, nicht nur in Modellstudien, sondern auch in der Praxis und in beiden Produktionsabteilungen, sowohl Fisch- als auch Pflanzenzucht, profitabel produzieren zu können.

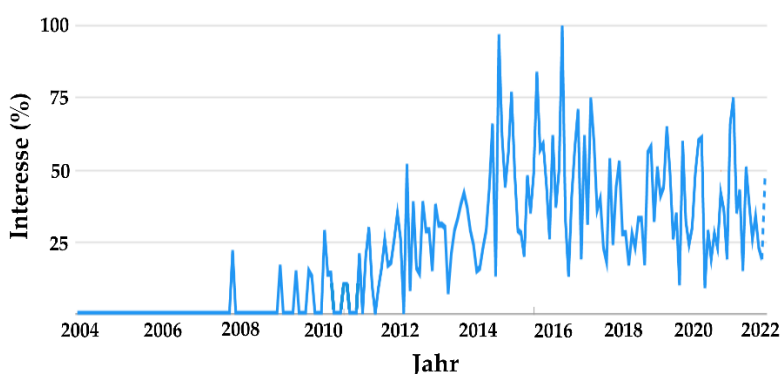


Abbildung 6.2. Google Trends für den Suchbegriff „Aquaponik“ in Deutschland (Google, 2022).

Die Umsetzung eines größeren kommerziellen Systems (1 800 m²) ist in Deutschland bisher nur aus der ECF Farm in Berlin bekannt. Dort wird Buntbarsch (*Oreochromis niloticus*) und Basilikum (*Ocimum basilikum*) unter den Handelsnamen „Hauptstadtbarsch“ für 7 EUR/Fisch und „Hauptstadtbasilikum“ für

2 EUR/Topf über den Hofladen und die Webseite direktvermarktet und der Großteil an den Lebensmitteleinzelhandel (REWE) verkauft (ECF Farm, 2022). Nach den Angaben der Webseite werden dort 7-7,5 Tsd. Töpfe/Woche, bzw. 400 Tsd. Töpfe/Jahr produziert. Die Fischproduktion liegt bei ca. 8 Tonnen/Jahr, wodurch vermutet werden kann, dass der Großteil der Nährstoffe zur Pflanzenzucht aus mineralischen Düngern kommt. Die ECF Farm hat eine weitere Anlage als „Dachfarm“ auf einer REWE Filiale in Wiesbaden in Betrieb genommen und zwei weitere Anlagen im Ausland. ECF hat ihr Angebot auch diversifiziert, indem sie aquaponische Projekte planen, bauen und betreiben (ECF Farmsystems, 2022).

Der neueste Versuch, eine kommerzielle Aquaponik in Deutschland aufzubauen, kommt von der Aixponic GmbH, welche 2022 die Baugenehmigung für eine EU-geförderte Aquaponikanlage in Aachen erhalten hat. Dort wird in Mariponik (Meerwasser-Aquaponik) Dorade und Queller in Containern der SEAWATER Cubes GmbH gezüchtet (Aixponic, 2022; Seawater Cube, 2022). Die beiden Zuchtorganismen sollen hochpreisig am regionalen Markt direktvermarktet werden. Ein europäisches, groß angelegtes Aquaponikprojekt ist beispielsweise „La Ferme Integrale“ aus Frankreich, welche in der Startphase 2021 auf 700 m² Zander, Blattgemüse und Kräuter züchten und ab 2023 die Fläche auf 5 000 m² erweitern wollen (Ferme Integrale, 2022). Daneben bestehen eine Reihe kleinerer Projekte, welche ungenutzte, heruntergekommene Stadtfächen mit Aquaponik aufwerten. Beispielsweise wird ebenfalls in Aachen vom „aachen.eden e.V.“ auf mehreren ungenutzten Flächen urbane Landwirtschaft betrieben und beispielsweise eine alte Unterführung in der Innenstadt in eine kleine Aquaponikfarm umgewandelt (Aachen Eden, 2022). Die aquaponische Nutzung von Gebieten und Flächen, die ansonsten für die Landwirtschaft ungeeignet sind, z. B. auf Dächern und auf ungenutzten, stillgelegten Fabrikgeländen, alten Unterführungen, etc. kann als richtungweisende Option der urbanen Aquaponik gesehen werden (Joyce et al., 2019a; Goddek et al., 2019b).

Die Aquaponik befindet sich aktuell in einer Übergangsphase, was gut durch die Suchanfragen bei Google Trends (Abb. 6.2) und den Hype-Zyklus nach Gartner (Abb. 6.3) veranschaulichen lässt. Der Hype-Zyklus stellt die verschiedenen Phasen dar, die eine neue Technologie bei deren Einführung durchläuft und dient Technologieberatern zur Bewertung der Einführung neuer Technologien (Linden & Fenn, 2003).

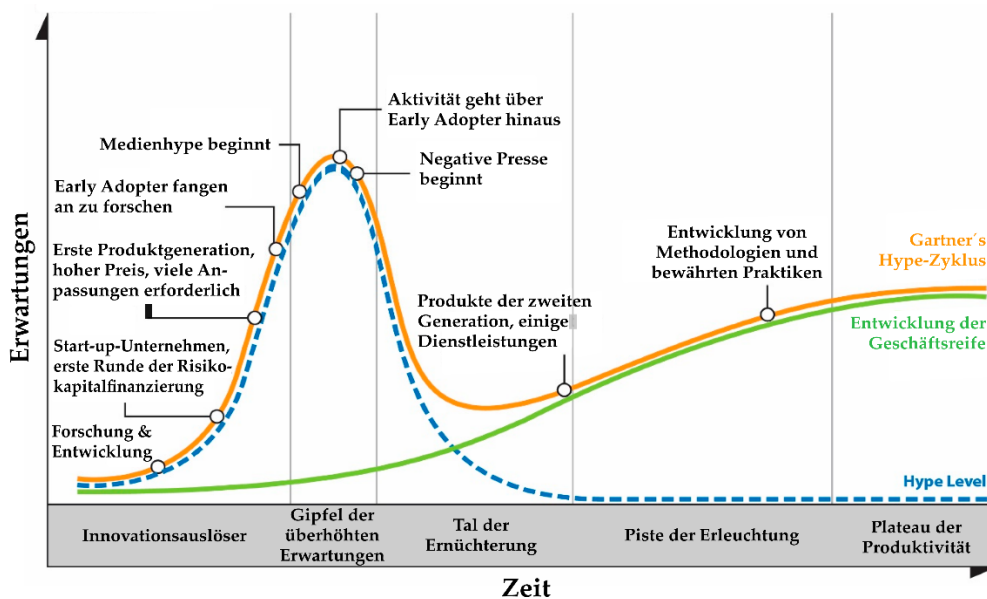


Abbildung 6.3. Die Hype-Zyklus Kurve von Gartner (orange) und die zwei Kurven, die sie kombiniert: Hype Level-Kurve (blau) und Entwicklung der Geschäftsreife S-Kurve (grün) (übersetzt aus Turnšek et al., 2020).

Der Anstieg des Interesses begann in Deutschland ca. ab 2010 (Innovationsauslöser) und der Höhepunkt der Suchanfragen (Gipfel der überhöhten Erwartungen) wurde zwischen den Jahren 2015-2017 erreicht (Abb. 6.2, 6.3). In einer Europäischen und Französischen Erhebung wurde festgestellt, dass die Entwicklung der kommerziellen Aquaponik im Jahr 2020 im „Tal der Ernüchterung“ nach Gartners Hype-Zyklus angelangt ist, was durch die zahlreichen Herausforderungen für die kommerzielle Lebensmittelproduktion verursacht wird (Turnšek et al., 2020). Diese Entwicklung kann anhand der Abnahme der Suchanfragen (Abb. 6.2) auch für Deutschland bestätigt werden. Im englischsprachigen Raum trat das Abflachen des Interesses gemessen an Suchanfragen in Google Trends bereits 2012 auf (Turnšek et al., 2020). Nun entscheide sich, ob die ausgereifteren Technologien und das bessere Verständnis dazu führen, dass die Aquaponik den skizzierten Phasen von Gartners Hype-Zyklus folgen wird und sich zu einer etablierten Technologie entwickelt, oder ob sie aufgrund ausbleibenden wirtschaftlichen Erfolges im „Tal der Ernüchterung“ verschwindet (Turnšek et al., 2020). Aus dieser Theorie lassen sich zwei wichtige Lehren ziehen: (1) Unternehmen sollten nicht in Technologien investieren, nur weil diese gehyped werden und (2) Unternehmen sollten auch keine Technologien ignorieren, nur weil diese derzeit nicht den frühen, überhöhten Erwartungen entsprechen und der Hype abflaut (Linden & Fenn, 2003). In dem Stadium in dem sich die Aquaponik aktuell befindet, haben Pessimisten gute Argumente gegen die Aquaponik durch das Scheitern und die gemachten Fehler der Pioniere in der Entwicklungsphase vorzuweisen, während Optimisten das abflachende Interesse als Teil des Entwicklungsprozesses neuer Technologien sehen und die damit einsetzende Geschäftsreife. Eine Umfrage bei europäischen Aquaponik-Unternehmen konnte feststellen, dass alle hoffnungsvoll in die Zukunft blicken, selbst die, die ihre kommerzielle Aquaponik-Zucht aufgegeben haben (Turnšek et al., 2019). Auch wenn der Hype, bzw. das Interesse an der Aquaponik langsam abflacht, wird die Relevanz der nachhaltigen Lebensmittelproduktion aufgrund der zunehmenden Ressourcenknappheit von Wasser, Düngemitteln, Fisch, etc. zwangsläufig weiter zunehmen (Goddek et al., 2019b). Vor dem zu erwartenden Hintergrund der stark steigenden Ressourcenpreise kann zudem erwartet werden, dass sich die sozioökologischen Vorteile der Aquaponik zunehmend als ökonomische Vorteile erweisen werden.

Die aquaponische Forschung sollte jetzt aus der Entwicklungsphase herauskommen und sich vermehrt auf die wirtschaftliche Umsetzung und Tragfähigkeit von kommerzieller Aquaponik konzentrieren, um den Geschäftsreifeprozess zu beschleunigen und neuen Unternehmen dabei zu helfen, wirtschaftlich überlebensfähig zu werden. Da der finanzielle Erfolg der Aquaponik in der Regel durch die Pflanzenzucht getragen wird, sollten diese von vorneherein mit effizientesten Anbausystemen groß skaliert werden (> 1 000 m²), um den finanziellen Erfolg der Gesamtunternehmung sicherzustellen. Damit auch die Aquakultur als einzelne Unternehmenssparte betrachtet zum Unternehmenserfolg beitragen kann, und nicht nur dem Zweck dient, die Pflanzenprodukte als aquaponische Erzeugnisse vermarkten zu können, müssen die Probleme der Fischzucht analysiert werden. Um die aquaponische Technologie landwirtschaftlich in MV nutzen zu können und dadurch Arbeitsplätze und Wirtschaftsleistung zu schaffen, muss in neue, kommerzielle Anlagen investiert werden. Private Investoren werden zukünftig Beweise ökonomischer Nachhaltigkeit sehen wollen. Dass die zwei einzigen Aquaponikbetriebe in MV 2021 wegen Betriebsauflösung und 2022 wegen Unwirtschaftlichkeit die Produktion eingestellt haben, stellt keine guten Argumente dar. Dies sollte jedoch nicht als Grund gesehen werden, diese nachhaltige Technologie nicht weiter zu fördern, sondern es bedarf jetzt weiterer Forschung, um die Aquaponik effizienter und vor allem rentabler zu gestalten. Außerdem braucht die aquaponische Wirtschaft optimistische Unternehmer und Investoren, die an die Technologie glauben und mit besserer Technik aus der Forschung, besseren Strategien und neuen Zuchtorganismen die Aquaponikwirtschaft vorantreiben. Wenn weiterhin mit Afrikanischem Raubwels Aquaponik betrieben werden soll, müssen zuallererst die

Probleme der Clarias-RAS gelöst werden und diese muss als selbstständige Betriebssparte rentabel produzieren können. Nach wie vor kommt der Großteil der Aquakulturproduktion in MV aus der für die aquaponische Integration geeigneten, Afrikanischen Raubwels RAS. Der folgende Abschnitt beleuchtet die aktuellen Probleme der Branche, diskutiert das Potential des Fisches und seine Bedeutung für die Landwirtschaft in MV.

6.3. Clarias-Wirtschaft in MV

Aufgrund des weltweiten Anstiegs des Fischkonsums bei gleichbleibenden Fangmengen muss die Aquakultur weiter wachsen, um die Nachfrage zu befriedigen. Die großen Asiatischen Produzenten und Exporteure von Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen werden aufgrund wachsender eigener zahlungskräftiger Kundschaft in naher Zukunft den intraregionalen Handel ausbauen, wodurch die vom Import abhängigen Länder in Europa aufgrund des geringen Selbstversorgungsgrades Versorgungsprobleme bekommen werden (WiWo, 2018; Ibaaf, 2020, zitiert in EUMOFA, 2020). Die EU hat dieses Problem bereits identifiziert und fördert daher weiterhin den Ausbau der europäischen Fischproduktion mit dem Europäischen Meeres-, Fischerei und Aquakulturfonds (European Commission 2021a). Der Selbstversorgungsgrad in Deutschland ist bei Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen besonders gering, was die Abhängigkeit von Importen vergrößert. Um diesem Problem entgegenzutreten, sollte die inländische Produktion möglichst nachhaltig aufgebaut werden. Dazu sind weitere Investments in ressourcenschonende RAS und den Ausbau und die Modernisierung bestehender Anlagen nötig. Einige RAS- bzw. Aquaponikanlagen haben jedoch mittlerweile aufgrund ihrer unprofitablen Produktion den Betrieb eingestellt oder stark heruntergefahren. Um die deutsche Clarias-Wirtschaft kurz- bis mittelfristig zu stabilisieren bzw. zu retten, darf diese ihre wirtschaftliche Rentabilität nicht wie in den Anfangsjahren vor mehr als zehn Jahren auf subventionierende Maßnahmen, Zuschüsse und Förderungen bauen. Auch wenn die großen Clarias-Zuchten das Geschäftsmodell mit dem Prinzip der Strom- und Wärmenutzung aus Biogasanlagen aufgebaut haben, sollte das Ziel der Aquakultur sein, die Fischzucht als selbstständige Unternehmensabteilung unabhängig von anderen Einkünften profitabel zu gestalten. Im folgenden Kapitel werden Strategien und Verbesserungsmöglichkeiten der Clarias-RAS in MV aufgezeigt.

6.3.1. Status Quo

Die bisherigen Versuche einiger beteiligter Akteure der Afrikanischen Raubwels Wirtschaft in MV ein Erzeuger-Netzwerk zu schaffen blieben erfolglos. Nach dem ersten Netzwerktreffen 2016 sprachen die Beteiligten von einem nicht vorhandenen Kommunikationswillen. Ein weiteres Treffen kam die nächsten 5 Jahre nicht mehr zustande. Das nächste Treffen der Züchter wurde erst 2021 am Lehrstuhl für Aquakultur an der Uni Rostock organisiert. Auch auf diesem Treffen konnte nach Angabe einiger Anwesenden kein der Welswirtschaft dienliches Ergebnis erzielt werden. In Gesprächen mit Teilnehmern kam heraus, dass bei dem Treffen ein Gefühl des Misstrauens herrschte und kaum Interesse wahrzunehmen war, gemeinsam die Welswirtschaft in MV voranzubringen. Von der Erzeugergemeinschaft Fischgut Nord sowie der zugehörigen Vertriebsgesellschaft Welsmeister konnten in der aktiven Zeit auch nicht alle Beteiligten in der von ihnen erhofften Form profitieren, und die Gesellschaften sind mittlerweile beide aus dem Handelsregister gelöscht. Zusammengefasst kann festgehalten werden, ein für Wirtschaftssparten wichtiges, gut kooperierendes, offenes Netzwerk zwischen den Produzenten ist in MV nicht vorhanden. Dieses Problem scheint in der gesamten RAS-Wirtschaft besonders ausgeprägt zu sein, da schon 2012 in einer Studie zu den Managementproblemen der internationalen RAS-Wirtschaft, mangelhafte Kommunikation und Informationsaustausch zu den Hauptproblemen zählten (Badiola et al., 2012).

Die sechste Arbeitshypothese lautet „**Afrikanische Raubwels-RAS in Mecklenburg-Vorpommern haben Schwierigkeiten, unter aktuellen Marktbedingungen nachhaltig zu wirtschaften**“. Der wirtschaftliche Erfolg der Clarias-RAS wurde bei der Initialisierung dieser Branche in Deutschland von Einspeisevergütungen, Boni und Förderungen abhängig gemacht. Das Konzept der Clarias-Produktion im Zusammenhang mit Bioenergie hat durch die EEG Novellen in den Jahren 2014, 2016 und 2017 weiter an Attraktivität verloren, da diese zu einer deutlichen Verringerung bzw. teilweise zum Wegfall von Vergütungen geführt haben (BMEL, 2021). Besonders bei gesonderter Betrachtung der Fischzucht als einzeln agierende Unternehmenssparte ohne die Bioenergie haben die Fischzuchten aufgrund steigender Produktionskosten und stagnierend niedriger Verkaufspreise große Probleme, nachhaltig zu wirtschaften. Das Ziel der überbleibenden Anlagen und neuer RAS muss daher sein, ohne jegliche Förderung selbstständig profitabel produzieren zu können. Da der Großteil der Clarias-Farmen in Deutschland nicht aus den roten Zahlen herauskommen konnte, haben auch Investoren seit mehreren Jahren kein Interesse mehr an der Clarias-RAS gezeigt. Seit dem Rekordjahr 2017 der mecklenburgischen- (985 t) und deutschen (1 345 t) Clarias-Zucht befindet sich die Clarias-Wirtschaft im Abbau (Kapitel 1.5.2, Abb. 1.7, 1.9). Da alle großen Clarias-RAS zu 49% durch EU Mittel, Kofinanzierungen des Landes und Gemeinschaftsausgaben teilfinanziert wurden, mussten diese ihre Anlagen mindestens zehn Jahre laufen lassen, damit sie keine Subventionen zurückzahlen mussten. An den stark gesunkenen Produktionszahlen vieler Farmen ist erkenntlich, dass diese nur noch eine Scheinproduktion aufrechterhalten und nach Ablauf der zehnjährigen Frist die Produktion wahrscheinlich ganz einstellen werden. Auch bei den norddeutschen Clarias-RAS wird vermutet, dass einige Anlagen nach Ablauf der Frist ihre Produktion einstellen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Clarias-Zucht in MV im Multi Millionen Bereich durch EU- und Landesgelder und -politik gefördert wurde, sollte auch die Politik ein Interesse daran haben, die Clarias-Zuchten nicht austrocknen zu lassen und mit den großen RAS Betreibern gemeinsam Lösungen zu erarbeiten.

Nach der Hype-Zyklus Kurve befindet sich die Clarias-RAS in Deutschland bereits seit vielen Jahren in einer kritischen Phase und kommt nicht aus dem „Tal der Ernüchterung“ heraus (Abb. 6.3). Seit Jahren werden keine neuen Clarias-Anlagen mehr gebaut (Kapitel 1.5.2, Abb. 1.7) und der Clarias-Preis konnte sich nicht auf einem gewinnbringenden Niveau stabilisieren (Kapitel 1.5.2, Abb. 1.8). Neben dem Abwärtstrend der kommerziellen Clarias-RAS und -Aquaponik ist die sonstige RAS-Wirtschaft in MV weiter gereift und neue Shrimp- und Zander-RAS sind in Betrieb gegangen und im Aufbau.

Die Stärken und Schwächen der Clarias-Erzeuger und die Chancen und Risiken des Marktumfeldes sind in den äußeren Feldern der S.W.O.T-Matrix (Tab. 6.2) dargestellt. In den inneren Feldern werden Strategiebeispiele genannt, die sich aus der Gegenüberstellung der äußeren Punkte herleiten lassen.

Tabelle 6.2. S.W.O.T (Strengths = Stärken; Weaknesses = Schwächen; Opportunities = Chancen und Threats = Risiken) Matrix der deutschen Clarias-RAS-Wirtschaft (nächste Seite).

<p>S.W.O.T-Analyse</p> <p>Erklärung: In den äußeren Feldern der Matrix werden die internen Stärken und Schwächen der Unternehmen und die externen Chancen und Risiken des Wirtschaftsumfelds aufgelistet. In den inneren Feldern werden durch die Gegenüberstellung einzelner Punkte der äußeren Felder konkrete Strategien abgeleitet.</p>	<p>Stärken (Strengths = S)</p> <p>S1) Ressourcensparende Lebensmittelproduktion S2) Finanzielle Rücklagen der Anlagenbetreiber S3) Jungtierzucht im Aufbau/Wachstum S4) Regionale Lebensmittelproduktion S5) Effiziente Abwärmenutzung S6) Gute Wachstumsleistungen S7) Rotfleischiges Clarias-Filet S8) Ganzjährige Produktion S9) Unkomplizierter Fisch S10) Nähe zur Forschung</p>	<p>Schwächen (Weaknesses = W)</p> <p>W1) Schlechte Verwertung der Clarias-Karkassen W2) Schwer vermarktbare Aussehen und Name W3) Strukturschwache Produktionsstandorte W4) Hohe Investitions- und Betriebskosten W5) Hohes Knowhow in RAS notwendig W6) Produktionskapazitäten begrenzt W7) Keine eigene Futterherstellung W8) Ausbruch von Krankheiten W9) Clarias-Preis sehr niedrig W10) Clarias sehr unbekannt W11) Geringe Nachfrage W12) Geringe Verkaufsanteile an Lebensmitteleinzelhandel (LEH) & Endverbraucher</p>
<p>Chancen (Opportunities = O)</p> <p>O1) Gute Wahrnehmung nachhaltiger Lebensmittel O2) Europäische Förderungen bis zu 49% (EMFAF) O3) Grüne Regierung seit Dezember 2021 im Amt O4) Höhere Wertschöpfung durch Veredelung O5) Trend zu "Öko" und Nachhaltigkeit O6) Clarias-Preis stark unterbewertet O7) Wandlung zum Verkäufermarkt O8) Wirtschaftswachstum in MV O9) Wachsender Onlinemarkt O10) Steigende Fischpreise O11) Aufbau Aquaponik O12) Kaum Konkurrenz</p>	<ul style="list-style-type: none"> • S1/S4-O1/O5: Vermarktungsschwerpunkt auf Frische und Nachhaltigkeit der regional erzeugten Fische setzen • S1/S4/S5-O3: Neue Förderungen der RAS möglich • S2-O2: Finanzielle Möglichkeiten und Mittel zum Ausbau und zur Modernisierung nutzen • S2-O6/O7/O10: Schnelle Ausweitung der Produktion bei steigenden Clarias-Preisen • S7-O4: Verschiedenen Veredelungsvarianten des Clarias-Filets im eigenen Betrieb erstellen • S8-O6/O7/O10: Ganzjähriger Fischverkauf bei steigenden Preisen • S10-O6/O7/O10: Forschen wie steigende Fischpreise und Wandlung zum Verkäufermarkt auch in Clarias-Wirtschaft ankommen und genutzt werden können • S10-O11: Neue Technologien für kommerzielle Aquaponik 	<ul style="list-style-type: none"> • W3/W11-O8: Ausbau der MV Infrastruktur zur Verbesserung der Vertriebskanäle und Verkaufsmöglichkeiten nutzen • W4-O3: Ausschöpfen künftiger Fördermöglichkeiten • W6/W9-O4: Diversifizierung der Angebotspalette mit hochpreisigen veredelten Fischprodukten in aus eigener Verarbeitung • W9/W10-O6: Durch Marketingmaßnahmen nachhaltig die Verbraucherwahrnehmung des Clarias stärken und den Verkaufspreis erhöhen • W9-O10: Clarias als günstige Alternative zu den teuren Substituten vermarkten • W10/W11-O1/O5: mit Vermarktungsschwerpunkte der Nachhaltigkeit ins Verbraucherbewusstsein kommen • W12-O4: Aufbau des Handels mit veredelten Produkten an LEH und Endverbraucher
<p>Risiken (Risks = R)</p> <p>R1) Schlechte Wahrnehmung hoher Besatzdichten R2) Bürokratische Hürden für EU-Fördermittel R3) Strengere Tierhaltungs- & Schlachtgesetze R4) Keine Erzeugergemeinschaft/Netzwerk R5) Genehmigungsrechtliche Hürden R6) Keine kontinuierliche Nachfrage R7) Billigimporte aus dem Ausland R8) Steigende Produktionskosten (v.a. Arbeit, Energie, Futter)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • S1/S4-R7: Durch USPs (Alleinstellungsmerkmale) der Regionalität und Nachhaltigkeit klar von Billigimporten und anderen Fischereierzeugnissen abgrenzen • S1/S6-R8: Besseres Produktionskostenverhältnis im Vergleich zu anderen Fischzuchten durch steigende Futtermittel- und Grundstückskosten ausnutzen • S2-R8: Bei steigenden Arbeits- und Energiekosten in höheren Automatisierungsgrad und energieeffizientere Anlagen investieren • S4/S10-R7: Studien, die den regionalen, frischen Produkten eine überlegene Qualität und bessere CO₂-Bilanz im Vergleich zu den Billigprodukten belegen und in der Vermarktung genutzt werden • S8-R4/R6: Kontinuierliche Abnahmemengen mit großen LEH vertraglich vereinbaren 	<ul style="list-style-type: none"> • W1/W7-R4/R8: Mit Erzeugergemeinschaft in ein Fischmehl-, bzw. Futterwerk investieren und Karkassen zur Futtermittelherstellung nutzen • W2/W9-R4: Gemeinsame Marketingaktivitäten zur Verbesserung des Verkaufspreises und Verbraucherwahrnehmung des Clarias • W5-R2/R4/R5: Aufbau eines Netzwerks mit anderen (Clarias-) RAS zur gemeinsamen Nutzung von Experten und Knowhow bezüglich technischer und genehmigungsrechtlicher Fragen und zur Beantragung von Fördermitteln • W8-R4: Aufbau eines Erzeugernetzwerks für gemeinsame Wirtschaftsaktivitäten und Synergieeffekte • W6-R4: Aushilfe bei Produktionsengpässen und der Erfüllung vertraglich vereinbarter Abgabemengen an LEH

6.3.2. Verkaufspreis

Aus den Stärken und Schwächen der Betriebe und den Chancen und Risiken des Wirtschaftsumfeldes können unterschiedliche Strategien hergeleitet werden. Als größte Schwäche der Clarias-Wirtschaft kann der sehr niedrige Clarias-Verkaufspreis angesehen werden (Tab. 6.2; W9). Wie Pasch & Palm (2021) gezeigt haben, ist der Verkaufspreis der mit großem Abstand wirksamste Hebel für die Profitabilität des Betriebs und jede zehnpromtente Erhöhung kann das Betriebsergebnis in der Modellfarm (300 m³ Produktionsvolumen) ausgehend von einem Verkaufspreis von 2,2 EUR/kg um 70 Tsd. EUR verbessern.

Als der Clarias vor ca. 15 Jahren in Deutschland eingeführt wurde, waren weder Markt noch Nachfrage vorhanden. Trotz geringer Nachfrage stiegen die Produktionsmengen in MV und Deutschland von 2008 (MV 0 t; D 54 t) über 2012 (MV 416 t; D 607) bis 2015 (MV 908 t; D 1 309 t) stark an (BMEL, 2010, 2014, 2017). Problematisch bei Nischenprodukten mit geringer Nachfrage ist, dass höhere Produktionsmengen schnell zu einem Preisverfall führen, weshalb bis 2014/2015 im Großhandel mit 1,06 EUR/kg nur sehr geringe Preise erzielt wurden (BMEL, 2016, 2017). Im darauffolgenden Jahr 2016 wurde das rasante Produktionswachstum der Anfangsjahre das erste Mal gebremst und ein Rückgang auf 1 245 t in Deutschland verzeichnet, was zu einem signifikanten Anstieg des Verkaufspreises auf 1,83 EUR/kg führte (BMEL, 2018). Als im Folgejahr 2017 die Produktion um 100 t auf 1 345 t anstieg, fielen die Preise erneut auf 1,38 EUR/kg (BMEL, 2019). Am deutlichsten wurde diese negative Korrelation, als im Jahr 2018 der erste größere Rückgang der produzierten Clarias-Menge um 18% auf 1 099 t/Jahr den Großhandelsverkaufspreis von 1,38 EUR/kg um 72% auf 2,38 EUR/kg erhöhte (BMEL, 2019, 2020). Die Zahlen aus der Vergangenheit zeigen eindeutig wie stark der Preis in diesem Nischenmarkt an das Angebot gekoppelt ist. Da die kommenden Jahre durch das weitere Ausscheiden von Produzenten mit einer weiteren Abnahme der Produktionszahlen zu rechnen ist und innerhalb Deutschlands produktionsmengenmäßig kaum Konkurrenz bei der Clarias-Erzeugung herrscht (O12), sollten sich die überbleibenden Erzeuger in eine Position bringen, in der die Angebotsknappheit ausgenutzt werden kann. Voraussetzung hierfür ist, dass die Nachfrage gleich hoch bleibt oder im besten Fall sogar steigt, damit die Erzeuger bessere Verhandlungspositionen erlangen. Zukünftig wird die Clarias-Wirtschaft in Deutschland nur noch von wenigen großen Produzenten dominiert. Da der Preis stark von nachgefragter und produzierter Menge abhängig ist, würden sich die überbleibenden Produzenten eine deutlich größere Marktmacht verschaffen, wenn diese als Lobby neben gemeinsamen Marketingaktivitäten auch Preis- und Mengenabsprachen organisieren würden. Ein gutes Beispiel zur Effizienz und Lukrativität einer gemeinsamen Strategie zur Preis- und Mengenplanung ergibt sich aus der Analyse des Preisanstiegs in 2017/2018: Im Jahr 2017 wurden 1 345 t Clarias produziert, was bei einem Großhandelspreis von 1,38 EUR/kg der Branche insgesamt 1,86 Mio. EUR Umsatz erwirtschaftet hat. Bei dem Produktionsrückgang auf 1 099 t in 2018 wurden 2,38 EUR/kg gezahlt, wodurch 2,62 Mio. EUR Umsatz erzielt wurden. Die Minderproduktion hat demnach zu einem Umsatzanstieg von 0,76 Mio. EUR der Branche geführt, was bei gleichzeitig gesunkenen Produktionskosten in signifikanten Gewinnzunahmen resultierte. Auch wenn die Zahlen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) nicht vollständig verlässlich sind, zeigt diese Rechnung die Macht einer gemeinsamen Produktions- und Absatzplanung auf, da das Angebot so reguliert werden kann, dass der Markt immer den höchsten Preis hergibt. Bevor größere Produktionsmengen auf den Markt gebracht werden, kann versichert werden, dass der Markt rentable Preise hergibt. Im Falle zu geringer Preise könnte die Produktion geringgehalten oder Fische zurückgehalten werden, bis gemeinsame Vermarktungskampagnen zu einem Nachfrageanstieg führen und höhere Preise verlangt werden können oder zahlungswilligere Kunden gefunden wurden.

Weiteres Potential hat die aktuell angeschlagene Clarias-Wirtschaft aufgrund der Tatsache, dass für den Seafood Markt in Europa generell ein Wandel zum Verkäufermarkt prognostiziert wird (O7) und

steigende Fischpreise zu erwarten sind (O10) (WiWo 2018; Ibaaf 2020 zitiert in EUMOFA, 2020). Könnten sich die Clarias-Produzenten ebenfalls die steigenden Fischpreise zunutze zu machen und beispielsweise den Großhandelspreis auf 3 EUR/kg Rundfisch (lebender oder toter ganzer Fisch, unausgenommen) erhöhen, was ein durchaus realistischer und fairer Preis für europäisch erzeugte Fische wäre, könnte die Modellfarm aus Pasch und Palm (2021) mit 300 m³ Produktionsvolumen bereits 256 Tsd. EUR/Jahr erzielen. Bei einem Anstieg auf 4 EUR/kg betrüge der Gewinn bereits hochprofitable 577 Tsd. EUR/Jahr. Die Rechnungen zeigen, dass die Clarias-RAS aufgrund der hohen Produktivität bei steigenden Verkaufspreisen ein hohes Potential aufweist, eine profitable Wirtschaftssparte der Landwirtschaft zu sein.

Ein zusätzliches Argument für das Potential der Clarias-Zucht kann sich indirekt durch steigende Fischpreise anderer Arten ergeben: Selbst wenn die Clarias-Produzenten nicht direkt von steigenden Fischpreisen profitieren können und ebenfalls höhere Preise erhalten, würden als natürliche Reaktion des Marktes viele Verbraucher anfangen, aufgrund zu hoher Preise nach günstigeren Alternativen zu suchen. Könnten die Erzeuger den Clarias als günstiges und schmackhaftes Substitut im Bewusstsein der Konsumenten verankern, würden die steigenden Preise anderer Arten zu einem Anstieg der Nachfrage nach Clarias führen. Selbst bei kleineren Verkaufspreisanstiegen, die den Produzenten hohe Gewinne einbringen würden, wäre der Preis immer noch deutlich niedriger als bei fast allen anderen Fischarten. Langfristig wird auch in diesem Szenario durch die steigenden Preise anderer Fischarten der Clarias-Verkaufspreis passiv erhöht. Im Jahr 2015/2016 wurde ersichtlich, dass der Clarias von Verbrauchern als Alternativprodukt zum deutlich teureren Europäischen Wels wahrgenommen werden kann. Während der Endverbraucherpreis für Europäischen Wels trotz gleichbleibender Produktion von 10,40 EUR/kg (166 t in 2015) auf 7,27 EUR/kg (161 t in 2016) sank, stieg der Endverbraucherpreis für Clarias in diesen Jahren von 1,73 EUR/kg auf 2,87 EUR/kg an (BMEL, 2017, 2018), was ein Indiz dafür ist, dass der teurere Europäische Wels von den Konsumenten durch den Clarias substituiert wurde.

Der aktuelle durchschnittliche Preis im Großhandel, den die Clarias-Züchter in MV erhalten, von 1,80 EUR/kg Rundfisch (Stand 2022) kann nach wie vor als stark unterbewertet und nicht profitabel bewertet werden. Folglich sind die geringen Clarias-Preise einerseits die größte Schwäche (W9), aber andererseits auch die größte Chance der Clarias-RAS (O6), da der Preis von 1,80 EUR/kg bei der Umsetzung erfolgreicher Marketingstrategien noch sehr hohes Verbesserungspotential aufweisen kann.

Die Gründe für die niedrigen Verkaufspreise sind vielfältig, jedoch sind die folgenden Faktoren hauptverantwortlich für diese Umstände: (1) Die Nachfrage ist sehr gering (W11), da der Clarias ist unter den Fischkonsumenten/Verbrauchern in Deutschland nach wie vor relativ unbekannt ist (W10), bzw. er keinen besonderen Ruf als Edelfisch hat. (2) Zudem werden zu große Mengen des unverarbeiteten Rundfisches vertrieben, wodurch der Großteil der Wertschöpfung nicht im eigenen Unternehmen stattfindet (O4) und (3) zuletzt sind die Abgabemengen an Lebensmitteleinzelhandel (LEH) und Endverbraucher zu gering (W12). Um den Verkaufspreis des Clarias nachhaltig zu erhöhen, muss eine Kombination verschiedener Vermarktungsstrategien entwickelt und umgesetzt werden.

6.3.3. Marketing

Die Verbraucherakzeptanz und ein positives Meinungsbild sind Schlüsselfaktoren zur Öffnung neuer Marktchancen und für den Vermarktungserfolg der heimischen Aquakulturprodukte und eine ökonomisch nachhaltige Aquakultur (Palm & Bischoff, 2016). Das Problem bei der Vermarktung des Afrikanischen Raubwelses besteht jedoch darin, dass welsartige Speisefische keinen besonderen Ruf in Deutschland haben. Den Pangasiaus-Wels (*Pangasianodon hypophthalmus*) verbinden die Verbraucher mit belastetem Billigfisch aus Asien, den Europäischen Wels (*Siluris glanis*) kennt der durchschnittliche Fischkonsument als modriges „Flussmonster“ und beim Afrikanischen Raubwels wirken weder Name

noch Aussehen besonders verkaufsfördernd (W2). Unter dem Begriff Wels wird demnach in Deutschland kein Edelfisch assoziiert und Konsumenten bevorzugen bekannte Produkte und Produktnamen. Beispielsweise werden Tilapia (*Oreochromis niloticus*) oder Köhler (*Pollachius virens*) unter den verkaufsfördernden Handelsnamen „Buntbarsch“ oder „Seelachs“ vermarktet. Der Name Clarias oder Claresse® hat einen deutlich besseren Klang als Afrikanischer Raubwels, ist jedoch den meisten Konsumenten kein Begriff und bedarf daher Marketingaufwand um ein (Marken-) Namensbewusstsein zu schaffen. Ein weiteres Problem bei der Vermarktung ergibt sich aus den Haltungsbedingungen. Normalerweise wirkt es image- und verkaufsfördernd für den Ab-Hof-Verkauf, wenn Konsumenten die Möglichkeit gegeben wird, die Tiere und ihre Umgebung zu sehen (Strecker et al., 2010). Attraktive Verkaufsstätten führen nach Strecker et al. (2010) zu einem besseren Einkaufserlebnis, höherer Kundenbindung und besseren Möglichkeiten der Direktvermarktung. Viele heimische Forellenzüchter können beispielsweise ihre Durchflussanlagen mit klarem Bach- oder sogar Bergwasser versorgen, was sich positiv auf die Kundenwahrnehmung auswirkt. Auch die deutschen Karpfenteiche sind häufig in idyllischen Umgebungen und führen zu einer positiven Assoziation mit dem Fisch und der Zucht. Dagegen werden Afrikanische Raubwelse in dunklen Hallen bei sehr hohen Besatzdichten gezüchtet (R1). Diese Haltungsbedingungen den Kunden zugänglich zu machen, könnte das Gegenteil bewirken und verkaufsschädigend wirken und sollte daher vermieden werden. Alternativ kann ein integriertes aquaponisches Gewächshaus (O10) zu einer Attraktivitätssteigerung des Hofes und der Verkaufsstätte führen, was das Einkaufserlebnis der Kunden bereichert und dadurch die Direktvermarktung stärkt (Strecker et al., 2010).

In der Vermarktung müssen Alleinstellungsmerkmale (USP = unique selling proposition) den Clarias von anderen Fischen positiv unterscheidbar machen und den Kunden Kaufgründe geben. Um den Raubwels von vielen anderen Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen abzuheben, sollten die Nachhaltigkeit (S1) und Frische der regional erzeugten Fische (S4) als USPs hervorgehoben werden. Dadurch kann der Trend der Verbraucher hin zu „Öko“ und Nachhaltigkeit (O5) genutzt werden und der Clarias kann sich als nachhaltig wahrgenommenes Lebensmittel (O1) von einem Großteil der Fische und den Billigimporten (R7) abgrenzen. Bei der visuellen Vermarktung ist es ebenfalls vorteilhaft, den Fokus auf das schmackhaft aussehende, rotfleischige Welsfilet (S7), anstelle des schuppenlosen schwarzen Fisches mit überproportional großem Kopf zu legen. Frisches Clarias-Filet wurde laut Morgenstern et al. (2017) auch zu Endverbraucherpreisen von 11,50 EUR/kg in Edeka-Sonderangebotsaktionen (Oktober 2016) oder bis zu 19 EUR/kg in Marktständen mit „grätenarm“ und „festfleischig“ beworben, was zusätzliche USPs des Fisches sind.

Die Marketingmaßnahmen können ähnlich wie die der kommerziellen Aquaponikanlagen (Kapitel 6.2.3) sein. Zuerst muss eine Zielgruppe definiert werden und Orte gesucht in denen diese möglichst effizient mit geringen Streuverlusten angesprochen werden kann. Als wünschenswerte Zielgruppe lassen sich Fischkonsumenten definieren, die Wert auf Nachhaltigkeit, Regionalität und Frische legen und gerne neue Alternativen zu den herkömmlichen Arten ausprobieren möchten. Die höchste Dichte dieser Zielgruppe befindet sich auf Fischmärkten, Supermärkten mit Tiefkühl- und Frischfischabteilung, in Hofläden von Fischproduzenten und bei Fischhändlern. Bei kooperierenden Verkaufspartnern sollten im regional relevanten Umkreis Infostände, Informationsbroschüren, Rezepte, etc. möglichst dauerhaft zur Verfügung gestellt werden und Kochlehrgänge, Gratisverkostungen, Informationsveranstaltungen, etc. in regelmäßigen Abständen erfolgen. Im Optimalfall sollte auch hier eine Partnerschaft mit einem großen LEH eingegangen werden, mit dem größere Abnahmemengen vertraglich vereinbart werden, wo dauerhafte Marketingmaßnahmen stattfinden und eine treue Stammkundschaft aufgebaut werden kann.

Um Synergien freizusetzen sollten Marketingmaßnahmen als gemeinsame Investition der Erzeuger getätigt werden da verhältnismäßig weniger Geld aufgewendet werden muss als bei alleinigen Maßnahmen, aber der gleiche Nutzen erzielt werden kann. Bei der erwarteten Gesamtproduktion in MV von ca. 833 t Clarias im Jahr 2022 und der Annahme, dass 100 % (1) als Rundfisch an den Polnischen/Österreichischen Großhandel für 1,80 EUR/kg, (2) als frisches Filet an den Hamburger Großhandel für 6,50 EUR/kg abgegeben werden, läge der Umsatz bei (1) 1,50 Mio. EUR, bzw. (2) 2,22 Mio. EUR. Unter der Annahme, dass eine Investition in Marketingmaßnahmen für 100 Tsd. EUR zu einem zehnjährigen Preisanstieg führt, könnte dies den Gesamterlös der Clarias-Erzeuger in MV um (1) 150 Tsd. EUR, bzw. (2) 222 Tsd. EUR steigern. Ein guter Ansatz zur Berechnung der Anteile der Investitionssumme wäre, diese an den Produktionszahlen zu bemessen, da eine größere Produktion auch anteilmäßig mehr durch Preissteigerungen profitiert.

Da unter den Clarias-Erzeugern aktuell kein oder kaum Kommunikationswille herrscht (R4), könnte die Marketinggesellschaft der Agrar- und Ernährungswirtschaft Mecklenburg-Vorpommern e.V. (AMV) den Produzenten dabei helfen, mit anderen Erzeugern und Veredlern von Fischerzeugnissen ein Netzwerk zu bilden. So könnte eine Lobby geschaffen werden, in der gemeinsame Marketingaktivitäten den Schwerpunkt auf nachhaltige Preis- und Absatzförderung regionaler Produkte setzen. Zusätzlich sollte Kontakt zur Politik aufgenommen werden, da die Regierung in MV Interesse daran haben sollte, die Vermarktung des Afrikanischen Raubwelses zu unterstützen, da durch ihre Hilfe viele Millionen Euro aus den Europäischen Töpfen in die Welsaquakultur geflossen sind und eine Steigerung der Produktion der lokalen Wirtschaft förderlich wäre.

Ein weiterer Ansatzpunkt für besseres Marketing ist die Modernisierung der Online Präsenz. Einige der RAS-Anlagen in Deutschland haben keine- oder nicht zeitgemäße Webseiten und bedürfen ein dringendes Upgrade. Eine gute Webseite trägt entscheidend zum öffentlichen Erscheinungsbild des eigenen Unternehmens und zur Konsumentenwahrnehmung der Produkte bei und wirkt sich direkt und indirekt auf die Umsätze aus (Zerres & Israel, 2016). Eine gute Webseite sollte übersichtlich, informativ und klar strukturiert sein und eine intuitive Benutzeroberfläche haben. Besonders wichtig und bei einigen Internetauftritten völlig vernachlässigt, sind professionelle, hochauflösende Produkt- und Unternehmensbilder die in ein ansprechendes Corporate Design (einheitliches Unternehmensdesign) eingebettet sind. Menschen nutzen das Internet nicht mehr nur zur Informationsbeschaffung über Lebensmittel, sondern spätestens seit Beginn der Corona Krise 2020 auch vermehrt zum Lebensmitteleinkauf. Eine eigene Webseite sollte dem Kunden daher die Möglichkeit bieten, komfortabel von zu Hause aus die Produkte zu bestellen und abzuholen. Die eigene Infrastruktur kann auch so ausgelegt werden, dass Kunden in einem wirtschaftlich vertretbaren Umkreis die Fischprodukte nach Hause geliefert bekommen. Zusätzliche Einnahmen können generiert werden, wenn nach dem Vorbild von Crustanova (München) über einen E-Commerce Webshop (O9) zugekaufte Produkte gehandelt werden (Crustanova, 2022).

6.3.4. Wertschöpfung und Absatzkanäle

In der Lebensmittelindustrie in MV wird der größte Teil der Wertschöpfung in der Verarbeitung und Veredlung erzielt (O4) (Politik MV, 2018; Regierung MV, 2022d) und Mergenthaler und Lorleberg (2016) haben für den Afrikanischen Raubwels nachgewiesen, dass ein enger Zusammenhang zwischen Zahlungsbereitschaft der Kunden und Verarbeitungsgrad besteht. In Deutschland wurden 2021 jeden Monat zwischen 151-208 Mio. EUR in der fischverarbeitenden Industrie umgesetzt (Statista, 2022g) und in MV wurde seit 1991 im Fischereisektor mit 177 Mio. EUR vorrangig in die Fischverarbeitungsindustrie investiert (Regierung MV, 2022e). Vermarktungstechnisch und monetär liegen daher gute Gründe vor,

anstelle des Rundfisches das rotfleischige Filet zu vertreiben und dieses betriebsintern zu diversen höheren Veredelungsstufen zu verarbeiten und damit Güter mit höherem Geldwert zu schaffen. Wie Pasch und Palm (2021) gezeigt haben, können höhere Verarbeitungsstufen durch die deutlich höheren Verkaufspreise der veredelten Produkte zu sehr lukrativen Betriebsergebnissen führen. Die im Jahr 2022 erhaltenen mittleren Abgabepreise von 1,80 EUR/kg Rundfisch führen bei 100% Abgabe an den polnischen und österreichischen Großhandel für in der 300 m³ Produktionsvolumen Modellfarm (Pasch & Palm, 2021) zu Verlusten von 128 Tsd. EUR/Jahr. Werden 100% der Produktion filetiert und frisch an den Hamburger Großhandel abgegeben, kann die Modellfarm bei 6,50 EUR/kg frischem Filet bei Handfiletierung mit Gewinnen von etwa 41 Tsd. EUR/Jahr rechnen. Unter der Annahme, dass von den Filets 50% beispielsweise durch Räuchern weiter veredelt werden und 12,50 EUR/kg Räucherfilet erzielen, könnte die Modellfarm bereits trotz stark erhöhtem Arbeitsaufwand und Investitionskosten, Gewinne von 353 Tsd. EUR/Jahr erzielen und stellt mit einem Return on Investment von 33,44% (gerechnet auf Investition - 49% Subventionierung) ein sehr lukratives Geschäftsmodell dar.

Um automatisiert und hocheffizient schlachten und verarbeiten zu können sind hohe Investitionen notwendig. Die Bioenergie Lüchow hat 2010 beispielsweise 2 Mio. EUR für eine Verarbeitungshalle mit halbautomatischer Schlachtung zur Verarbeitung von bis zu 2 000 t/Jahr ausgegeben. Bei der geplanten Produktion von 600 t im Jahr 2022 wäre diese Anlage also nur zu maximal 30% ausgelastet. Die zwei anderen großen Betriebe ohne Schlachtautomation, hatten, bzw. haben durchgängig eine hohe Anzahl an Arbeitskräften zur Verarbeitung beschäftigt. Auch die kleine Welsfarm LAW hat mit einem jährlichen Output von 27,5 t täglich im Schnitt 75 kg Fisch die betäubt, filetiert, gehäutet, verpackt und verkauft werden müssen, was einen beträchtlichen Arbeitsumfang für einen Familienbetrieb mit 1,5 Mitarbeitern darstellt. Die Zahlen aus Pasch & Palm (2021) zeigen, dass eine reine Handschlachtung den Unternehmenserfolg verbessern kann und v.a. bei sinkenden Rundfischpreisen die Filetierung attraktiver wird. Bei steigenden Rundfischpreisen und gleichbleibenden Filetpreisen, wird die Filetierung dagegen unattraktiver. In der Modellfarm führt ein Preis von 2,33 EUR/kg für Rundfisch bei 100% Abgabe des Rundfisches zu dem gleichen Betriebsergebnis (ca. 41 Tsd. EUR) wie wenn 100% der Produktion als Filets zu 6,50 EUR/kg verkauft werden. Die zukünftig steigenden Mindestlöhne lassen die Handschlachtung ebenfalls zunehmend unattraktiver werden und es müssen höhere Filetpreise erzielt oder ein höherer Automatisierungsgrad angestrebt werden.

Ein guter Ansatz zur Steigerung der Effizienz der Clarias-Wirtschaft in MV wäre (gewesen), wenn die anderen Welszuchten ihre Verarbeitung wieder nach Lüchow outsourcen um die Kapazitäten der Verarbeitungsanlage der Lüchower Bioenergie & Welsfarm auszulasten. Die ersten Ansätze der gemeinsamen Verarbeitung scheiterten aufgrund unterschiedlicher Interessen und Vereinbarungen, die nicht für alle Seiten zufriedenstellend waren. Könnten an dieser Stelle neue Vereinbarungen getroffen werden, könnten beträchtliche Summen an Arbeitszeit eingespart werden und alle Erzeuger von der höheren Auslastung der Schlachtanlage profitieren. Die Hauptvoraussetzung hierfür ist ein Kommunikationswille und das Abschalten alter Misstrauensverhältnisse. Jedoch hat die Tessiner Anlage in eine Modernisierung der eigenen Verarbeitungsanlage investiert und der Betrieb in Sukow hat 2021 die eigene Verarbeitung stark heruntergefahren. Laut Aussage der Sukower Verkaufsleiterin über Auflagen, Regeln und Kontrollen der Behörden-, aber auch von Kundenseite, enormen Druck auf die Verarbeiter aus, wodurch die Schlachtung und Verarbeitung verkompliziert und unprofitabel wird (Haenning, 2022, pers. Komm.). Zusätzlich hätten die Örtlichkeiten einen Umbau nicht zugelassen. Teilweise fordere der Handel auch Zertifizierungen wie ASC, Bio oder die Einhaltung der „International Featured Standards“ (IFS = Lebensmittel-, Produkt- und Servicestandards), die bei Einhaltung zu weiter steigendem Aufwand und Kontrollen führen, ohne verbindliche Zusicherung von Kundenseite, dass man dauerhaft mehr Erlös durch

diese Zertifikate erwarten kann (Haenning, 2022, pers. Komm.). Es wird ersichtlich, dass die Herausforderungen darin bestehen, die Vielzahl an zusätzlichen rechtlichen Vorschriften und Regeln (R5) bei der Fischverarbeitungen einzuhalten und durch entsprechende hygienerechtliche und bauliche Maßnahmen umzusetzen. Zudem muss ein Vertriebsnetz für die veredelten Produkte aufgebaut werden. Ein großer Vorteil einer zentralen Verarbeitung bestände darin, dass nur ein Wirtschaftsakteur spezialisiert sein und die Vorschriften einhalten muss. Damit alle Parteien an der langfristigen Zusammenarbeit festhalten, müssen Deals geschlossen werden, in der die Spezialisierung angemessen honoriert wird, aber auch die Erzeuger einen fairen Anteil an der höheren Wertschöpfung der Verarbeitung erhalten. Für die Landwirtschaft in MV bedeutet ein geringerer Automatisierungsgrad, also ein hoher Anteil an Handschlachtung, einen höheren Beschäftigungsgrad und damit mehr Arbeitsplätze.

In Pasch und Palm (2021) wurde beschrieben, dass höhere Abgabemengen an LEH und Endverbraucher angestrebt (W12) werden sollten, da dort höhere Verkaufspreise erzielt werden können. Da viele große Handelsketten zunehmend auf ein nachhaltiges Image setzen und mit dem Verkauf regionaler Produkte werben, könnte für diese die Partnerschaft mit deutschen Fischzüchtern ebenfalls interessant sein. Aufgrund der nachhaltigen Zuchtmethodik und Regionalität von RAS, kann sich die Clarias-Wirtschaft den Trend zunutze machen, sodass Handelsketten den Clarias als Image förderndes Produkt in ihrem Sortiment haben wollen (O1). Eine Partnerschaft mit einem großen LEH einzugehen, könnte viele Vorteile verbinden. Aktuell ist das Problem einiger Züchter, dass Großhändler nicht kontinuierliche Mengen nachfragen, sondern punktuell größere Mengen benötigen (R6), besonders wenn deren Kunden Sonderangebote und Werbeaktionen durchführen. Diese punktuelle Nachfrage nach günstigem Fisch führt zu geringeren Abgabepreisen und schlechterer Produktions- und Absatzplanung. Eine der Stärken von RAS ist, dass die Fische in gestaffelter Produktion zu jeder Jahreszeit kontinuierlich gezüchtet werden können (S8). Mit einem großen LEH eine Partnerschaft einzugehen, bzw. vertraglich Abnahmemengen zu vereinbaren würde den Zwischenhändler ausschalten, höhere Verkaufspreise und mehr Planungssicherheit in Produktion und Verkauf bringen. Die Herausforderungen bestehen auch hier in der Einhaltung strengerer Vorschriften und Regeln, in der Erfüllung der vereinbarten Abnahmemengen und der Bewältigung des logistischen Mehraufwands. Auch hier wäre ein Erzeugernetzwerk hilfreich (R4), in dem beispielsweise durch Arbeitskraft- und Fuhrparkteilung effizienter dieser Mehraufwand bewältigt werden kann, Versorgungsengpässe unwahrscheinlicher und damit auch die Vertragserfüllungen deutlich leichter umsetzbar sind.

Einen höheren Verkaufsanteil an Endverbraucher/ durch Direktvermarktung kann am besten über einen Hofladen und/oder Onlinebestellmöglichkeiten über die eigene Webseite erfolgen. Die Vorteile und Anforderungen einer eigenen Webseite sind in Kapitel 6.3.4 beschrieben. Bei einem Hofladen ist problematisch, dass die Produktionsstandorte teilweise in den strukturschwächsten Regionen Deutschlands (W3) liegen, wo Kundschaft und Kaufkraft gering sind. Ein Hofladen an diesen Standorten könnte nur einen Bruchteil der Produktion vertreiben. Alternativ könnte ein attraktiverer Verkaufsstandort in einer der größeren Städte Rostock, Schwerin, Neubrandenbrug, Greifswald oder Stralsund in Frage kommen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Eröffnung von Hofläden an Orten mit hoher Touristenfrequenz an der Ostsee oder Mecklenburger Seenplatte. Die Herausforderung liegt hier im Aufbau der Logistik und neuen Investitionen in Verkaufsräume und -technik. Sollte ein produktionsferner Verkaufsstandort eröffnet werden, sollten dort auch zugekaufte Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen gehandelt werden um die Attraktivität für die Kunden durch ein größeres Angebot zu erhöhen, aber auch um grundsätzlich den Umsatz zu steigern. Neben hoher Abgabepreise an Endkunden, ist ein großer Vorteil von einem eigenen Verkaufsstandort, dass dort gezielte Werbemaßnahmen für die eigenen Produkte ohne

vorherige Absprache mit Verkaufspartnern erfolgen können und eine eigene Stammkundschaft aufgebaut werden kann.

Zusammenfassend gilt, dass zur Erhöhung der Verkaufspreise die drei Strategien (1) Erhöhung der Nachfrage durch Verbesserung des Verbraucherbewusstseins/der Bekanntheit des Clarias, (2) höhere Verarbeitungsstufen und (3) größere Abgabemengen an LEH und Endverbraucher parallel gefahren werden müssen. Eine höhere Verarbeitungsstufe und höhere Abgabemengen an LEH und Endverbraucher sind direkte Maßnahmen und führen bei gleichbleibender Nachfrage zu einer unmittelbaren Steigerung des Verkaufspreises. Dagegen führen Marketingmaßnahmen die das Image des Clarias und Verbraucherbewusstsein stärken durch steigende Nachfrage indirekt zu einer Verkaufspreiserhöhung und beeinflussen damit auch die Verkaufspreise der veredelten Produkte und der angegebenen Produkte an LEH und Endverbraucher positiv.

6.3.5. Forschung, Netzwerk und Zukunft

Die Nähe zu Forschungseinrichtungen (S10) die auf Aquakultur spezialisiert sind, können sich die RAS Betreiber ebenfalls zunutze machen. Der Lehrstuhl für Aquakultur und Sea-Ranching der Universität Rostock mit dem FischGlasHaus ist auf den Afrikanischen Raubwels, Parasiten und Aquaponik spezialisiert. Züchter und Universitäten müssen in enger Kooperation praxisrelevante Forschung betreiben, gemeinsam die aktuellen Fragen und Probleme angehen und bewältigen. Um die Clarias-Wirtschaft zu stärken sollte künftige Forschung auch vermehrten Fokus auf wirtschaftliche, speziell marketingtechnische Fragestellungen legen und kommerziell anwendbare Forschung an den Bedürfnissen der Clarias-Züchter ausrichten. Die Fragen, wie Nachfrage und Verkaufspreise erhöht werden können, müssen als wichtigste Punkte zur Stabilisierung der Clarias-Wirtschaft erforscht und beantwortet werden.

Die kommerziellen Anlagen benötigen dringend auf den Clarias spezialisierte Sortiermaschinen für verschiedene Größenklassen, was zu einer enormen Effizienzsteigerung durch Arbeitszeiteinsparung und homogeneres- und dadurch besseres Wachstum führen würde (Pasch et al., 2022, eingereicht). Zusätzlich muss an der Verbesserung der Wasseraufbereitungssysteme geforscht werden, da die aktuell verwendeten Absatzbecken (Sedimenter) reinigungsintensiv und ineffizient sind. Ein ebenfalls sehr praxisrelevantes Forschungsthema ist die Zucht von gesunden Clarias-Setzlingen, an dem der Lehrstuhl intensiv forscht. Zu den Stärken der Clarias-Wirtschaft in MV gehört mittlerweile, dass zwei große Züchter eine eigene Satzfishproduktion (S3) aufgebaut haben. Nach eigener Angabe werden in Lüchow mittlerweile über den eigenen Bedarf hinaus Jungfische gezüchtet und bald weiterverkauft (Merkatz 2022, pers. Komm.).

Zu einer weiteren Stärke der großen Clarias-RAS Betreiber gehörten die hohen finanziellen Rücklagen der Eigentümer (S2). Beispielsweise könnten die Betreiber im Falle von strengeren Tierhaltungs-, oder Verarbeitungsgesetzen (R3) entsprechende Umbaumaßnahmen einleiten, stark steigende Produktionskosten (R8) aushalten, aber auch bei stark steigenden Verkaufspreisen entsprechende Vergrößerungs- und Modernisierungsmaßnahmen einleiten. In Kombination mit dem Europäischen Meeres-, Fischerei und Aquakulturfonds (EMFAF) sind die Möglichkeiten einer 49% Förderung (O2) von fast allen Investitionen weiterhin bis 2027 möglich. Weiterhin unterstützt und fördert der Fonds die Gründung von "Erzeugerorganisationen".

Eine der großen Schwächen der Clarias-RAS ist, dass kein Netzwerk und damit auch keine Lobbyarbeit existiert (R4), von der in einer intakten Wirtschaft alle beteiligten Wirtschaftsakteure profitieren könnten. In Pasch und Palm (2021) wurden bereits die vielfältigen Vorteile aufgelistet. Die Nutzung gemeinsamer Ressourcen, Teilung von Knowhow, Arbeitskräften, Maschinen, Fuhrpark etc. würde eine Vielzahl an Synergien freisetzen. Gemeinsam könnten Verträge für Großabnahmemengen von Futter und mit großen LEH-Ketten geschlossen werden und Investitionen in Marketingkampagnen

(Kapitel 6.3.3) getätigt werden. Auch bei Lieferproblemen oder Versorgungsengpässen kann sich gegenseitig geholfen werden. Mehrere wirtschaftlich interessante Vorteile würden sich ergeben, wenn gemeinsam in Anlagen zur Karkassenaufbereitung (W1) und Futtermittelherstellung (W7) investiert würde. Vom Clarias sind nur 41% des Rundfisches Filet und der restliche Teil sind hochwertige Fischabfälle. Bei der erwarteten Gesamtproduktion in 2022 von 833 t stünden in MV bei 100% Filetierung über 491 t Karkassen und damit hochwertige Fischproteine und -öle zur Verfügung die bei Weiterverarbeitung hohes Wertschöpfungspotential besitzen. Dazu müssten die Karkassen entweder chemisch siliert oder tiefgefroren werden und im Anschluss und in gemeinsam genutzten Anlagen zu Fischmehl verarbeitet oder direkt zur Herstellung von Trockenfutterpellets verwendet werden (Valbuena et al., 2012).

Der Aufbau einer Aquaponik (O11), also die Integration hydroponischer Systeme in ein bestehende Clarias-RAS, kann attraktiv sein, ist jedoch mit hohen Investitionskosten und den Aufgaben der Eröffnung eines ganz neuen Wirtschaftszweiges verbunden. Nur bei gut laufendem Betrieb und Gewinnen der Welszucht kann eine Investition in aquaponische Erweiterungen Sinn machen, da eine unrentable Fischzucht keine Basis für eine Aquaponik sein darf. Da die Standorte der Welszuchten jedoch weit entfernt von attraktiven Verkaufsstandorten sind, sollte eine größere Investition gut durchdacht sein. Grundsätzlich ist eine große Anlage mit mehr als 1 000 m² Gewächshausfläche aufgrund der Skaleneffekte kleineren Anlagen vorzuziehen (König et al., 2016). Vor Erbauung sollte ein Abnehmer im Einzelhandel gefunden werden, der wie REWE bei der ECF Farm in Berlin, vertraglich geregelt größere Mengen mit aquaponischen Preisauflagen abnehmen und verkaufen kann (ECF Farm, 2022). Alternativ kann über eine kleinere aquaponische Erweiterung nachgedacht werden, wenn die Produktion mit höheren Preisauflagen wie bei der Stadtfarm in Berlin an die Endkunden verkauft werden kann und Laufkundschaft in den Hofladen zieht (Stadtfarm, 2022). Beide Alternativen führen zu einer Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung des Unternehmens und der produzierten Produkte, was bei guter Vermarktung auch die Möglichkeiten der Fischpreiserhöhung bietet. Die marketingpsychologischen Auswirkungen, die eine integrierte Pflanzenzucht auf eine bestehende Fischzucht hat sind schwer evaluierbar. Eine zukünftige Aufgabe der Forschung sollte darin bestehen, den subjektiven Zusatznutzen einer integrierten Zucht zu messen und in einen konkreten monetären Wert umzurechnen, um realistischere Kosten- und Nutzenrechnung für Investitionen in aquaponische Integrationen durchführen zu können.

Obwohl der Afrikanische Raubwels mengenmäßig mit dem Europäischen Aal zur wichtigsten Spezies der deutschen RAS-Wirtschaft gehört und mit dem Lehrstuhl für Aquakultur und Sea-Ranching ein Forschungsstandort mit dem wissenschaftlichen Schwerpunkt auf dem Clarias existiert, ist es wahrscheinlich, dass in MV und vielleicht auch in ganz Deutschland in naher Zukunft nur noch ein oder zwei große Clarias-Züchter produzieren werden. Daneben werden noch Forschungseinrichtungen und kleinere Anlagen den Afrikanischen Raubwels produzieren.

Mit den vorhandenen Produktionsvolumina von 1 107 m³PV aller Clarias-RAS in MV wäre bei einer maximalen Besatzdichte von 450 kg/m³ im Dauerbetrieb theoretisch eine Produktion von 1 182 Tsd. t Rundfisch im Jahr 2022 möglich. Dabei wären ca. 35 Personen feste eingestellt, wobei die Arbeitskräfte auch in den Bioenergie-Abteilungen der Betriebe genutzt werden. Realistischer ist jedoch, dass 2022 nur 780 m³PV kommerziell genutzt werden, was bei einer durchschnittlichen maximalen Besatzdichte von 450 kg/m³ zu einer Produktion von ca. 833 t Clarias in MV führen würde und insgesamt etwa 25 Arbeitsplätze (inkl. Bioenergie) schafft. Der erwartbare Umsatz der Branche wird im Bereich 1,50 Mio. EUR (100% Rundfischverkauf zu 1,80 EUR/kg) bis 2,22 Mio. EUR (100% Filetverkauf zu 6,50 EUR/kg) liegen. Die siebte Arbeitshypothese besagt **„Die Clarias-Wirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern hat das Potential ein**

profitabler Wirtschaftssektor zu sein“. Der Verkaufspreis, als größte Schwäche der Branche bietet gleichzeitig das größte Potential. Könnte der durchschnittliche Abnahmepreis im Großhandel auf realistische 3 EUR/kg oder 10 EUR/kg Filet steigen, könnte die Branche 2,5-4,9 Mio. EUR umsetzen und damit ein rentabler Wirtschaftssektor werden. Weiteres Potential steckt in der Verarbeitung/Veredelung der Produkte, da hier der größte Teil der Wertschöpfung erzielt und das meiste Geld im Lebensmittelsektor verdient wird. Die Nutzung unterschiedlicher Vertriebskanäle kann den Verkaufspreis weiter erhöhen und die Schaffung einer Erzeugergemeinschaft/Lobby kann weiteres Potential entfalten.

Für ein importabhängiges Land wie Deutschland, das knapp 90% des Gesamtbedarfs der Fischerei- und Aquakulturerzeugnissen durch Importe deckt, führt steigende oder gleiche Nachfrage bei gleichzeitig weniger Angebot dazu, dass sich der Fischhandel in einen Verkäufermarkt wandelt und Produzenten sich in einer besseren Marktposition befinden werden. Können die Clarias-Produzenten den Trend der steigenden Fischpreise auch für sich nutzen, steckt sehr hohes Potential in der hochproduktiven Clarias-RAS, da der aktuelle Clarias-Preis als zu niedrig bewertet werden kann. Weiteres Potential steckt in der Clarias-RAS aufgrund des geringen Ressourcenverbrauchs. Im Verhältnis zu anderen Arten hat der Clarias eine deutlich bessere Futtermittelnutzung (FCR = feed conversion ratio), braucht also weniger Futter und aufgrund der hohen Besatzdichten deutlich weniger Fläche als andere Arten. Stark steigende Futterpreise oder Flächenmangel führen zu einem besseren Produktionskostenverhältnis gegenüber anderen Arten.

Dass die RAS-Wirtschaft allgemein ein hohes Potential in MV aufweist, zeigt die Entwicklung weiterer Anlagen. Die drei Shrimp-Zuchten in MV haben ein gesamtes Produktionsvolumen von 1 255 m³PV und 2022 eine voraussichtliche Produktionsmenge von 15-25 t bei ca. 8 Mitarbeitern. Bei 100% Direktvermarktung werden damit bei einem Verkaufspreis von 50 EUR/kg 0,75-1,25 Mio. EUR Umsatz in 2022 erzielt und bei 80 EUR/kg sogar 1,2-2 Mio. EUR. Insgesamt wird die RAS Privatwirtschaft im Jahr 2022 also 2,25-4,22 Mio. EUR umsetzen. Über die Zanderanlage ist bisher kaum etwas bekannt, außer eine geplante Menge von 500-700 t/Jahr bei Maximalauslastung (Deutsche Edelfisch, 2022). Die letzten offiziell gemeldeten Großhandelspreise aus 2019 von 14,04 EUR/kg Zander (BMEL, 2021) dürften mittlerweile deutlich gestiegen sein, würden aber zu einem Umsatz von mindestens 7-9,8 Mio. EUR führen. Bei 20 EUR/kg könnte die Anlage Umsätze von 10-14 Mio. EUR erwirtschaften.

Ist keine signifikante Steigerung des Verkaufspreises oder nennenswerte Subventionen durch die neue Regierung (O3) über mehrere Jahre absehbar, werden aufgrund der EEG-Novellen höchstwahrscheinlich keine Investitionen mehr in Clarias-RAS mit einem Produktionsvolumen von 300 m³ oder weniger getätigt. Sehr groß skalierte Anlagen, oder Clarias-Anlagen mit einer verbesserten Technologie, hätten dagegen noch Chancen unter aktuellen Marktbedingungen rentabel produzieren zu können. Der Betreiber der Welsfarm LAW (30 m³PV, 27,5 t/Jahr) berichtet beispielsweise, dass sich seine kleine Anlage selber trage, eine sinnvollere Anlagentechnik als die großen Zuchten habe und er seine Fische deutlich hochpreisiger (ca. 5 EUR/kg) als die großen Zuchten vermarkten könne (Wedell, 2022, pers. Komm.). Diese Anlage könne von 1,5 Mitarbeitern betrieben werden und setzt bei den angegebenen Zahlen etwa 137,5 Tsd. EUR/Jahr um. Bleiben die Verkaufspreise niedrig und die Probleme der Clarias-RAS bestehen, werden in MV zukünftige Investitionen in RAS in hochpreisig gehandelte Aquakulturorganismen wie z.B. Shrimp und Zander getätigt werden. Für den Zander zahlt der Endverbraucher fast 50 EUR/kg, für deutsche Shrimps bis zu 80 EUR/kg. Nachfrage und Preise dieser Aquakulturerzeugnisse steigen stetig und das ohne den Einsatz von Vermarktungskampagnen. Eine Shrimp-RAS, die ihren Output von z.B. 20 t/Jahr an die Endverbraucher zum durchschnittlichen Verkaufspreis von 50 EUR/kg abgeben kann, macht mit 1 Mio. EUR/Jahr mehr Umsatz, als eine Clarias-Zucht, die 500 t/Jahr nur für 1,8 EUR/kg an den Großhändler abgibt und damit nur 0,9 Mio. EUR umsetzt.

Zusätzliche Vorteile ergeben sich durch das signifikant reduzierte Handling von 500 t auf 20 t, was lediglich 4% des Gewichts entspricht, wodurch ein hoher Anteil der Arbeitskosten entfällt.

Der Fokus der Forschung sollte sich bezüglich des Afrikanischen Raubwelses auf wirtschaftliche Fragestellungen, wie Kostensenkungen der Produktion und Preissteigerung des Clarias richten und konkrete Fragestellungen der Clarias-Produzenten beantworten. Sollte die Clarias-Wirtschaft in MV die kommenden Jahre nicht stabilisieren und der Negativtrend zu einer Betriebsaufgabe der letzten großen Clarias-RAS führen, sollte die Forschung vermehrt die aufblühende Shrimp- und Zander-RAS in MV unterstützen.

MV bleibt als landwirtschaftlicher Standort für Investoren weiterhin attraktiv. MV hat ein gutes Wirtschaftswachstum und verhältnismäßig sehr geringere Miet- und Kaufpreise für Grundstücksfläche. Zusätzlich stehen mehrere, auf RAS-Technologie spezialisierte Forschungseinrichtungen als Partner bereit, um mit den Unternehmen die RAS-Wirtschaft in MV voranbringen. Der Nachteil an MV ist, dass es das strukturschwächste Bundesland mit wenig Bevölkerungsdichte und Kaufkraft ist. Dadurch sind große Absatzmengen am Ort der Produktion schwerer realisierbar und die zwei der Nachhaltigkeitsvorteile von RAS, weniger CO₂ und Transportkosten durch kurze Vertriebswege zu erzielen, werden relativiert.

6.4. Zusammenfassung

Nachhaltige Lebensmittelproduktionssysteme wie rezirkulierende Aquakultursysteme (RAS) und Aquaponik nehmen einen zunehmenden Stellenwert in der Gesellschaft ein. Die großen Clarias-RAS haben jedoch Probleme profitabel zu wirtschaften und der erste Versuch kommerzieller Aquaponik in Mecklenburg-Vorpommern ist aufgrund unwirtschaftlicher Produktion gescheitert. Die vorliegende Arbeit untersuchte daher das Clarias-Wachstum in unterschiedlichen Besatzdichten, entwickelte und verglich neue aquaponische Subsysteme und designte eine Modellfarm um wirtschaftliche Berechnungen durchzuführen. Die kommerzielle Bedeutung und Anwendbarkeit der Ergebnisse wurde bewertet und diskutiert.

In einem Fischwachstumsexperiment konnte festgesellt werden, dass Fische ein homogeneres Wachstum bei geringeren Besatzdichten aufweisen, was ein besseres Wachstum nach sich zog. Geringere Besatzdichten würden jedoch in den teuren RAS-Anlagen zu einer höchst unprofitablen Produktion führen und sollten daher nicht angewendet werden. Max. Besatzdichten von 450 kg/m³ sorgen für eine bessere Aufteilung der Fixkosten und sollten für eine rentable Produktion als Minimum angestrebt werden.

Zwei in der Aquaponik unbekannte oder neue hydroponische Subsysteme wurden auf ihre aquaponische Eignung hin untersucht. Das DRF System konnte bei hohen Wassertemperaturen über 30 °C deutlich bessere Wachstumsleistungen zeigen als die herkömmlichen Systeme. Aufgrund der klimatischen Verhältnisse treten diese hohen Wassertemperaturen aber nicht häufig genug auf, als dass das DRF System für eine kommerzielle Anwendung in Deutschland infrage kommen könnte. Das System wäre für die Sommerzucht in heimischen oder semi-kommerziellen nicht akklimatisierten Gewächshäusern geeignet.

Die Aeroponik hat in ihrer ersten aquaponischen Anwendung bewiesen, dass sie mit über 40% mehr feuchten und 50% mehr trockenen Basilikum Blattmasse als in einem herkömmlichen DWC-Floßsystem, ein hocheffizientes Anbausystem ist, welches sich zur kommerziellen Anwendung eignet. Ein Aero-System mit feinen Sprühdüsen und Filtersystem erfordert höhere Investitionskosten als DWC oder NFT, welche sich bei Gewächshäusern von 1 000 m² durch deutlich höhere Erträge spätestens im zweiten Jahr amortisieren. Für Aeroponik bedarf es weiterer Forschung bezüglich verschiedener Fisch-Pflanzen Kombinationen und Filter-Düsentechnik.

Die Integration einer Hydroponik in ein existierendes rezirkulierendes Aquakultursystem (RAS) kann zusätzliche Einkünfte generieren und durch verbesserte Kundenwahrnehmung der aquaponischen

Produkte zu Preisaufschlägen von Fisch und Pflanzen führen. Die Integration einer Aquakultur bringt aber auch die Aufgabe mit sich, mit hohem Kapitalaufwand und Knowhow aus diversen Wirtschaftsdisziplinen ein völlig neues Betriebsfeld zu erschließen. Kommerzielle, großskalige Betriebe sollten sich auf die Vermarktung im Lebensmitteleinzelhandel konzentrieren, während kleinskalige, semikommerzielle Betriebe den Fokus auf die Direktvermarktung legen sollten. Unabhängig von der Größe ist eine Diversifizierung wichtig und zudem sollte den Kunden beim Einkauf eine umfangreiche Customer Experience geboten werden. Die wirtschaftlichen Interessen der Produktions- und Umsatzmaximierung durch hohe Besatzdichten und Wachstumsraten müssen zudem mit den biochemischen Möglichkeiten der Anlage im Einklang stehen. Obwohl das FischGlasHaus der Universität Rostock einen wichtigen aquaponischen Forschungsstandort darstellt, ist eine aquaponische Wirtschaft im Jahr 2022 in Mecklenburg-Vorpommern nicht existent. Bei vielen Aquaponikanlagen stellt die Fischzucht den unrentablen Produktionsabschnitt dar. Auch in Mecklenburg-Vorpommern haben die für Aquaponik infrage kommenden Clarias-RAS Probleme wirtschaftlich nachhaltig zu produzieren.

Bei der Initialisierung der Clarias-Wirtschaft in Deutschland wurde die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Anlagen an staatliche Förderungen der Bioenergie gekoppelt, anstatt Strategien für eine selbstständig profitable Fischproduktion zu entwickeln. Ohne vernünftige Vermarktungsstrategien führte die schnelle Ausweitung der Produktion bei diesem Nischenprodukt ohne entsprechende Nachfrage zu einem starken Preisverfall und einer sehr unwirtschaftlichen Produktion. Da der Verkaufspreis in den Folgejahren bis heute nicht nachhaltig ansteigen konnte, haben erste Anlagen ihren Betrieb eingestellt oder stark heruntergefahren. Da die Anlagen durch Europäische und staatliche Fördermittel mitfinanziert wurden, warten diese eine zehnjährige Frist ab, bevor sie die Produktion ganz einstellen. Durch die EEG Novellen wurden und werden außerdem Förderungen der Bioenergie gekürzt oder teilweise ganz gestrichen, wodurch das ehemalige Konzept nicht mehr aufgeht. Die Clarias-Wirtschaft ist demnach schwer angeschlagen und leidet auch 2022 an den niedrigen Verkaufspreisen und fehlendem Willen zur Zusammenarbeit der beteiligten Wirtschaftsakteure.

Obwohl sich die Branche aufgrund der Verluste im Abbau befindet, stellt gerade der stark unterbewertete Verkaufspreis auch das größte Potential der Branche dar. Bei Anwendung der richtigen Maßnahmen können die Chancen der Branche genutzt und das vorhandene Potential durch eine höhere Nachfrage und steigende Preise entfaltet werden. Zu den wichtigsten Maßnahmen zählen bessere Vermarktungsstrategien um den Clarias im Bewusstsein der Konsumenten verankern und die Nachfrage und damit den Verkaufspreis zu erhöhen. Betriebsintern müssen die Produkte zu höheren Veredlungsstufen verarbeitet werden, da in der Verarbeitung mit großem Abstand der größte Teil der Wertschöpfung in der Lebensmittelindustrie stattfindet und diese im eigenen Unternehmen stattfinden sollte. Durch größere Absatzmengen an Lebensmitteleinzelhandel und Endverbraucher wird weiteres Potential entfaltet. Die Bildung eines Netzwerks bringt eine Vielzahl an Vorteilen mit sich und setzt Synergien frei. Zu den nennenswertesten zählen gemeinsame Verträge mit Lieferanten und Abnehmern, Teilung von Knowhow und Ressourcen und gemeinsame Produktion- und Absatzplanung zur Preisregulierung. Des Weiteren kann gemeinsam in Vermarktungskampagnen zur Erhöhung der Nachfrage investiert werden und ein gemeinsames Futterwerk, in dem die wertvollen Karkassen wiederverwendet werden, errichtet werden.

Trotz der wirtschaftlichen Probleme, mit denen RAS- und Aquaponik-Pioniere in Mecklenburg-Vorpommern zu kämpfen haben, wird sich die Relevanz dieser nachhaltigen und regionalen Lebensmittelproduktionsmethoden weiter erhöhen. Vor dem Hintergrund steigender Dünge- und Futtermittelpreise und -knappheit, möglichen Versorgungsengpässen, geringen Niederschlägen und Ernteausfällen und steigenden Fischpreisen, bieten beide Technologien Lösungsansätze für die

aufkommenden Probleme der nächsten Generationen. Auch wenn erste Projekte wirtschaftlich unerfolgreich waren, kann die intensive Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft zu besseren Technologien und Managemententscheidungen führen und dazu beitragen, wirtschaftlich- und ökologisch nachhaltige Lebensmittel durch diese Technologien in Mecklenburg-Vorpommern zu produzieren.

6.5. Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, der Clarias-RAS und Aquaponik mit aktuellen Forschungsergebnissen konkrete Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Bezüglich aller Forschungsbereiche haben die neuen Erkenntnisse auch neue Fragen aufgeworfen.

Das Besatzdichtenexperiment hat gezeigt, dass hohe Besatzdichten zu heterogenerem Wachstum geführt haben, was in schlechterem Wachstum resultierte, aber in RAS geringe Besatzdichten aufgrund der reduzierten Produktivität keine Option sind. Die offenen Fragen dieses Forschungsfeldes bestehen darin, die besten Sortierzeitpunkte zu finden, so dass höchstmöglichen Besatzdichten keine Einbußen bezüglich des Wachstums erleiden. Die aktuelle Praxis der Züchter sieht vor, die 12 g Setzlinge auf 100-300 g heranwachsen zu lassen, eine Sortierung vorzunehmen und die Fische anschließend zur Schlachtreife auswachsen zu lassen. Die Ergebnisse aus Pasch et al. (2022, eingereicht) und Baßmann et al. (2022 in Bearbeitung) weisen jedoch darauf hin, dass in dieser langen adulten Wachstumsphase ohne Sortierung Wachstumseinbußen in den hohen Besatzdichten wahrscheinlich sind. Van de Nieuwegiessen et al. (2009) hat durch eine Sortierung in homogene Größenklassen bei ca. 1 kg erreicht, dass die Fische bis zu ca. 1,5 kg keine signifikanten Verschlechterungen mehr vorweisen. Da diese Sortierung in der Praxis mit den schweren Fischen jedoch zu Mehraufwand und Kosten führt, sollte Wissenschaft und Betriebe zusammen eine praktikable, aber bezahlbare Sortiermaschine entwickeln. Die Herausforderung besteht dabei darin, dass die Fische in Verhältnis zum Körper unproportional große Köpfe haben, was sie Sortierung in korrekte Größenklassen erschwert, und bei der Sortierung nicht die sensible, schuppenlose Haut der Raubwelse verletzt wird.

Das DRF System hat sich aufgrund des Mehraufwands bei Aufbau und Betrieb gegenüber herkömmlichen DWC Systemen als aktuell nicht kommerziell relevant in nördlichen Klimazonen erwiesen. Das DRF System hat mehrfach bewiesen, dass es bei hohen Wassertemperaturen über 30 °C eine deutlich bessere Wachstumsleistung als die aktuell meistverwendeten NFT und DWC Systeme, durch die Aufrechterhaltung der Wurzelaktivität aufweist. Die Kombination der besseren Performance bei hohen Temperaturen (Kao & Hsiang, 1991) und die Fähigkeit zur Energiereduktion (Silva et al., 2015, 2018) könnten diese Anbautechnik vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und stark steigenden Energiepreise in nicht allzu ferner Zukunft in vielen Teilen Europas zu einem relevanten Anbausystem werden lassen.

Das Aeroponiksystem hat sich aufgrund der herausragenden Wachstumsergebnisse von Basilikum als geeignetes Pflanzenanbausystem für die kommerzielle aquaponische Anwendung herausgestellt. Da dies der erste wissenschaftliche Versuch war, in dem die Aeroponik in der Aquaponik angewendet wurde, bestehen viele offene Fragestellungen hinsichtlich des Systemdesigns bei kommerzieller Anwendung. Da das Fischprozesswasser in der Regel nicht vollständig frei von Schwebstoffen von der Aquakultur zur Aquaponik zirkuliert, muss mindestens eine extra Filterstufe zwischengeschaltet werden, damit sich die feinen Düsen der Aeroponik-Technik nicht zusetzen. Die richtige Kombination aus ökonomisch plausibler Filter- und Düsenteknik zu finden, stellt eine Aufgabe der aquaponischen Aeroponikforschung dar. Weitere Forschung sollte die richtige Kombination aus Druck, Düsen und damit Tröpfchengröße, Vernebelungsintervallen und Wurzelraumvolumen herausfinden, da all diese Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Wachstumsleistung der Pflanzen haben (Salachas et al., 2015; Li et al., 2018). Die Aeroponik

eignet sich besonders für Pflanzen, deren Wurzeln als Endprodukt geerntet werden, wie Kartoffeln, Süßkartoffeln oder Ingwer, wird aber auch zunehmend für den Anbau zahlreicher Gemüsekulturen wie Salat, Tomaten und Kräuter eingesetzt. Bemessen an den Verkaufspreisen sollten als kommerziell interessante Arten Ingwer und weitere Kräuter in der aquaponischen Aeroponik untersucht werden. Zudem sollte die Aeroponik mit hochpreisiger gehandelten aquatischen Organismen getestet werden, welche eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, die Aquakultur des Aquaponikbetriebes rentabel gestalten zu können.

Bezüglich der Clarias-RAS besteht das größte Verbesserungspotential in der Erhöhung der Verkaufspreise. Die Unternehmen sollten mithilfe von Dienstleistern oder in der Zusammenarbeit mit Wirtschafts- und Marketinginstituten konkrete Marketingstrategien entwickeln, die auf eine nachhaltige Erhöhung der Nachfrage und damit der Verkaufspreise abzielen. Die Forschung sollte neben der Verbesserung der Jungtierzucht und Wasseraufbereitungstechniken, zusammen mit der Politik dabei helfen, die übriggebliebenen Produzenten an einen Tisch zu bringen und eine Erzeugergemeinschaft aufzubauen.

7. Literaturverzeichnis

- Aachen Eden (2022). Urbane Landwirtschaft mitten in Aachen. Online verfügbar: <https://aachen-eden.de/> (Zugriff am 14 März 2022).
- Adler, P. R., Harper, J. K., & Wade, E. M. (2000). Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *Int. J. Recirculating. Aquac.*, 1(15):15–34.
- Agriloops (2022). Communiqué de Presse. Online verfügbar: <https://www.agriloops.com/media> (Zugriff am 14.03.2022).
- Ahmed, E. A., Hassan, E. A., El Tobgy, K. M. K., & Ramadan, E. M. (2014). Evaluation of rhizobacteria of some medicinal plants for plant growth promotion and biological control. *Annals of Agricultural Sciences*, 59(2), 273-280.
- Aich, N., Nama, S., Biswal, A., & Paul, T. (2020). A review on recirculating aquaculture systems: Challenges and opportunities for sustainable aquaculture. *Innovative Farming*, 5(1), 017-024.
- Aixponic (2022). Erzeugung von Nahrungsmitteln neu definiert. Online verfügbar: <https://www.aixponic.de/index.php#home> (Zugriff am 14 März 2022).
- Al-Hafedh, Y.S., & Ali, S.A., (2004). Effects of feeding on survival, cannibalism, growth and feed conversion of African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell) in concrete tanks. *J. Appl. Ichthyol.*, 20, 225–227.
- Al-Maskari, M. Y., Hanif, M. A., Al-Maskri, A. Y., & Al-Adawi, S. (2012). Basil: A natural source of antioxidants and nutraceuticals. In *Natural Products and Their Active Compounds on Disease Prevention* (pp. 463-471). Nova Science Publishers, Inc..
- Anene, A. (2005). Condition factor of four Cichlid species of a man-made lake in Imo State, Southeastern Nigeria. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 5(1).
- Aquaculture ID (2022). Introduction to African catfish. Online verfügbar: <https://www.aquacultureid.com/african-catfish/> (Zugriff am 11. März 2022).
- Aquakulturinfo (2022). Wels, Afrikanischer Raubwels. Online verfügbar: <https://www.aquakulturinfo.de/wels-afrikanischer-raubwels> (Zugriff am 11. März 2022).
- Arbeitsagentur (2022). Arbeitslosenquote & Arbeitslosenzahlen 2022. Online verfügbar: <https://www.arbeitsagentur.de/news/arbeitsmarkt-2022> (Zugriff am 13 März 2022).
- Arndt, G. M. (Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Asche, F., Guttormsen, A. G., & Nielsen, R. (2013). Future challenges for the maturing Norwegian salmon aquaculture industry: An analysis of total factor productivity change from 1996 to 2008. *Aquaculture*, 396, 43-50.
- Asche, F., Roll, K. H., & Tveteras, R. (2009). Economic inefficiency and environmental impact: An application to aquaculture production. *Journal of Environmental Economics and Management*, 58(1), 93-105.
- Attramadal, K. J., Øie, G., Størseth, T. R., Alver, M. O., Vadstein, O., & Olsen, Y. (2012). The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae. *Aquaculture*, 330, 121-129.
- AUF Uni-Rostock (2022). Das FischGlasHaus - kombinierte Produktion von Fisch und Pflanze: Wie funktioniert das?. Online verfügbar: <https://www.auf.uni-rostock.de/fakultaet/ueber-uns/veranstaltungen/lange-nacht-der-wissenschaften/standpunkt-fischglashaus/> (Zugriff am 13 März 2022).

- Azaza, M. S., Assad, A., Maghrbi, W., & El-Cafsi, M. (2013). The effects of rearing density on growth, size heterogeneity and inter-individual variation of feed intake in monosex male Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. *Animal*, 7(11), 1865-1874.
- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P., & Mendiola, D. (2018). Energy use in recirculating aquaculture systems (RAS): a review. *Aquacultural Engineering*, 81, 57-70.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Baganz, G., Baganz, D., Staaks, G., Monsees, H., & Kloas, W. (2020). Profitability of multi-loop aquaponics: Year-long production data, economic scenarios and a comprehensive model case. *Aquaculture Research*, 51(7), 2711-2724.
- Bailey, D. S., Rakocy, J. E., Cole, W. M., Shultz, K. A., & St Croix, U. (1997). *Economic analysis of a commercial-scale aquaponic system for the production of tilapia and lettuce*. In: Tilapia aquaculture: proceedings of the fourth international symposium on Tilapia in aquaculture, Orlando, Florida, pp 603–612.
- Baker, A. A. C. (2010). *Preliminary development and evaluation of an aquaponic system for the American Insular Pacific*. PhD thesis, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, USA.
- Baldwin, L. (2011). The effects of stocking density on fish welfare. *Plymouth Student Sci.*, 04, 372–383.
- Barak, P., Smith, J. D., Krueger, A. R., & Peterson, L. A. (1996). Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. *Plant, Cell & Environment*, 19(2), 237-242.
- Barton, B. (2002). Stress in fishes: a diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids. *Integr. Comp. Biol.*, 42, 517–525.
- Baßmann, B., Brenner, M., & Palm, H. W. (2017). Stress and welfare of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a coupled aquaponic system. *Water*, 9(7), 504.
- Baßmann, B., Harbach, H., Weißbach, S., & Palm, H. W. (2020). Effect of plant density in coupled aquaponics on the welfare status of African catfish, *Clarias gariepinus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(1), 183-199.
- Baßmann, B., Wenzel, L., Hahn, L., & Palm, H. W. (2022). Effects of Stocking Density, Developmental Stage, and Wrecking Noise on Growth and Welfare of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a Commercial RAS. In Bearbeitung.
- Beaman, A. R., Gladon, R. J., & Schrader, J. A. (2009). Sweet basil requires an irradiance of 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for greatest edible biomass production. *HortScience*, 44(1), 64-67.
- Beaman, A.R. (2008). Irradiance, Total Nitrogen, and Nitrate-N: Ammonium-N Ratio Requirements for Optimal Edible Biomass Production of Basil. Master's Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA.
- Benjamin, E. O., Buchenrieder, G. R., & Sauer, J. (2021). Economics of small-scale aquaponics system in West Africa: A SANFU case study. *Aquaculture economics & management*, 25(1), 53-69.
- Benker, H. (2014). Excel in der Wirtschaftsmathematik. In Excel in der Wirtschaftsmathematik, 1st ed.; Springer: Wiesbaden, Germany; Volume 1, pp. 93–97. ISBN: 978-3-658-00765-2
- Bione, M.A.A.; Paz, V.P.S.; da Silva, F.; Sartoratto, A.; Soares, T.M. (2014, April). Production of hydroponic basil essential oil with conventional nutrient solution in brackish waters and organic nutrient solution. In Proceedings of the II Inovagri International Meeting, Fortaleza, Brazil, 13–16 April 2014; pp. 438–448.
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B., & Kómvés, T. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, 2(2), 17-20.

- BMEL (2009). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2007*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2009; p. 43.
- BMEL (2010). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2008*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2010; p. 43.
- BMEL (2011). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2009*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2011; p. 44.
- BMEL (2012). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2010*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2012; p. 55.
- BMEL (2013). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2011*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2013; p. 49.
- BMEL (2014). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2012*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2014; p. 51.
- BMEL (2015). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2013*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2015; p. 52.
- BMEL (2016). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2014*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2016; p. 49.
- BMEL (2017). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2015*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2017; p. 50.
- BMEL (2018). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2016*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2018; p. 53.
- BMEL (2019). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2017*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2019; p. 57.
- BMEL (2020). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2018*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2020; p. 58.
- BMEL (2021). *Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2019*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany, 2021; p. 61.
- BMEL-Statistik (2020). Rückgang des Fischverbrauchs im Jahr 2020. Online verfügbar: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/fisch> (Zugriff am 11. März 2022).
- BMWI (2021). Kraft-Wärme-Kopplung. Online verfügbar: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/moderne-kraftwerkstechnologien.html> (Zugriff am 27 Oktober 2021).
- Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., & Yin, Y. (2017). The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering*, 78, 146-154.
- Bovendeur, J., Eding, E. H., & Henken, A. M. (1987). Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*, 63, 329–353.
- Bregnballe, J. (2010). A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Eurofish International Organisation; Copenhagen, Denmark.
- Britz, P. J., & Hecht, T. (1987). Temperature preferences and optimum temperature for growth of African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*) larvae and postlarvae. *Aquaculture*, 63(1-4), 205-214.
- Buckseth, T., Sharma, A. K., Pandey, K. K., Singh, B. P., & Muthuraj, R. (2016). Methods of pre-basic seed potato production with special reference to aeroponics – A review. *Scientia horticulturae*, 204, 79-87.

- Bündnis 90/Die Grünen (2021). Grünes Wahlprogramm zur Bundestagswahl 2021. Online verfügbar: <https://www.gruene.de/artikel/wahlprogramm-zur-bundestagswahl-2021> (Zugriff am 26 November 2021).
- Calabrese, S., Nilsen, T. O., Kolarevic, J., Ebbesson, L. O. E., Pedrosa, C., Fivelstad, S., Hosfeld, C., Stefansson, S. O., Terjesen, B. F., Takle, H., Martins, C. I. M., Sveier, H., Mathisen, F., Imsland, A.K., & Handeland, S. O. (2017). Stocking density limits for post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with emphasis on production performance and welfare. *Aquaculture*, *468*, 363–370.
- Calone, R., Pennisi, G., Morgenstern, R., Sanyé-Mengual, E., Lorleberg, W., Dapprich, P., Winkler, P., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2019). Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics. *Science of the total environment*, *687*, 759-767.
- Chalchat, J. C., & Özcan, M. M. (2008). Comparative essential oil composition of flowers, leaves and stems of basil (*Ocimum basilicum* L.) used as herb. *Food Chemistry*, *110*(2), 501-503.
- Chang, D. C., Park, C. S., Kim, S. Y., & Lee, Y. B. (2012). Growth and tuberization of hydroponically grown potatoes. *Potato research*, *55*(1), 69-81.
- Chen, S., Stechey, D., & Malone, R. F. (1994). Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. *Developments in aquaculture and fisheries science*, *27*, 61-61.
- Chen, Z., Chang, Z., Qiao, L., Wang, J., Yang, L., Liu, Y., Zong, X., & Li, J. (2021). Nitrogen removal performance and microbial diversity of bioreactor packed with cellulosic carriers in recirculating aquaculture system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *157*, 105157.
- Clawson, J. M., Hoehn, A., Stodieck, L. S., Todd, P., & Stoner, R. J. (2000). *Re-Examining Aeroponics for Spaceflight Plant Growth*; SAE Technical Paper 2000-01-2507; SAE: Toulouse, France, 2000; p. 9.
- Conte, F. S. (2004). Stress and the welfare of cultured fish. *Applied Animal Behaviour Science*, *86*(3-4), 205-223.
- Cooper, A. (1979) *The ABC of NFT. Nutrient Film Technique*; Grower Books: London, UK, p. 181.
- Coppens (2021a). Catfish 2021 – 2022. Online verfügbar: https://static.alltechcoppens.com/assets/DE_CATFISH_2021.pdf?mtime=20210209101004&focal=none (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Coppens (2022b). RAS-Zucht von Welsen – Ein Blick hinter die Kulissen. Online verfügbar: <https://www.alltechcoppens.com/de/aktuelles/farming-catfish-in-ras> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Couturier, M., Trofimencoff, T., Buil, J. U., & Conroy, J. (2009). Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. *Aquacultural Engineering*, *41*(2), 71-77.
- Crustanova (2022). Superior Crustanova Seafood. Online verfügbar: <https://www.crustanova.com/meeresfruechte/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Dai, W., Wang, X., Guo, Y., Wang, Q., & Ma, J., (2011). Growth performance, hematological and biochemical responses of African catfish (*Clarias gariepinus*) reared at different stocking densities. *African J. Agric. Res.*, *6*, 6177–6182.
- de Graaf, G. & Janssen, H., (1996). Artificial reproduction and pond rearing of the African catfish *Clarias gariepinus* in sub-Saharan Africa - A handbook. FAO Fisheries Technical Paper. No. 362. Rome, FAO. 73 p.
- De Ionno, P. N., Wines, G. L., Jones, P. L., & Collins, R. O. (2006). A bioeconomic evaluation of a commercial scale recirculating finfish growout system—An Australian perspective. *Aquaculture*, *259*(1-4), 315-327.
- De Moor, I. J., & Bruton, M. N. (1988). *Atlas of alien and translocated indigenous aquatic animals in southern Africa*. South African Scientific Programmes Report 144, Port Elizabeth; p. 310.

- Degani, G., Ben-Zvi, Y., Levanon, D. (1988). The relationship between body size and growth of African catfish (*Clarias gariepinus*) (Burchell, 1922) fed practical diet. *Indian J. Fish.*, 35, 207–210.
- Destatis (2013). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2012*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2013; p. 48.
- Destatis (2014). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2013*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2014; p. 49.
- Destatis (2015). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2014*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2015; p. 85.
- Destatis (2016). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2015*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2016; 28 Excel Sheets.
- Destatis (2017). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2016*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2017; p. 54.
- Destatis (2018). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2017*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2018; p. 86.
- Destatis (2019). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2018*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2019; p. 54.
- Destatis (2020). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2019*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2020; p. 56.
- Destatis (2021). *Land und Forstwirtschaft, Fischerei. Erzeugung in Aquakulturbetrieben 2020*; Deutsches Statistisches Bundesamt (Destatis): Wiesbaden, Germany, 2021; p. 85.
- Deutsche Edelfisch (2022). Deutsche Edelfisch – Megatrend Aquakultur. Online verfügbar: <https://www.edelfisch.eu/index.php/home.html> (Zugriff am 13 März 2022).
- Deutschlandfunk (2019). Bürokratische Hürden für Garnelen von der Ostsee. Online verfügbar: <https://www.deutschlandfunkkultur.de/eu-foerderung-buerokratische-huerden-fuer-garnelen-vonder-100.html> (Zugriff am 13 März 2022).
- DGB (2021). Mindestlohn 2022: Was ändert sich?. Online verfügbar: <https://www.dgb.de/themen/++co++6ca263de-fb0e-11e9-bdcf-52540088cada> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Diana, J. S. (2009). Aquaculture production and biodiversity conservation. *Bioscience*, 59(1), 27-38.
- Diatin, I., Shafruddin, D., Hude, N., Sholihah, M. A., & Mutsmir, I. (2021). Production performance and financial feasibility analysis of farming catfish (*Clarias gariepinus*) utilizing water exchange system, aquaponic, and biofloc technology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(5), 344-351.
- Dienstleistungsportal MV (2021). Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP). Online verfügbar: https://www.service.m-v.de/foerderfibel/?sa.fofifoerderung.foerderung_id=24&sa.fofi.kategorie_id=1 (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Dou, H., Niu, G., & Gu, M. (2019). Pre-harvest UV-B radiation and photosynthetic photon flux density interactively affect plant photosynthesis, growth, and secondary metabolites accumulation in basil (*Ocimum basilicum*) plants. *Agronomy*, 9(8), 434.
- Dunwoody, R. K. (2013). Aquaponics and Hydroponics: The Effects of Nutrient Source and Hydroponic Subsystem Design on Sweet Basil Production. Master's Thesis, University of Central Missouri, Warrensburg, MO, USA, 2013.
- Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2012). Recirculating aquaculture systems. In *Aquaculture production systems*; Cayuga Aqua Ventures, LLC: Freeville, USA ; pp. 245-277.

- ECF Farm (2022). Hauptstadt Barsch + Basilikum. Online verfügbar: <https://www.ecf-farm.de/> Zugriff am 13 März 2022).
- ECF Farmsystems (2022). Planung, Bau & Betrieb. Online verfügbar: <https://www.ecf-farmsystems.com/planungbaubetrieb> (Zugriff am 14 März 2022).
- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient cycling in aquaponics systems. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 231-246.
- Eck, M., Sare, A. R., Massart, S., Schmutz, Z., Junge, R., Smits, T. H., & Jijakli, M. H. (2019). Exploring bacterial communities in aquaponic systems. *Water*, 11(2), 260.
- Ekawati, A. W., Ulfa, S. M., Dewi, C. S. U., Amin, A. A., Salamah, L. N. M., Yanuar, A. T., & Kurniawan, A. (2021). Analysis of aquaponic-recirculation aquaculture system (A-Ras) application in the catfish (*Clarias gariepinus*) aquaculture in Indonesia. *Aquaculture Studies*, 21(3), 93-100.
- Ekren, S., Sönmez, Ç., Özçakal, E., Kurttaş, Y. S. K., Bayram, E., & Gürgülü, H. (2012). The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agricultural water management*, 109, 155-161.
- Elansary, H. O., Yessoufou, K., Shokralla, S., Mahmoud, E. A., & Skalicka-Woźniak, K. (2016). Enhancing mint and basil oil composition and antibacterial activity using seaweed extracts. *Industrial Crops and Products*, 92, 50-56.
- Elhindi, K. M., El-Din, A. S., & Elgorban, A. M. (2017). The impact of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating salt-induced adverse effects in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Saudi journal of biological sciences*, 24(1), 170-179.
- Ellis, T., James, J. D., & Scott, A. P. (2005). Branchial release of free cortisol and melatonin by rainbow trout. *J. Fish Biol.*, 67, 535-540.
- El-Sayed, A. F. M., Dickson, M. W., & El-Naggar, G. O. (2015). Value chain analysis of the aquaculture feed sector in Egypt. *Aquaculture*, 437, 92-101.
- Endut, A., Lananan, F., Abdul Hamid, S. H., Jusoh, A., & Wan Nik, W. N. (2016). Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 57(60), 29531-29540.
- Eng, C. T., Paw, J. N., & Guarin, F. Y. (1989). The environmental impact of aquaculture and the effects of pollution on coastal aquaculture development in Southeast Asia. *Marine pollution bulletin*, 20(7), 335-343.
- Engle, C. R. (2015). Economics of aquaponics. SRAC Publication - Southern Regional Aquaculture Center. No.5006. 15 Feb 2018.
- Engle, C. R., Kumar, G., & van Senten, J. (2020). Cost drivers and profitability of US pond, raceway, and RAS aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(4), 847-873.
- Engle, C.R. (2016). *Economics of Aquaponics*, SRAC-5006; Oklahoma State University: Stillwater, OK, USA; p. 4.
- English, L. (2015). *Economic feasibility of aquaponics in Arkansas*. University of Arkansas. Master's Thesis, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, USA.
- Ernährung MV (2022). Wir schaffen Verbindungen. Online verfügbar: <https://www.mv-ernaehrung.de/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Espinal, C. A., & Matulić, D. (2019). Recirculating aquaculture technologies. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 35-76.

- Espinosa-Moya, A., Álvarez-González, A., Albertos-Alpuche, P., Guzmán-Mendoza, R., & Martínez-Yáñez, R. (2018). Growth and development of herbaceous plants in aquaponic systems. *Acta universitatis, 28*(2), 1-8.
- EU Parlament (2021). Aquakulturproduktion in der EU. Online verfügbar: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/120/aquakulturproduktion-in-der-eu> (Zugriff am 11. März 2022).
- EUMOFA (2020). *Recirculating Aquaculture Systems*; European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products (EUMOFA), European Commission; Publications Office of the European Union: Luxembourg; p. 45.
- EUMOFA (2021). *Case Study, Portion Trout in the EU, Price Structure in the Supply Chain*; European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products (EUMOFA), European Commission; Publications Office of the European Union: Luxembourg; p. 58.
- European Commission (2013). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Strategic Guidelines for the Sustainable Development of EU Aquaculture; Brussels, Belgium..
- European Commission (2021a). European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund (EMFAF). https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/funding/emfaf_en (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- European Commission (2021b). *European Green Deal: Commission Adopts Strategic Guidelines for Sustainable and Competitive EU Aquaculture*; European Commission: Brussels, Belgium, 2021; p. 2.
- European Commission (2021c). European Maritime and Fisheries Fund (EMFF). Online verfügbar: https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/funding/european-maritime-and-fisheries-fund-emff_en (Zugriff am 27 Oktober 2021).
- Eurostat (2019). AQUACULTURE in the EU. Online verfügbar: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20191015-2> (Zugriff am 11. März 2022).
- FAO (1988). Definition of aquaculture. Seventh Session of the IPFC Working Party of Experts on Aquaculture, IPFC/WPA/WPZ, p.1-3, RAPA/FAO, Bangkok.
- FAO (1996). *FAO Fisheries Technical Paper. No. 362*. FAO; Rome, Italy, 1996.
- FAO (2015). *A Guide to Recirculation Aquaculture*; The FAO Sub-regional Office for Central and Eastern Europe: Budapest, Ungarn; p. 100.
- FAO (2020a). *The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2020. Sustainability in Action*; FAO: Rome, Italy; p. 206. [Google Scholar]
- FAO (2020b). *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). Online verfügbar: <http://www.fao.org/fishery/species/2982/en> (Zugriff am 16 Dezember 2020).
- FAO (2021a). *FishStatJ v4.01.1 (October 2021)*; FAO: Rome, Italy.
- FAO (2021b). *Sander lucioperca* (Linnaeus 1758) [PERCIDAE]. Online verfügbar: https://www.fao.org/fishery/en/culturedspecies/Sander_lucioperca/en (Zugriff am 27 Oktober 2021).
- FAO (2021c). *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). Online verfügbar: https://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Clarias_gariepinus/en (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Farran, I., & Mingo-Castel, A. M. (2006). Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research, 83*(1), 47-53.
- Fatollahi, M., & Kasumyan, A. O. (2006). The study of sensory bases of the feeding behavior of the African catfish *Clarias gariepinus* (Clariidae, Siluriformes). *Journal of Ichthyology, 46*(2), 161-172.
- Ferme Integrale (2022). Investir dans l'aquaponie française. Online verfügbar: <https://ferme-integrale.org/investisseurs> (Zugriff am 14 März 2022).

- Ferrarezi, R. S., & Bailey, D. S. (2019). Basil performance evaluation in aquaponics. *HortTechnology*, 29(1), 85-93.
- Figl (2017). Vermarktungsstrategien für den Verkauf von Produkten aus der Aquaponik-Fischzucht im deutschsprachigen Raum aus Herstellersicht. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich.
- Fischmagazin (2012). Mecklenburg: Neue Zuchtanlage für Afrikanische Welse. Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-2271-Mecklenburg+Neue+Zuchtanlage+fuer+Afrikanische+Welse.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- Fischmagazin (2014). Mecklenburg: Erstbesatz für die Garnelen-Farm Grevesmühlen. Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-3405.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- Fischmagazin (2016a). Mecklenburg: Garnelenfarm Fluxx2 meldet Insolvenz an. Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-4320.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- Fischmagazin (2016b). Mecklenburg-Vorpommern: Welsfarm baut eigene Verarbeitungslinie. Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-4016.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- Fischmagazin (2017). Mecklenburg: Erstes Netzwerktreffen "Afrikanischer Wels in Kreislaufanlagen". Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-4574.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- Fischmagazin (2020). Mecklenburg-Vorpommern: Welszüchter investieren fast 2,5 Mio. Euro. Online verfügbar: <https://www.fischmagazin.de/willkommen-seriennummer-5970.htm> (Zugriff am 13 März 2022).
- FishBase (2020). *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). <https://www.fishbase.de/summary/clarias-gariepinus.html> (Zugriff am 11. März 2022).
- Fleuren, W. (2008). Reproductive and grow out management of African catfish in the Netherlands. In *Proceedings of a Workshop on the Development of a Genetic Improvement Program for African catfish Clarias gariepinus*. World Fish Center Conference Proceedings; Accra, Ghana; No. 1889, pp. 73-78.
- Forbes (2019). The Aquaculture Industry: An Ocean Of Investment Opportunity. Online verfügbar: <https://www.forbes.com/sites/michaelhelmstetter/2019/04/04/the-aquaculture-industry-an-ocean-of-investment-opportunity/?sh=2a368db85666> (Zugriff am 11. März 2022).
- Frerichs, C., Daum, D., & Koch, R. (2017). Ammonium toxicity-one cause for growth and quality impairments on organic fertilized basil?. *Journal für Kulturpflanzen*, 69(3), 101-112.
- Frimpong, J. (2021) *Fish & Seafood Report 2021*; Statista: Hamburg; p. 34.
- Gibson, T. F., Watanabe, W. O., Losordo, T. M., Whitehead, R. F., & Carroll, P. M. (2020). Evaluation of chemical polymers as coagulation aids to remove suspended solids from marine finfish recirculating aquaculture system discharge using a geotextile bag. *Aquacultural Engineering*, 90, 102065.
- Goddek, S. (2017). *Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems*. Ph.D Thesis, Wageningen University and Research, Wageningen, The Netherlands.
- Goddek, S., & Keesman, K. J. (2018). The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. *Desalination*, 428, 76-85.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Dos-Santos, M. (2019b). Aquaponics and global food challenges. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 3-17.

- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019a). Decoupled aquaponics systems. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 201-230.
- Google (2022). Aquaponik. Online verfügbar: <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&geo=DE&q=Aquaponic> (Zugriff am 13 März 2022).
- Gornati, R., Papis, E., Rimoldi, S., Terova, G., Saroglia, M., & Bernardini, G. (2004). Rearing density influences the expression of stress-related genes in sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.). *Gene*, *341*, 111–118.
- Graber, A., Antenen, N., & Junge, R. (2014). The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. In *3rd Conference VIVUS, Conference on Agriculture, Environmentalism, Horticulture, Floristics, Food Production and Processing, Strahinj, Slovenia, 14–15 November 2014* (pp. 245-255). Biotehniški center Naklo.
- Greenfeld, A., Becker, N., McIlwain, J., Fotedar, R., & Bornman, J. F. (2019). Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. *Reviews in Aquaculture*, *11*(3), 848-862.
- Grimsrud, K. M., Nielsen, H. M., Navrud, S., & Olesen, I. (2013). Households' willingness-to-pay for improved fish welfare in breeding programs for farmed Atlantic salmon. *Aquaculture*, *372*, 19-27.
- Gunning, D., Maguire, J., & Burnell, G. (2016). The development of sustainable saltwater-based food production systems: a review of established and novel concepts. *Water*, *8*(12), 598.
- Guttormsen, A. G. (2002). Input Factor Substitutability in Salmon Aquaculture. *Mar. Resour. Econ.*, *17*, 91–102.
- Haenning, C. (Sukower Bioenergie und Welsfarm) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Hafsi, C., Debez, A., & Abdelly, C. (2014) Potassium deficiency in plants: Effects and signaling cascades. *Acta Physiol. Plant.*, *36*, 1055–1070.
- Hasan, M. R. (2010). On-farm feeding and feed management in aquaculture. *FAO Aquac. Newsl.*, *45*, 48.
- Haylor, G. S. (1993). Controlled hatchery production of African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell): an overview. *Aquac. Res.*, *24*, 245–252.
- Haylor, G. S., (1991). Controlled hatchery production of *Clarias gariepinus* (Burchell 1822): growth and survival of fry at high stocking density. *Aquac. Res.* *22*, 405–422.
- Hecht, T., & Appelbaum, S., (1988). Observations on intraspecific aggression and coeval sibling cannibalism by larval and juvenile *Clarias gariepinus* (Clariidae: Pisces) under controlled conditions. *J. Zool.*, *214*, 21–44.
- Hecht, T., & Uys, W. (1997). Effect of density on the feeding and aggressive behaviour in juvenile African catfish, *Clarias gariepinus*. *South African Journal of Science*, *93*, 537-541.
- Heidemann, S. (Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Heiderscheidt, E., Tesfamariam, A., Pulkkinen, J., Vielma, J., & Ronkanen, A.-K. (2020). Solids management in freshwater-recirculating aquaculture systems: Effectivity of inorganic and organic coagulants and the impact of operating parameters. *Sci. Total Environ.*, *742*, 140398.
- Hellmann, J., Hörnig, W., Lüpke, M., & Steinhagen, D. (2014). *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Betäuben und Schlachten von Afrikanischen Welsen*. Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover; p. 40.
- Hengsawat, K., Ward, F., & Jaruratjamorn, P. P. (1997). The effect of stocking density on yield, growth and mortality of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell 1822) cultured in cages. *Aquaculture*, *152*, 67–76.

- Hepher, B. (1988). *Nutrition of Pond Fishes*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; p. 388.
- Hikosaka, Y., Kanechi, M., & Uno, Y. (2014). A novel aeroponic technique using dry-fog spray fertigation to grow leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*) with water-saving hydroponics. *A novel aeroponic technique using dry-fog spray fertigation to grow leaf lettuce (Lactuca sativa L. var. crispa) with water-saving hydroponics*, 184-189.
- Hoevenaars, K., Junge, R., Bardocz, T., & Leskovec, M. (2018). EU policies: New opportunities for aquaponics. *Ecocycles*, 4(1), 10-15.
- Hogendoorn, H., & Koops, W. J. (1983). Growth and production of the African catfish, *Clarias lazera* (C. & V.): I. Effects of stocking density, pond size and mixed culture with tilapia (*Sarotherodon niloticus* L.) under extensive field conditions. *Aquaculture*, 34(3-4), 253-263.
- Hogendoorn, H., Jansen, J. A. J., Koops, W. J., Machiels, M. A. M., van Ewijk, P. H., & van Hees, J. P. (1983). Growth and production of the African catfish, *Clarias lazera* (C. & V.): II. Effects of body weight, temperature and feeding level in intensive tank culture. *Aquaculture*, 34, 265-285.
- Holliman, J. B., Adrian, J., & Chappell, J. A. (2008). *Integration of hydroponic tomato and indoor recirculating aquacultural production systems: an economic analysis*. Special Report, Auburn University, Auburn, Alabama, USA.
- Hossain, M. A., Beveridge, M. C., & Haylor, G. S. (1998). The effects of density, light and shelter on the growth and survival of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) fingerlings. *Aquaculture*, 160, 251-258.
- Huisman, E. A., & Richter, C. J. J. (1987). Reproduction, growth, health control and aquacultural potential of the African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*, 63, 1-14.
- Hummel (2020). Wachstum von Minze (*Mentha spicata*) in drei verschiedenen Hydroponik-Subsystemen (DRF, Aeroponik, Fogponik) unter aquaponischer Produktion mit dem Afrikanischen Raubwels (*Clarias gariepinus*). Masterarbeit, Universität Rostock, Rostock, Deutschland.
- Huntingford, F. A., Adams, C., Braithwaite, V. A., Kadri, S., Pottinger, T. G., Sandøe, P., & Turnbull, J. F. (2006). Current issues in fish welfare. *Journal of fish biology*, 68(2), 332-372.
- IBM (2019). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0*; IBM: New York, NY, USA.
- IBM (2020). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0*; IBM: New York, NY, USA.
- Islam, M. S., Rahman, M. M., & Tanaka, M., (2006). Stocking density positively influences the yield and farm profitability in cage aquaculture of sutchi catfish, *Pangasius sutchi*. *J. Appl. Ichthyol.*, 22, 441-445.
- Jannathulla, R., Rajaram, V., Kalanjiam, R., Ambasankar, K., Muralidhar, M., & Dayal, J. S. (2019). Fishmeal availability in the scenarios of climate change: Inevitability of fishmeal replacement in aquafeeds and approaches for the utilization of plant protein sources. *Aquac. Res.*, 50, 3493-3506.
- Janpen, C., Kanthawang, N., Inkham, C., Tsan, F. Y., & Sommano, S. R. (2019). Physiological responses of hydroponically-grown Japanese mint under nutrient deficiency. *PeerJ*, 7, e7751.
- Jiang, W., Tian, X., Li, L., Dong, S., Zhao, K., Li, H., & Cai, Y. (2019). Temporal bacterial community succession during the start-up process of biofilters in a cold-freshwater recirculating aquaculture system. *Bioresour. Technol.*, 287, 121441.
- Jokumsen, A., & Svendsen, L. M. (2010). *Farming of Freshwater Rainbow Trout in Denmark*; DTU Aqua Report no. 219-2010; DTU Aqua, National Institute of Aquatic Resources: Charlottenlund, Denmark; p. 47.
- Jørgensen, E. H., Christiansen, J. S., & Jobling, M. (1993). Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Aquaculture*, 110(2), 191-

- 204.
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B., & Wuertz, S. (2019a). Aquaponics: closing the cycle on limited water, land and nutrient resources. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 19-34.
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S., & Pentz, T. (2019b). Bacterial relationships in aquaponics: new research directions. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 145-161.
- Junge, R., Bulc, T. G., Anseeuw, D., Yildiz, H. Y., & Milliken, S. (2019). Aquaponics as an educational tool. In *Aquaponic Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 561-596.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. H. (2017). Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182.
- Kaiser, H., Weyl, O., & Hecht, T. (1995). The effect of stocking density on growth, survival and agonistic behaviour of African catfish. *Aquaculture International*, 3(3), 217-225.
- Kao, T. C., & Hsiang, T. (1991). *The dynamic root floating hydroponic technique: year-round production of vegetables in roc on Taiwan*. Taipei, Taiwan: ASPAC Food & Fertilizer Technology Center.
- Karls (2022). Karls 1921. Online verfügbar: <https://karls.de/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Kasozi, N., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). Effect of *Bacillus* spp. on lettuce growth and root associated bacterial community in a small-scale aquaponics system. *Agronomy*, 11(5), 947.
- Katzin, D., Marcelis, L. F., & van Mourik, S. (2021). Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 281, 116019.
- Kiani, S., Kujala, K., Pulkkinen, J. T., Aalto, S. L., Suurnäkki, S., Kiuru, T., Tirola, M., Kløve, B., & Ronkanen, A. K. (2020). Enhanced nitrogen removal of low carbon wastewater in denitrification bioreactors by utilizing industrial waste toward circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 254, 119973.
- Kiferle, C., Maggini, R., & Pardossi, A. (2013). Influence of nitrogen nutrition on growth and accumulation of rosmarinic acid in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) grown in hydroponic culture. *Aust. J. Crop Sci.*, 7, 321–327.
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Staaks, G., Suhl, J., Tschirner, M., Wittstock, B., Wuertz, S., Zikova, A., & Rennert, B. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture environment interactions*, 7(2), 179-192.
- Knaus, U. (2016). Wachstum Verschiedener Fisch—und Pflanzenarten und Deren Auswirkungen auf Die Chemisch-Physikalischen Parameter in geschlossenen Warmwasser-Aquaponiksystemen. Doktorarbeit, Universität Rostock, Rostock, Deutschland.
- Knaus, U., & Palm, H. W. (2017b). Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 473, 62–73.
- Knaus, U., & Palm, H.W. (2017a). Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg-Western Pomerania). *Aquaculture*, 466, 51–63.
- Knaus, U., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2018). Significant factors affecting the economic sustainability of closed backyard aquaponics systems. Part IV: autumn herbs and polyponics. *AAAL Bioflux*, 11(6):1760–1775.
- Knaus, U., Pribbernow, M., Xu, L., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2020a). Basil (*Ocimum basilicum*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany. *Sustainability*, 12, 8745.

- Knaus, U., Wenzel, L., Appelbaum, S., & Palm, H. (2020b). Aquaponics (s.l.) Production of Spearmint (*Mentha spicata*) with African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Northern Germany. *Sustainability*, *12*, 8717.
- Knaus, U., Zimmermann, J., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2021). Spearmint (*Mentha spicata*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany. *Sustainability*, *14*(1), 305.
- König, B., Junge, R., Bittsanszky, A., Villarroel, M., & Komives, T. (2016). On the sustainability of aquaponics. *Ecocycles*, *2*(1), 26–32.
- Kotzen, B., & Appelbaum, S. (2010). An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture*, *22*(4), 297–320.
- Kotzen, B., Emerenciano, M. G. C., Moheimani, N., & Burnell, G. M. (2019). Aquaponics: Alternative types and approaches. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 301–330.
- Kozai, T. (2016). Why LED lighting for urban agriculture?. In *LED lighting for urban agriculture*; Springer: Singapore. pp. 3–18.
- Kristan, J., Blecha, M., & Policar, T. (2018). Survival and growth rates of juvenile Grass Carp *Ctenopharyngodon idella* overwintered in ponds and recirculating aquaculture systems including a comparison of production economics. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, *19*, 261–266.
- KTBL (2021a). BauKost-Gewächshäuser. Online verfügbar: <https://www.ktbl.de/webanwendungen/bau-kost-gewaechshaeuser> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- KTBL (2021b). Gemüse im geschützten Anbau (Excel-Datei). Online verfügbar: <https://www.ktbl.de/webanwendungen/gemuese-im-geschuetzten-anbau> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Kumar, G., Engle, C., & Tucker, C. (2016). Costs and Risk of Catfish Split-pond Systems. *J. World Aquac. Soc.*, *47*, 327–340.
- Kumari, R., & Kumar, R. (2019). Aeroponics: A Review on Modern Agriculture Technology. *Indian Farmer*, *6*, 286–292.
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions*, *13*(1), 338–352.
- lbaaf (2020). Trends and issues in aquaculture. Online verfügbar: <http://www.lbaaf.co.nz/aquaculture-economics/trends-and-issues-in-aquaculture/> (Zugriff am 11. März 2022).
- Lekang, O. I., (2020). *Aquaculture Engineering*; 3rd ed. Wiley-Blackwell: New Jersey, USA; p. 544
- Lennard, W. A. (2015). Aquaponics: a nutrient dynamic process and the relationship to fish feeds. *World Aquaculture*, *46*(3), 20–23.
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquac. Int.*, *14*, 539–550.
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: the basics. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 113–144.
- Li, Q., Li, X., Tang, B., & Gu, M. (2018). Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture. *Horticulturae*, *4*, 35.
- Linden, A., & Fenn, J. (2003). Understanding Gartner's hype cycles. *Strategic Analysis Report N^o R-20-1971. Gartner, Inc*, *88*, 1423.
- Linh, N. V., Mai, T. T., Senapin, S., St-Hilaire, S., Rodkhum, C., & Dong, H. T. (2022). Impacts of oxygen and ozone nanobubbles on bacteriophage in aquaculture system. *Aquaculture*, 737894.
- Liu, Y., Rosten, T. W., Henriksen, K., Hognes, E. S., Summerfelt, S., & Vinci, B. (2016). Comparative

- economic performance and carbon footprint of two farming models for producing Atlantic salmon (*Salmo salar*): Land-based closed containment system in freshwater and open net pen in seawater. *Aquacultural Engineering*, 71, 1-12.
- Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V. M., Bermejo, L. A., & Pérez-Urrestarazu, L. (2020). Economic sustainability of small-scale aquaponic systems for food self-production. *Agronomy*, 10(10), 1468.
- López-Millán, A. F., Grusak, M. A., Abadía, A., & Abadía, J. (2013). Iron deficiency in plants: An insight from proteomic approaches. *Front. Plant Sci.*, 4, 254.
- Lorenzen, L. (Garnelen Fram Fraktal) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Losordo, T. M., Masser, M. P., & Rakocy, J. M. (1998). Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations. SRAC Publication 451. Stoneville, MS: Southern Regional Aquaculture Center.
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PloS one*, 9(7), 1-10.
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015a). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74.
- Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015b). Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*, 68, 19-27.
- Lu, J., & Li, X. (2006). Review of rice–fish–farming systems in China—one of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS). *Aquaculture*, 260(1-4), 106-113.
- Lucena, J. J. (2006). Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. In *Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms*; Barton, L. L., Abadia, J., Eds. Springer: Dordrecht, The Netherlands; pp. 103–128.
- Lymbery, P. (2002). In too deep. The Welfare of Intensively Farmed Fish. Godalming.
- Macfadyen, G., Nasr-Alla, A. M., Al-Kenawy, D., Fathi, M., Hebicha, H., Diab, A. M., Mohamed, S., Ramadan, H., Abou-Zeid, M., & El-Naggar, G. (2012). Value-chain analysis—An assessment methodology to estimate Egyptian aquaculture sector performance. *Aquaculture*, 362, 18–27.
- MacIntyre, C. M., Ellis, T., North, B. P., & Turnbull, J. F. (2008). The influences of water quality on the welfare of farmed rainbow trout: a review. *Fish welfare*, 150-184.
- Makri, O., & Kintzios, S. (2008). *Ocimum sp.*(basil): Botany, cultivation, pharmaceutical properties, and biotechnology. *J. Herbs Spices Med. Plants*, 13, 123–150. [Google Scholar] [CrossRef]
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C., Heinsbroek, L. T., Schneider, O., Blancheton, J. P., d'Orbcastel, E. R., & Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural engineering*, 43(3), 83-93.
- Martins, C. I., Aanyu, M., Schrama, J. W., & Verreth, J. A. (2005). Size distribution in African catfish (*Clarias gariepinus*) affects feeding behaviour but not growth. *Aquaculture*, 250, 300–307.
- Martins, C. I., Schrama, J. W., & Verreth, J. A. (2006). The effect of group composition on the welfare of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 97, 323–334.
- Masser, M. P., Rakocy, J., & Losordo, T. M. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. *Management of recirculating systems*. SRAC Publication, 452.
- Matsumoto, S. N., Araujo, G. D. S., & Viana, A. E. S. (2013). Growth of sweet basil depending on nitrogen and potassium doses. *Hortic. Bras.*, 31, 489–493.

- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1-11.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., van Os, E., Anseeuw, D., Van Havermaet, R., & Junge, R. (2019) Chapter 4. Hydroponic Technologies. In *Aquaponic Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 77–110.
- Mbiyu, M. W., Muthoni, J., Kabira, J., Elmar, G., Muchira, C., Pwaipwai, P., Pwaipwai, J., Otieno, S., & Onditi, J. (2012). Use of aeroponics technique for potato (*Solanum tuberosum*) minitubers production in Kenya. *J. Hortic. For.*, 4, 172–177.
- McMurtry, M. R., Nelson, P. V., Sanders, D. C., & Hodges, L. (1990). Sand culture of vegetables using recirculated aquacultural effluents. *Applied Agricultural Research*, 5(4), 280-284.
- McMurtry, M. R., Sanders, D. C., Cure, J. D., Hodson, R. G., Haning, B. C., & Amand, E. S. (1997). Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *Journal of the world aquaculture society*, 28(4), 420-428.
- Mehandru, P., Shekhawat, N. S., Rai, M. K., Kataria, V., & Gehlot, H. S. (2014). Evaluation of aeroponics for clonal propagation of *Caralluma edulis*, *Leptadenia reticulata* and *Tylophora indica*—Three threatened medicinal Asclepiads. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 20, 365–373.
- Menezes, C., Ruiz-Jarabo, I., Martos-Sitcha, J. A., Toni, C., Salbego, J., Becker, A., & Loro, V. L., Martínez-Rodríguez, G., Mancera, J.M., & Baldisserotto, B., (2015). The influence of stocking density and food deprivation in silver catfish (*Rhamdia quelen*): A metabolic and endocrine approach. *Aquaculture*, 435, 257–264.
- Meng, Q., & Runkle, E. S. (2019). Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings. *Sci. Hortic.*, 255, 269–280.
- Mergenthaler, M., & Lorleberg, W. (2016). Voruntersuchung zur Zahlungsbereitschaft für frischen und geräucherten europäischen Wels aus einer Aquaponik-Pilotanlage. *Notizen aus der Forschung Nr. 14: Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachhochschule Südwestfalen; Soest, Deutschland.*
- Merkatz, M. (Nutrition & Food Part of Bioenergie Lüchow GmbH & Co. KG) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Micha (1976). Synthèse des essais de reproduction, d'alevinage et de production chez un silure Africain: *Clarias lazera* Val. Symp. FAO/CPCA on Aquaculture in Africa. Accra, Ghana. *CIFA Tech. Pap.*, 4 (1): 450-473.
- Microsoft® Corporation (2010). *Microsoft Excel®*; Microsoft Corporation: Redmond, WA, USA.
- Microsoft® Corporation (2019). *Microsoft Excel®*; Microsoft Corporation: Redmond, WA, USA.
- Miličić, V., Thorarinsdottir, R., Santos, M. D., & Hančič, M. T. (2017). Commercial aquaponics approaching the European market: to consumers' perceptions of aquaponics products in Europe. *Water*, 9(2), 80.
- Mohammad, T., Moulick, S., & Mukherjee, C. K. (2018). Economic feasibility of goldfish (*Carassius auratus* Linn.) recirculating aquaculture system. *Aquac. Res.*, 49, 2945–2953.
- Montero, D., Izquierdo, M. S., Tort, L., Robaina, L., & Vergara, J. M. (1999). High stocking density produces crowding stress altering some physiological and biochemical parameters in gilthead seabream, *Sparus aurata*, juveniles. *Fish Physiology and Biochemistry*, 20(1), 53-60.
- Morach, B., Witte, B., Walker, D., von Koeller, E., Grosse-Holz, F., Rogg, J., Brigl, M., Dehnert, N., Obloj, P., Koktenturk, & Schulze, U. (2021). Food for Thought: The Protein Transformation. *Ind. Biotechnol.*, 17, 125–133.

- Moran, D. (2010). Carbon dioxide degassing in fresh and saline water. I: Degassing performance of a cascade column. *Aquacultural Engineering*, 43(1), 29-36.
- Morano, G., Amalfitano, C., Sellitto, M., Cuciniello, A., Maiello, R., & Caruso, G. (2017). Effects of nutritive solution electrical conductivity and plant density on growth, yield and quality of sweet basil grown in gullies by subirrigation. *Adv. Hortic. Sci.*, 31, 25–30.
- Morard, P., Lacoste, L., & Silvestre, J. (2000). Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.*, 23, 1063–1078.
- Morgenstern, R., Lorleberg, W., Biernatzki, R., Boelhaue, M., Braun, J., & Haberlah-Korr, V. (2017). *Nachhaltige Aquaponik-Erzeugung für Nordrhein-Westfalen*. Pilotstudie, Fachhochschule Südwestfalen, Soest, Deutschland, p. 100.
- Motta, J. H. D. S., Vidal Júnior, M. V., Glória, L. S., Cruz Neto, M. A., Silveira, L. S. D., & Andrade, D. R. D. (2019). Technical and economic feasibility of food strategies in the hatchery of *Cyprinus carpio* (Cypriniformes, Cyprinidae) in a recirculating aquaculture system. *Latin american journal of aquatic research*, 47(4), 626-637.
- Naegel, L. C. (1977). Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, 10(1), 17-24.
- Narthdata (2022). Hansegarnelen Grevesmühlen GmbH, Grevesmühlen. Online verfügbar: <https://www.northdata.de/HanseGarnelen+Grevesm%C3%BChlen+GmbH> (Zugriff am 13 März 2022).
- NASA (2006). Environmental and Agricultural Resources, progressive plant growing has business blooming. In *NASA Spinoff*; NASA: New York, NY, USA; pp. 64–77.
- NASTAQ (2020). *Nationaler Strategieplan Aquakultur 2021-2030 für Deutschland*; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Bonn, Germany; p. 157.
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551-563.
- Ngoc, P. T. A., Meuwissen, M. P. M., Tru, L. C., Bosma, R. H., Verreth, J., & Lansink, A. O. (2016). Economic feasibility of recirculating aquaculture systems in pangasius farming. *Aquac. Econ. Manag.*, 20, 185–200.
- Nguyen, P. M., Kwee, E. M., Niemeyer, E. D. (2010). Potassium rate alters the antioxidant capacity and phenolic concentration of basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Food Chem.*, 123, 1235–1241.
- Nordkurier (2022). Garnelen aus Anklam gehen in den Handel. Online verfügbar: <https://www.nordkurier.de/anklam/garnelen-aus-anklam-gehen-in-den-handel-1746755801.html> (Zugriff am 13 März 2022).
- Nyonje, B. M., Opiyo, M. A., Orina, P. S., Abwao, J., Wainaina, M., & Charo-Karisa, H. (2018). Current status of freshwater fish hatcheries, broodstock management and fingerling production in the Kenya aquaculture sector. *Livest. Res. Rural. Dev.*, 30, 1–8.
- O'Rourke, P. D. (1996). The economics of recirculating aquaculture systems. In *Proceedings of the 1st International Conference on Recirculating Aquaculture*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Roanoke, VA, USA, 20–23 July 1996; pp. 1–19.
- Oellermann, L. K. (1995). A Comparison of the Aquaculture Potential of *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) and Its Hybrid with *Heterobranchus longifilis* Valenciennes, 1840 in Southern Africa. Ph.D. Thesis, Rhodes University, Makhanda, South Africa.

- Ogunji, J. O., & Awoke, J. (2017). Effect of environmental regulated water temperature variations on survival, growth performance and haematology of African catfish, *Clarias gariepinus*. *Our Nature*, 15(1-2), 26-33.
- Oké, V., & Goosen, N. (2019). The effect of stocking density on profitability of African catfish (*Clarias gariepinus*) culture in extensive pond systems. *Aquaculture*, 507, 385–392.
- Oladimeji, S. A., Okomoda, V. T., Olufeagba, S. O., Solomon, S. G., Abol-Munafi, A. B., Alabi, K. I., Ikhwanuddin, M., Martins, C. O., Umaru, J., & Hassan, A. (2020). Aquaponics production of catfish and pumpkin: Comparison with conventional production systems. *Food Sci. Nutr.*, 8, 2307–2315.
- Oluwalola, O., Fagbenro, O., & Adebayo, O. (2019). Growth and Economic Performances of African Catfish, *Clarias gariepinus* Reared under Different Culture Facilities. *Afr. J. Fish. Aquat. Resour. Manag.*, 4, 75–84.
- Om, A. D., Yusoff, N. H. N., & Jamari, Z. (2020). Evaluation of economics feasibility on marine fish seeds nursed in local backyard re-circulating aquaculture system (RAS). *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*, 8, 288–293.
- Omobepade, B. P., Adebayo, O. T., Amos, T. T., & Adedokun, B. C. (2015). Profitability analysis of aquaculture in ekiti state, Nigeria. *Niger. J. Agric. Food Environ.*, 11, 114–119.
- Palm, H. W., & Bischoff, A. A. (2016). Aquakultur–quo vadis?! Nachhaltige Fischzucht in modernen Produktionssystemen. *Biologie in unserer Zeit*, 46(2), 118-125.
- Palm, H. W., Berchtold, E., Gille, B., Knaus, U., Wenzel, L. C., & Baßmann, B. (2022). Growth and Welfare of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) under dietary supplementation of the mixed layer clay mineral montmorillonite–illite/muscovite (1g557) in commercial aquaculture. *Aquaculture journal*, eingereicht.
- Palm, H. W., Bissa, K., & Knaus, U. (2014a). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems; Part II: Fish and plant growth. *AAFL Bioflux*, 7, 162–175.
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Jijakli, H. M., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture international*, 26(3), 813-842.
- Palm, H. W., Knaus, U., Wasenitz, B., Bischoff, A., & Strauch, S. (2018b). Proportional up scaling of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) commercial recirculating aquaculture systems disproportionately affects nutrient dynamics. *Aquaculture*, 491, 155–168.
- Palm, H. W., Seidemann, R., Wehofsky, S., & Knaus, U. (2014b). Significant factors influencing the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. *AAFL Bioflux*, 7, 20–32.
- Palm, H. W., Strauch, S., Knaus, U., & Wasenitz, B. (2016). Das FischGlasHaus–eine Innovationsinitiative zur energie-und nährstoffeffizienten Produktion unterschiedlicher Fisch-und Pflanzenarten in Mecklenburg-Vorpommern (“Aquaponik in MV”). *Fischerei & Fischmarkt in Mecklenburg-Vorpommern*, 16, 38-47.
- Palm, H. W.; Knaus, U.; Appelbaum, S.; Strauch, S. M.; & Kotzen, B. (2019) Coupled Aquaponics Systems. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 163–199.
- Palm, H.W., Nievel, M., Knaus, & U. (2015). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part III: plant units. *AAFL Bioflux*, 8, 89–106.
- Pantanella, E. (2012). Nutrition and Quality of Aquaponic Systems. Ph.D. Thesis, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italy; pp. 55–77.

- Pantanella, E. (2018). Aquaponics Production, Practices and Opportunities. In *Sustainable Aquaculture, Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future*; Hai, F.I., Visvanathan, C., Boopathy, R., Eds.; Springer: Cham, Switzerland; pp. 191–248.
- Pasch, J. (2018) Einfluss einer Wurzel-Belüftung auf das Wachstum der Marokkanischen Minze (*Mentha spicata* L.) bei drei verschiedenen Hydroponik-Subsystemen unter aquaponischer Produktion. Masterarbeit, Universität Rostock, Rostock, Deutschland.
- Pasch, J., & Palm, H. W. (2021). Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany. *Sustainability*, 13(24), 13569.
- Pasch, J., Appelbaum, S., Knaus, U., Sandmann, P., & Palm, H.W. (2022). Effects of stocking density of African catfish (*Clarias gariepinus*) life stages in RAS on growth performance and profitability. *Aquaculture Research*, eingereicht.
- Pasch, J., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021b). Growth of Basil (*Ocimum basilicum*) in Aeroponics, DRF, and Raft Systems with Effluents of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Decoupled Aquaponics (ss). *AgriEngineering*, 3(3), 559-574.
- Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021a). Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, raft, and grow pipes with effluents of African catfish (*Clarias gariepinus*) in decoupled aquaponics. *AgriEngineering*, 3(1), 92-109.
- Pereira, D. A. S., & Henriques, M. B. (2019). Economic feasibility for producing Imperial Zebra pleco (*Hypancistrus zebra*) in recirculating aquaculture systems: An alternative for a critically endangered ornamental fish. *Aquaculture Economics & Management*, 23(4), 428-448.
- PETA (2014). Aquakultur ist Aqua-Tortur. Online verfügbar: <https://www.peta.de/presse/aquakultur-ist-aqua-tortur-peta-kritisiert-welszucht-in-berggrumbach/> (Zugriff am 12 März 2022).
- Phan-Hui, S. A. (1994). Hydroponic products in Switzerland. *Agrar Forsch.*, 1, 367–370.
- Politik MV (2018). Wirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern. Online verfügbar: <https://politik-mv.de/2018/08/07/wirtschaft-in-mecklenburg-vorpommern/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Pribbernow, M. (Universität Rostock) (2020). Persönliche Kommunikation.
- Putievsky, E., & Galambosi, B. (1999). Production systems of sweet basil. *Basil: the genus Ocimum*, 10, 39-65.
- Quagraine, K. K., Flores, R. M. V., Kim, H. J., & McClain, V. (2018). Economic analysis of aquaponics and hydroponics production in the US Midwest. *Journal of Applied Aquaculture*, 30(1), 1-14.
- Raimondi, G., Orsini, F., Maggio, A., De Pascale, S., & Barbieri, G. (2006). Yield and quality of hydroponically grown sweet basil cultivars. In *Proceedings of the I International Symposium on the Labiatae: Advances in Production, Biotechnology and Utilisation, Sanremo, Italy, 30 November 2006*; pp. 357–360.
- Rakocy, J. E. (2012). Aquaponics: Integrating fish and plant culture. In *Aquaculture Production Systems*; Wiley-Blackwell: Oxford, UK; pp. 344–386.
- Rakocy, J. E. (1988). Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. *Island perspectives (USA)*, 3, 5–10.
- Rakocy, J. E., Bailey, D. S., Shultz, R. C., & Danaher, J. J. (2011). A commercial-scale aquaponic system developed at the University of the Virgin Islands. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Tilapia in Aquaculture*; AquaFish Collaborative Research Support Program; Shanghai, China; pp. 336-343.
- Rakocy, J. E., Bailey, D. S., Shultz, R. C., & Thoman, E. S. (2004). Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In *New Dimensions on Farmed Tilapia, Proceedings of the 6th International*

- Symposium on Tilapia in Aquaculture Philippine International Convention, Manila, Philippines, 12–16 September 2004*; FAO: Rome, Italy; pp. 12–16.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., Losordo, T. M. (2006). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*; SRAC Publication No. 454; Southern Regional Aquaculture Center: Stoneville, MS, USA; 16p.
- Ramin, A. A. (2006). Effects of salinity and temperature on germination and seedling establishment of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *J. Herbs Spices Med. Plants*, 11, 81–90.
- Ranjan, R., Megarajan, S., Xavier, B., Raju, S. S., Ghosh, S., & Gopalakrishnan, A. (2019). Design and performance of recirculating aquaculture system for marine finfish broodstock development. *Aquac. Eng.*, 85, 90–97.
- Regierung MV (2022a). Aktueller Arbeitsmarkt in M-V. Online verfügbar: <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/wm/Arbeit/Arbeitsmarkt/Aktueller-Arbeitsmarkt-in-M%E2%80%93V/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Regierung MV (2022b). Infrastruktur. Online verfügbar: <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/wm/Infrastruktur/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Regierung MV (2022c). Landwirtschaft. Online verfügbar <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Landwirtschaft/Landwirtschaft/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Regierung MV (2022d). Ernährungsindustrie. Online verfügbar: <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/wm/Wirtschaft/Industriebranchen/Ern%C3%A4hrungsindustrie/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Regierung MV (2022e). Fischerei – traditioneller Wirtschaftszweig mit Perspektive. Online verfügbar: <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Landwirtschaft/Fischwirtschaft-und-Fischerei/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Reinhardt, T., Hoevenaars, K., & Joyce, A. (2019). Regulatory frameworks for aquaponics in the European Union. In *Aquaponic Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 501-522.
- Remy, M., Singh, B. K., & Taylor, R. (2005). Evaluación de Dos Técnicas Hidropónicas Adaptadas Para las Condiciones del Trópico húmedo. Bachelor's Thesis, Universidad EARTH, San José, Costa Rica.
- Renkui, C., Dashu, N., & Jianguo, W. (1995). Rice fish culture in China: the past, present, and future. In *Rice fish culture in China*. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- Rojas-Tirado, P., Pedersen, P. B., & Pedersen, L. F. (2017). Bacterial activity dynamics in the water phase during start-up of recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 78, 24-31.
- Roques, J. A. C., Schram, E., Spanings, T., Schaik, T. van, Abbink, W., Boerrigter, J., Vries, P. de, Vis, H. & van de Flik, G., (2015). The impact of elevated water nitrite concentration on physiology, growth and feed intake of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture Research*, 46, 1384–1395.
- Rueda, P. A. (2004). *Towards assessment of welfare in African catfish, Clarias gariepinus: the first step*. Thesis, Wageningen University and Research, Wageningen, The Netherlands.
- Ruiz, P., Vidal, J. M., Sepúlveda, D., Torres, C., Villouta, G., Carrasco, C., Aguilera, F., Ruiz-Tagle, N., & Urrutia, H. (2020). Overview and future perspectives of nitrifying bacteria on biofilters for recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1478-1494.
- Saaid, M. F., Sanuddin, A., Ali, M., & Yassin, M. S. A. I. M. (2015). Automated pH controller system for hydroponic cultivation. In *Proceedings of the 2015 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, Langkawi, Malaysia, 12–14 April 2015; IEEE: New York, NY, USA; pp. 186–190.

- Saha, S., Monroe, A., & Day, M. R. (2016). Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Ann. Agric. Sci.*, 61, 181–186.
- Salachas, G., Savvas, D., Argyropoulou, K., Tarantillis, P. A., & Kapotis, G. (2015). Yield and nutritional quality of aeroponically cultivated basil as affected by the available root-zone volume. *Emir. J. Food Agric.*, 27, 911–918.
- Savidov, N. A., Hutchings, E., & Rakocy, J. E. (2007). Fish and plant production in a recirculating aquaponics system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta Horticulturae*, 742, 209–221.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8(11), 533.
- Schmidt-Puckhaber, B. (2010). *Fisch vom Hof?!: Fischerzeugung in Standortunabhängigen Kreislaufanlagen*, 1st ed.; DLG-Verlag: Frankfurt, Germany; p. 144.
- Schram, E., Roques, J. A., Abbink, W., Spanings, T., de Vries, P., Bierman, S., van de Vis, H., Flik, G. (2010). The impact of elevated water ammonia concentration on physiology, growth and feed intake of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Aquaculture*, 306, 108–115.
- Schröter, I., Hüppe, J. H., Lorleberg, W., & Mergenthaler, M. (2017). Kenntnisse über Aquaponik und Zahlungsbereitschaft für Fisch nach dem Besuch einer Polykulturanlage mit Aquaponik. *J Agric Environ Ethics*, 19(2), 169–194.
- Schröter, I., & Mergenthaler, M. (2019). Neuroeconomics Meets Aquaponics: An Eye-tracking Pilot Study on Perception of Information about Aquaponics. *Sustainability*, 11(13), 3580.
- Seawater Cube (2022). Vollautomatisierte Fischzucht im Container. Online verfügbar: <https://seawatercubes.de/> (Zugriff am 14 März 2022).
- Sharafzadeh, S., & Alizadeh, O. (2011). Nutrient supply and fertilization of basil. *Advances in Environmental Biology*, 5(5), 956–960.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364–371.
- Shoko, A. P., Limbu, S. M., & Mgaya, Y. D. (2016). Effect of stocking density on growth performance, survival, production, and financial benefits of African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*) monoculture in earthen ponds. *Journal of Applied Aquaculture*, 28(3), 220–234.
- Sifola, M. I., & Barbieri, G. (2006). Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil grown under different levels of nitrogen in the field. *Scientia Horticulturae*, 108(4), 408–413.
- Silva, L., Gasca-Leyva, E., Escalante, E., Fitzsimmons, K. M., & Lozano, D. V. (2015). Evaluation of biomass yield and water treatment in two aquaponic systems using the dynamic root floating technique (DRF). *Sustainability*, 7(11), 15384–15399.
- Silva, L., Valdés-Lozano, D., Escalante, E., & Gasca-Leyva, E. (2018). Dynamic root floating technique: An option to reduce electric power consumption in aquaponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 183, 132–142.
- Simeonidou, M., Paschos, I., Gouva, E., Kolygas, M., & Perdikaris, C. (2012). Performance of a small-scale modular aquaponic system. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 5(4), 182–188.
- Simon, J. E., Quinn, J., & Murray, R. G. (1990). Basil: A source of essential oils. In *Advances in New Crops*, 1st ed.; Timber Press: Portland, OR, USA; Volume 1, pp. 484–489.
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. (2015). LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 139–147.

- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-Scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming*; FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589; FAO: Rome, Italy; p. 262.
- SPD (2021). Mindestlohn von 12 Euro notwendig und richtig. Online verfügbar: <https://www.spd.de/aktuelles/detail/news/mindestlohn-von-12-euro-notwendig-und-richtig/14/09/2021/> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Specht, K., Weith, T., Swoboda, K., & Siebert, R. (2016). Socially acceptable urban agriculture businesses. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 1-14.
- Srivastava, R. K., Kumar, S., Sharma, R. S. (2018). Ocimum as a promising commercial crop. In *The Ocimum Genome, Compendium of Plant Genomes*; Shasany, A.K., Kole, C., Eds.; Springer: Cham, Switzerland; pp. 1-7.
- Stadtfarm (2022). Stadtfarm - SOLAWI, Fischbox & Markttage in Berlin. Online verfügbar: <https://www.stadtfarm.de/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2020). Deutsche geben relativ wenig für Lebensmittel aus. Online verfügbar: <https://de.statista.com/infografik/20684/> (Zugriff am 14 März 2022).
- Statista (2021a). Pro-Kopf-Konsum von Fisch und Fischereierzeugnissen in Deutschland in den Jahren 1980 bis 2020. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1905/umfrage/entwicklung-des-pro-kopf-verbrauchs-an-fisch-in-deutschland/> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Statista (2021b). Fisch & Meeresfrüchte. Online verfügbar: <https://de.statista.com/outlook/cmo/lebensmittel/fisch-meeresfruechte/deutschland#vertriebskanaele> (Zugriff am 28 Oktober 2021).
- Statista (2021c). Einwohnerzahl in Mecklenburg-Vorpommern von 1961 bis 2020. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155151> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2021d). Nettoumsatz der führenden Unternehmen im Lebensmitteleinzelhandel in Deutschland im Jahr 2020. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153723/> (Zugriff am 14 März 2022).
- Statista (2022a). Statistik zur Weltbevölkerung. Online verfügbar: <https://de.statista.com/themen/75/weltbevoelkerung/> (Zugriff am 11 März 2022).
- Statista (2022b) Pro-Kopf-Konsum von Fisch weltweit in den Jahren 2009 bis 2021. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36923/> (Zugriff am 11 März 2022).
- Statista (2022c). Statistiken zu Mecklenburg-Vorpommern. Online verfügbar: <https://de.statista.com/themen/2450/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2022d). Verteilung der Erdgasbezugsquellen Deutschlands im Jahr 2020. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151871/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2022e). Deutschland Kaufkriterien für Nahrungsmittel. Online verfügbar: <https://de.statista.com/prognosen/999818/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2022f). Welche Kriterien sind Ihnen beim Kauf von Lebensmittel am wichtigsten?. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/261360/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Statista (2022g) Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/641888/> (Zugriff am 14 März 2022).
- Statistisches Amt MV (2021). *Statistische Berichte, Tourismus in MV, Oktober 2021*. Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern: Schwerin, Deutschland; p. 23.
- Stecker, O., Strecker, O. A., Elles, A., Weschke, H. D., & Kliebisch, C. (2010). Marketing für Lebensmittel und Agrarprodukte, 4. *Frankfurt: DLG-Verlag*.

- Strauch, S. M., Bahr, J., Baßmann, B., Bischoff, A. A., Oster, M., Wasenitz, B., & Palm, H. W. (2019). Effects of ortho-phosphate on growth performance, welfare and product quality of juvenile African catfish (*Clarias gariepinus*). *Fishes*, 4(1), 3.
- Strauch, S. M., Wenzel, L. C., Bischoff, A., Dellwig, O., Klein, J., Schüch, A., Wasenitz, B., & Palm, H. W. (2018). Commercial African catfish (*Clarias gariepinus*) recirculating aquaculture systems: assessment of element and energy pathways with special focus on the phosphorus cycle. *Sustainability*, 10, 1–29.
- Succop, C. E., & Newman, S. E. (2004). Organic fertilization of fresh market sweet basil in a greenhouse. *HortTechnology*, 14(2), 235-239.
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., & Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural water management*, 178, 335-344.
- Summerfelt, S. T., Davidson, J., May, T., Good, C., & Vinci, B. (2015). Emerging trends in salmonid RAS – Part II. System enhancements. *Global Aquaculture Advocate*, 18(3), 64-65.
- Supajaruwong, S., Satanwat, P., Pungrasmi, W., & Powtongsook, S. (2021). Design and function of a nitrogen and sediment removal system in a recirculating aquaculture system optimized for aquaponics. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 130-140.
- Susanto, A., Herjayanto, M., Budiaji, W., Priyantono, E., & Guna, N. A. (2021). The Development Design of Venturi Type Protein Skimmer for Mariculture Land Base System. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 715(1), 012063.
- Tabatabaei, S. J. (2008). Effects of cultivation systems on the growth, and essential oil content and composition of valerian. *Journal of herbs, spices & medicinal plants*, 14(1-2), 54-67.
- Tacon, A. G. (2020). Trends in global aquaculture and aquafeed production: 2000–2017. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 28(1), 43-56.
- Tagesschau (2021a). Teurer Dünger belastet Landwirte. Online verfügbar: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/duengerpreise-landwirtschaft-101.html> (Zugriff am 14 März 2022).
- Tagesschau (2021b). Deutsche wieder Spar-Europameister. Online verfügbar: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/finanzen/sparen-geldanlage-aktien-bankeinlagen-vermoeigen-101.html> (Zugriff am 14 März 2022).
- Teitge, F., Peppler, C., Steinhagen, D., & Jung-Schroers, V. (2020). Water disinfection by ozonation has advantages over UV irradiation in a brackish water recirculation aquaculture system for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of fish diseases*, 43(10), 1259-1285.
- Teixeira, J. S., & Ten Tusscher, K. H. (2019). The systems biology of lateral root formation: connecting the dots. *Molecular plant*, 12(6), 784-803.
- Teliban, G. C., Stoleru, V., Burducea, M., Lobiuc, A., Munteanu, N., Popa, L. D., & Caruso, G. (2020). Biochemical, physiological and yield characteristics of red basil as affected by cultivar and fertilization. *Agriculture*, 10(2), 48.
- Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., & Leung, P. (2015). Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawai‘i. *Journal of the world aquaculture society*, 46(1), 20-32.
- Tran, H. (2015) Aquaponics-coupled and decoupled systems and the water quality needs of each. World Aquaculture 2015 – Meeting Abstract Jeju, Korea, May 27, 2015. World Aquaculture Society PO Box 397 Sorrento, LA 70778–0397 (USA)

- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. In *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, 1st ed.; InTech: Rijeka, Croatia; Volume 1, pp. 1–22.
- Turcios, A. E., & Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents—what can we learn from the past for the future?. *Sustainability*, 6(2), 836-856.
- Turnbull, J. F., North, B. P., Ellis, T., Adams, C. E., Bron, J., MacIntyre, C. M., & Huntingford, F. A. (2008). Stocking density and the welfare of farmed salmonids. *Fish welfare*, 10, 9780470697610.
- Turnšek, M., Joly, A., Thorarinsdottir, R., & Junge, R. (2020). Challenges of commercial aquaponics in Europe: beyond the hype. *Water*, 12(1), 306.
- Turnšek, M., Morgenstern, R., Schröter, I., Mergenthaler, M., Hüttel, S., & Leyer, M. (2019). Commercial aquaponics: a long road ahead. In *Aquaponics Food Production Systems*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 453-485.
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6-13.
- Umweltbundesamt (2021). Erneuerbare-Energien-Gesetz. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-gesetz#erfolg> (Zugriff am 27 Oktober 2021).
- Valbuena, I., Bechstein, F., Erdös, A., Müller-Belecke, A., Donath, W., & Kaufhold, S. (2012). *Konzeptstudie zur Erzeugung von Trockenfuttermitteln aus Konservierten Nebenprodukten der Süßwasserfischverarbeitung und deren Verwertung Durch Karnivore Wirtschaftsfischarten*; DBU: Osnabrück, Germany; p. 76.
- Valle-Echevarria, D., Angel, R., Kantar, M. B., Branca, J., Moore, S., Frederiksen, M. K., Hagen, L., Hussain T., & Baumler, D. J. (2019). Aeroponic Cloning of Capsicum spp. *Horticulturae*, 5(2), 30.
- van de Nieuwegiessen, P. G., Boerlage, A. S., Verreth, J. A., & Schrama, J. W. (2008). Assessing the effects of a chronic stressor, stocking density, on welfare indicators of juvenile African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell. *Applied Animal Behaviour Science*, 115(3-4), 233-243.
- van de Nieuwegiessen, P. G., Olwo, J., Khong, S., Verreth, J. A., & Schrama, J. W. (2009). Effects of age and stocking density on the welfare of African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell. *Aquaculture*, 288(1-2), 69-75.
- Vermeulen, T., & Kamstra, A. (2013). The need for systems design for robust aquaponic systems in the urban environment. ISHS Acta Horticulturae 1004; *International Symposium on Soilless Cultivation*: Shanghai, China; pp. 71-77.
- Villar-Navarro, E., Garrido-Pérez, C., & Perales, J. A. (2021). The potential of different marine microalgae species to recycle nutrients from recirculating aquaculture systems (RAS) fish farms and produce feed additives. *Algal Research*, 58, 102389.
- Villarroel, M., Rodríguez Alvariano, J. M., & Duran Altisent, J. M. (2011). Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. *Spanish journal of agricultural research*, 9(2), 537-545.
- Vivekanandan, E., & Pandian, T. J., (1977). Surfacing activity and food utilization in a tropical air-breathing fish exposed to different temperatures. *Hydrobiol.*, 54, 145–160.
- Wagner, E. J., Bosakowski, T., & Miller, S. A. (1995). Evaluation of the absorption efficiency of the low head oxygenation system. *Aquacultural engineering*, 14(1), 49-57.
- Walters, K. J., & Currey, C. J. (2015). Hydroponic greenhouse basil production: Comparing systems and cultivars. *HortTechnology*, 25(5), 645-650.

- Wang, X., Dai, W., Xu, M., Pan, B., Li, X., & Chen, Y. (2013). Effects of stocking density on growth, nonspecific immune response, and antioxidant status in African catfish (*Clarias gariepinus*).
- Wasenitz, B., Karl, H., & Palm, H. W. (2018). Composition and quality attributes of fillets from different catfish species on the German market. *Journal of Food Safety and Food Quality-Archiv für Lebensmittelhygiene*, 69, 57–65.
- Wattanapreechanon, E., & Sukprasert, P. (2012). Development of soilless culture for crop production in Thailand. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 33(3), 475-485.
- Wedell, R. (Welsfarm LAW) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Welsfarm LAW (2018). Welsfarm-LAW. Online verfügbar: <http://www.welsfarm-law.de/> (Zugriff am 13 März 2022).
- Wendelaar Bonga, S. E. (1997). The stress response in fish. *Physiological reviews*, 77(3), 591-625.
- Wenzel, L. (Universität Rostock & Fischzucht Abtshagen) (2022). Persönliche Kommunikation.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA; pp. 151–167.
- WiWo (2018). Fischwirtschaft erwartet steigende Preise. Online verfügbar: <https://www.wiwo.de/22999726.html> (Zugriff am 11. März 2022).
- Wortman, S. E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 194, 34-42.
- WRI (2019). *World Resource Report, Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050*; World Resource Institute (WRI): Washington, USA; p. 564.
- Xiao, R., Wei, Y., An, D., Li, D., Ta, X., Wu, Y., & Ren, Q. (2019). A review on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 863-895.
- Yogev, U., Vogler, M., Nir, O., Londong, J., & Gross, A. (2020). Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer. *Science of The Total Environment*, 722, 137949.
- Zerres, C., & Israel, K. (2016). Online-Marketing-Nutzung bei klein-und mittelständischen Unternehmen. In *Handbuch Marketing-Controlling*; Springer Gabler: Wiesbaden, Deutschland; pp.295-312.
- Zimmermann, J. (2017). Vergleich des Wachstums von Marokkanischer Minze (*Mentha spicata*) in drei verschiedenen Hydroponik Subsystemen unter aquaponischer Produktion. Masterarbeit, Universität Rostock, Rostock, Deutschland.
- Zweig, R. D. (1986). An integrated fish culture hydroponic vegetable production system. *Aquaculture Magazine*, 12(3), 34-40.

8. Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich durch eigenhändige Unterschrift, die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Die aus den Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Dissertation ist in dieser Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Rostock, 30.03.2022

Ort, Datum

Unterschrift der Doktorandin/des Doktoranden

9. Curriculum Vitae

Name Johannes Christian Pasch
Geboren 07. September 1988, Aachen
Email jo.pasch@web.de



Akademische Ausbildung:

02/2019 – 07/2022 Promotion gefördert durch das Stipendienprogramm „Unsere Besten promovieren in Rostock“ der Uni Rostock

10/2016 – 08/2018 M.Sc. Aquakultur and Sea-Ranching, Master Studium an der Universität Rostock, Masterarbeit: „Einfluss einer Wurzel-Belüftung auf das Wachstum der Marokkanischen Minze (*Mentha spicata* L.) bei drei verschiedenen Hydroponik-Subsystemen unter aquaponischer Produktion“

03/2011 – 04/2016 B.Sc. Business Studies/BWL, Bachelor Studium an der FH Aachen, Bachelorarbeit: „Mobbing am Arbeitsplatz“

Publikationen:

01/2022 Pasch, J., Appelbaum, S., Knaus, U., Sandmann, P., Palm, H. P. (2022). Effects of Stocking Density of African Catfish (*Clarias gariepinus*) in RAS on Growth Performance and Profitability. *Aquaculture Research*, eingereicht.

12/2021 Pasch, J., & Palm, H. W. (2021). Economic Analysis and Improvement Opportunities of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Aquaculture in Northern Germany. *Sustainability*, 13(24), 13569.

07/2021 Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, raft, and grow pipes with effluents of African catfish (*Clarias gariepinus*) in decoupled aquaponics. *AgriEngineering*, 3(1), 92-109.

02/2021 Pasch, J., Ratajczak, B., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2021). Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in DRF, raft, and grow pipes with effluents of African catfish (*Clarias gariepinus*) in decoupled aquaponics. *AgriEngineering*, 3(1), 92-109.

Wissenschaftliche Tätigkeiten:

04/2022	Aquaculture Business Vorlesung auf der AquaVIP
05/2019 –05/2022	Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Aquakultur und Sea-Ranching im Rahmen der Promotion
10/2019	Posterpräsentation auf der Aquaculture Europe in Berlin
06/2019	Speaker beim EIT Food Venture Programm in Madrid
05/2017 –05/2018	Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Aquakultur und Sea-Ranching des Aquaponik Projektes

Praktika:

01/2018 –03/2018	Hamburger Feinfrost GmbH, Hamburg
01/2018 –01/2018	Frischeparadies GmbH & Co. KG, Hamburg
09/2017 –10/2017	Mohnen GmbH in Stolberg Gressenich
07/2017 –08/2017	Müritzfischer, Fischerei Müritz-Plau GmbH in Waren
03/2017 –04/2017	Forellenhof im Schilbachtal, Simmerath-Steckenborn
02/2017 –03/2017	Nusa Karamba Resort and Hatchery, Jakarta, Indonesien
02/2010 –03/2010	APO Bank, Aachen
04/2010 – 05/2010	Luisenhospital, Aachen

Berufserfahrung:

10/2018 –01/2018	Customer Service Agent bei CPM, Barcelona, Spanien
04/2016 –09/2016	Schwerstbehindertenbetreuung beim Arbeiter-Samariter-Bund, Aachen
Seit 03/2012	Feinkost- und Streichinstrumentenhandel Vice Versa Handelsgesellschaft mbH (seit 01.11.2017 Pasch Fine Violins)
Seit 01/2011	Kunsthandel in der familieneigenen Erbgemeinschaft Pasch
02/2010 – 09/2010	Croupier in der Westdeutschen Spielbanken GmbH & Co. KG, Aachen
09/2008 – 05/2009	Zivildienst in der Kleebachschule, Aachen

Schulbildung:

08/1999 –06/2008	Abitur, Gymnasium Viktoriaschule, Aachen
------------------	--

10. Danksagung

Größter Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Harry W. Palm für die gesamte wissenschaftliche Ausbildung und Unterstützung vom Master bis zum Doktor. Danke dass sie mir den Erhalt meines Stipendiums ermöglicht haben und die Möglichkeit meine Forschung am Lehrstuhl für Aquakultur betreiben zu dürfen. Außerdem bin ich Ihnen dankbar, dass Sie mir den Freiraum gegeben haben, den schriftlichen Teil meiner Arbeiten im Ausland zu erstellen. Damit haben Sie mir einen großen Ballast bei der Geburt meiner Tochter in Spanien und beim Start mit meiner jungen Familie in den Wirrungen der Corona Zeiten von den Schultern genommen.

Weiterer Dank gilt meinem Kollegen Dr. Ulrich Knaus für die enge Zusammenarbeit und die Hilfe bei der Erstellung der Masterarbeit und ersten Paper. Durch deine Unterstützung in der Anfangszeit konnte ich mich orientieren und hab mich auch dank dir dazu entschlossen, den restlichen Weg zu gehen.

Für die finanzielle Unterstützung und Förderung durch das Ph. D. Scholarship Program „Unsere Besten promovieren in Rostock“ möchte mich ganz herzlich beim Rektor der Uni Rostock, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Schareck und unserem Dekan, Herrn Prof. Dr. Konrad Miegel bedanken.

Weiterer Dank gebührt meinen werten Kollegen die mich bei meinen Arbeiten unterstützt haben: Prof. Samuel Appelbaum für seine zuverlässigen Korrekturen und hilfreiche Expertise bei der Erstellung meiner Paper. Meinen lieben Kollegen und Freunden Hanna, Lisa, Lu, Laura, Julia und Philipp für eure helfenden Hände. Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei allen Studenten bedanken, die mir bei den Datenaufnahmen geholfen haben.

Außerdem will ich meinen ehemaligen Kommilitonen Niko, Gai, Raphi, Dirk, Philipp, Jona, Benny, Dave, Stefan, Steffen, Chris, Rüdiger, Max und Basti in besonderer Form danken. Ihr habt mir unglaublich viel geholfen und mir die beste Studienzeit beschert. Wir waren und sind das beste Team der Aquakultur und uns gehört die Zukunft! Weiterer Dank gebührt all meinen derzeitigen und ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls für Aquakultur und Sea-Ranching der AUF, Universität Rostock. Ein spezieller Dank geht an Stefan, Adrian, Marc, Patrick, Leo, Erwin, Sylvia, Björn, Sonja, Sebastian, Jan, Eike, Jaydip, Heidi und Berit.

Der allerherzlichste Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern Barbara und Norbert für alles, meinen Schwestern Julia, Linda und Nele, meinem Bruder Clemens und ganz besonders meiner Freundin Faviola und meiner kleinen Carlota. Danke, dass ihr immer für mich da seid und an mich glaubt.