

Forschungsbericht des
Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest und des
Instituts für Green Technology und Ländliche Entwicklung

zum Projekt

Pilotstudie "Nachhaltige Aquaponik- Erzeugung für Nordrhein-Westfalen"

Rolf Morgenstern
Ralf Biernatzki
Marc Boelhauve
Jürgen Braun
Peter Dapprich
Andreas Gerlach
Verena Haberlah-Korr
Marcus Mergenthaler
Bodo Mistele
Claus Schuster
Pierre Winkler
Margit Wittmann
Wolf Lorleberg

Gefördert durch:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Ergebnisse einer Forschungs Kooperation zwischen der Fachhochschule Südwestfalen und dem Referat II - 1 des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) des Landes Nordrhein-Westfalen

Forschungsschwerpunkt: Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Projektteam an der Fachhochschule Südwestfalen:

Dipl.-Ing. chem. Rolf Morgenstern (Aquaponik)
Dr. Peter Dapprich (Pflanzenbau und Pflanzenschutz)
Prof. Dr. Bodo Mistele (Messtechnik / Sensorik)
Prof. Dr. Marcus Mergenthaler und (Marktforschung)
Prof. Dr. Andreas Gerlach (Beratung Unternehmensgründungen)
Prof. Dr. Claus Schuster (Wasserqualität / Prozesswasserbehandlung)
Prof. Dr. Margit Wittmann (Fischhaltung)
Prof. Dr. Marc Boelhauve (Mikrobiologie)
Prof. Dr. Jürgen Braun (Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz)
Agr.-Ing. Pierre Winkler (Fischhaltung)

Projektleitung:

Prof. Dr. Verena Haberlah-Korr
Prof. Dr. Wolf Lorleberg
Dr. Ralf Biernatzki

© 2016

Fachhochschule Südwestfalen
Fachbereich Agrarwirtschaft / Institut für Green Technology und Ländliche Entwicklung
Lübecker Ring 2
59494 Soest

Tel. 02921 378-3211
Fax 02921 378-3200
agr@fh-swf.de
www.fh-swf.de/FB/agr

ISBN (print): 978-3-940956-65-1
ISBN (elektronisch): 978-3-940956-66-8

Danksagung

Der Fachbereich Agrarwirtschaft und das Institut für Green Technology und Ländliche Entwicklung i.Green bedanken sich bei allen externen Partnern, deren Unterstützung und Beratung das Projekt ermöglicht und vorangebracht haben, insbesondere bei

Prof. Dr. Harry Palm und Dr. Ulrich Knaus, Universität Rostock

Welszuchtbetrieb Ulrich Schulte, Halle/Westfalen

Daniel Fey, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz LANUV, Albaum

Michael Hoffmann, Fa. Rijk Zwaan, Welper

Jan Bunse und Nils Rehkop, Die Urbanisten e.V., Dortmund

Axel Störzner, Fa. hei-tro GmbH, Dortmund

Dr. Günther Scheibe und Sebastian Jobs, Fa. PAL Anlagenbau GmbH, Abtshagen

Andrew Gallik und Christoph Andreas, Versuchszentrum Gartenbau Straelen/Köln-
Auweiler der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen

sowie beim Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) des Landes Nordrhein-Westfalen für die finanzielle, ideelle und fachliche Unterstützung des Projekts.

Soest, 01.04.2017

Das Aquaponik-Projektteam der FH SWF

Inhalt

1	Einleitung	1
1	Aquakultur und Aquaponik	1
1.2	Stand der Forschung und Entwicklung	3
1.3	Pilotstudie Aquaponik für NRW	5
2	Technische Realisierung der Pilotanlage	7
2.1	Beschreibung des Teilbereichs "Aquakultur"	7
2.2	Beschreibung des Teilbereichs "Hydroponik"	10
2.2.1	Überblick	10
2.2.2	Horizontale Beete	12
2.2.3	Vertikale Beete	13
2.3	Integration der Bereiche	14
2.4	Zusätzliche Boxversuche	15
3	Erfahrungen aus der Prozessführung und -steuerung	15
3.1	Betrieb der Aquakultur	15
3.1.1	Überblick	15
3.1.2	Anfahrverluste	16
3.1.3	Stressmortalität	17
3.1.4	Unterschiedliche Entwicklung im Bestand	18
3.1.5	Nitrifikation und pH-Wert	20
3.1.6	Fütterung	21
3.1.7	Mastdauer	23
3.1.8	Zwischenfazit Prozessführung Teilsystem Aquakultur	23
3.2	Betrieb der Hydroponik	24
3.2.1	Erfahrungen mit selbst erstellten Schwimmhilfen (Rafts)	24
3.2.2	Erfahrungen mit kommerziellen Schwimmhilfen (Rafts)	25
3.2.3	Zusätzliche Konditionierungstanks	26
3.2.4	Abluft des Rieselfilters	26
3.2.5	Handhabung der vertikalen Beetsysteme	27
3.2.6	Austauschstrom zwischen den Beetsystemen	28
3.2.7	Beschreibung der Kulturversuche	29
4	Tierwohl und Tiergesundheit	31
4.1	Haltungsbedingungen, Haltungsansprüche und Bestandsdichte	31
4.2	Tiergesundheit	32
4.3	Betäubung und Schlachtung	33

5	Pflanzenernährung und –Pflanzengesundheit	34
5.1	Nährstoffbalancierung und Nährstoffversorgung	34
5.1.1	Nährstoffangebot aus der Aquakultur – Konzentration von Nitrat	34
5.1.2	Unterschiedliche Anforderungen an die Komposition der Nährstoffe	38
5.1.3	Eisenmangel	42
5.1.4	Phosphor und Remineralisierung des Absatzschlamms	42
5.1.5	Saisonale Schwankungen	43
5.1.6	Zwischenfazit Nährstoffversorgung	45
5.2	Pflanzenschutz	46
5.2.1	Vorbemerkung	46
5.2.2	Erfahrungen am Soester Pilotsystem	48
6	Marktpotenzial	51
6.1	Abschätzung der Verbraucherakzeptanz und Zahlungsbereitschaft	51
6.1.1	Vorbemerkung	51
6.1.2	Erzeugerpreisniveau bestehender kommerzieller Anlagen	51
6.1.3	Befragung beim Fachsymposium Soest	52
6.1.4	Kommunikation des Produktionsverfahrens	56
7	Ressourcenansprüche, Kosten und Wirtschaftlichkeit	57
7.1	Zur Methodik	57
7.2	Direkt- und Arbeitskosten der Aquakultur	58
7.2.1	Besatz	58
7.2.2	Anlagenauslastung	58
7.2.3	Fütterung	59
7.2.4	Pumpstrom	60
7.2.5	Heizung	60
7.2.6	Frischwassererwärmung	61
7.2.7	Weitere Betriebsmittel und sonstige Kosten	61
7.2.8	Arbeitskosten	62
7.2.9	Modell-Deckungsbeiträge	64
7.3	Direkt- und Arbeitskosten der Salat-Hydroponikproduktion	67
7.3.1	Düngung	67
7.3.2	Pumpstrom	67
7.3.3	Beleuchtung	68
7.3.4	Arbeitskosten	68
7.3.5	Modell-Deckungsbeiträge	68
7.4	Investitionskosten	71
7.5	Rentabilität	74

8	Abschätzung und Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit	76
8.1	Konzept zur Abschätzung der Nachhaltigkeit	76
8.2	Ansatzpunkte für eine verbesserte Umwelt- und Klimabilanz	77
9	Schlussfolgerungen und Ausblick	79
9.1	Erfahrungen aus der Prozessführung im Pilotbetrieb	79
9.2	Nährstoffbalance und Weiterentwicklung des Anlagendesigns	80
9.3	Pflanzengesundheit und Pflanzenschutz	82
9.4	Verbraucherakzeptanz und Zahlungsbereitschaft	82
9.5	Wirtschaftlichkeit	84
9.6	Ansätze für eine verbesserte Umwelt- und Klimabilanz	85
9.7	Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis	86
9.8	Gesamtbewertung	87
	Literatur	89
	Anhang: Bilder des Soester Systems	93

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1	EXEMPLARISCHE FISCHWÄGUNG 04. APRIL 2016. LIEFERGEWICHT: 50 G – 60 G.....	19
TABELLE 2	BEISPIELRECHNUNG FUTTERVERWERTUNGSKOEFFIZIENT (FOOD CONVERSION RATIO, FCR).....	22
TABELLE 3	KULTURVERSUCHE SALANOVA COOK RZ MIT VERTIKALEN BEETEN UND DEEP WATER CULTURE.....	30
TABELLE 4	NITRATKONZENTRATIONEN DES PROZESSWASSERS IM VERLAUF DES PROJEKTS.....	36
TABELLE 5	KULTURVERSUCHE SALANOVA COOK RZ IN BELÜFTETEN EUROBOXEN.....	37
TABELLE 6	EXEMPLARISCHE NÄHRSTOFFANALYSE ZU BEGINN DES WACHSTUMSVERSUCHS VOM 17.09.2016.....	39
TABELLE 7	PERFORMANCEUNTERSCHIED ZWISCHEN AQUAKULTUR- UND KLASSISCHER HYDROKULTURDÜNGUNG.....	41
TABELLE 8	ZAHLUNGSBEREITSCHAFTEN FÜR FRISCHEN UND GERÄUCHERTEN EUROPÄISCHEN WELS IN ABHÄNGIGKEIT VOM GESCHLECHT IN €/100G.....	53
TABELLE 9	ZAHLUNGSBEREITSCHAFTEN FÜR FRISCHEN UND GERÄUCHERTEN EUROPÄISCHEN WELS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GESCHMACKSBEURTEILUNG BEI DER PRODUKTVERKÖSTIGUNG IN €/100G.....	54
TABELLE 10	VERGLEICH DER ARBEITSKOSTEN.....	63
TABELLE 11	WICHTIGE PARAMETER ZUR BERECHNUNG DER DECKUNGSBEITRÄGE DER AQUAKULTUR.....	65
TABELLE 12	ÜBERSICHT DECKUNGSBEITRÄGE DER AQUAKULTUR.....	66
TABELLE 13	WICHTIGE PARAMETER FÜR DIE BERECHNUNG DER DECKUNGSBEITRÄGE DER HYDROKULTUR IM VERGLEICH.....	69
TABELLE 14	ÜBERSICHT DECKUNGSBEITRÄGE DER HYDROKULTUR.....	70
TABELLE 15	WICHTIGSTE PARAMETER UND ANNAHMEN ZU DEN INVESTITIONSKOSTEN FÜR GEBÄUDE UND TECHNISCHE EINRICHTUNGEN DER MODELLKALKULATIONEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT.....	73

TABELLE 16 <i>POTENZIELLE GEWINNBEITRÄGE DREIER VARIANTEN VON AQUAPONIKSYSTEMEN, ERRECHNET ALS LEISTUNGS-KOSTEN-DIFFERENZ (IN €/JAHR)</i>	75
---	----

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 <i>TECHNISCHE SKIZZE DES AQUAKULTUR-BEREICHS DER SOESTER AQUAPONIK-PILOTANLAGE</i>	8
ABBILDUNG 2 <i>TECHNISCHE SKIZZE DES TEILBEREICHS "HYDROPONIK" DER SOESTER PILOTANLAGE</i>	11
ABBILDUNG 3 <i>DETAILZEICHNUNG HORIZONTALE BEETE</i>	12
ABBILDUNG 4 <i>ABHÄNGIGKEIT DER ZAHLUNGSBEREITSCHAFTEN FÜR FRISCHEN UND GERÄUCHERTEN WELS</i>	55

1 Einleitung

1.1 Aquakultur und Aquaponik

Mit hohen jährlichen Wachstumsraten vor allem im asiatischen Raum trägt der Aquakultur-Sektor zunehmend zur Ernährung und Lebensmittelsicherheit der Weltbevölkerung bei und hat 2014 die Fischanlandungen aus Wildfängen erstmals mengenmäßig übertroffen. Gleichzeitig wird ein wachsender globaler Pro-Kopf-Verzehr für Fisch und Fischereierzeugnisse prognostiziert, der in Kürze auf über 20 kg pro Kopf und Jahr steigen könnte. Die ressourcenschonende und ökologisch nachhaltige Ausgestaltung von Aquakultur-Produktionssystemen wird deshalb im Rahmen der Agenda für Nachhaltige Entwicklung 2030 (2030 Agenda for Sustainable Development) eine zentrale Rolle spielen (FAO 2016 S.2). In Europa hat die Entwicklung der Aquakultur mit Ausnahme von Norwegen in den letzten Jahren stagniert; der Anteil Deutschlands an diesem Sektor weltweit wird auf unter 0,1 % geschätzt (DAFA 2014a S.9). Bei einem Pro-Kopf-Verzehr von Fisch und Fischereierzeugnissen von knapp 15 kg im Mittel der letzten Jahre betrug der Selbstversorgungsgrad Deutschlands in diesem Lebensmittelsegment 2014 lediglich 21,7 % (BMEL 2015 S.255) und könnte weiter sinken (DAFA 2014a S.9).

In Abstimmung mit EU-Initiativen zur Förderung von Fischerei und Aquakultur benennt der im Auftrag der Agrarministerkonferenz erarbeitete Nationale Strategieplan Aquakultur die "Erhaltung, Stabilisierung und den Ausbau vorhandener Aquakultur-Produktionskapazitäten" sowie die "Erhöhung der Erzeugung von Fischen und anderen Aquakulturerzeugnissen in nachhaltiger Produktion ("Wachstum")" als vordringliche strategische Kernziele (Agrarministerkonferenz 2014 S.7). Auch die Deutsche Agrarforschungsallianz DAFA sieht Handlungsbedarf und hat im Rahmen des Fachforums "Aquakultur" Leitlinien zur Forschung formuliert. Zwei Langfristziele stehen im Zentrum dieser Forschungsstrategie, und zwar sollen die in Deutschland konsumierten Aquakulturerzeugnisse "gesundheitlich wertvoll und unbedenklich sein sowie aus nachhaltiger, tiergerechter Erzeugung stammen" und "der deutsche Aquakultursektor soll sein Wettbewerbspotenzial ausschöpfen" (DAFA 2014a S.11). Als Hürden einer dynamischen Entwicklung des Sektors werden komplexe und langwierige Genehmigungsverfahren, Informationslücken der Bevölkerung zu Aquakulturfisch, ein Mangel an gut ausgebildetem Personal sowie Interessenkonflikte zwischen Fischzucht und Umweltschutz gesehen. Zudem er-

schwere die große internationale Konkurrenz heimischen Produzenten den Zugang zu verschiedenen Marktsegmenten (DAFA 2014b).

Da in Deutschland die Errichtung neuer Aquakulturanlagen in freien Gewässern räumlich begrenzt ist und hohen umweltrechtlichen Genehmigungshürden unterliegt, wurden in den letzten Jahrzehnten gebäudebasierte Kreislauf-Aquakulturanlagen mit mechanischen und biologischen Filtersystemen zur Prozesswasseraufbereitung entwickelt. Eine jüngere Fortentwicklung sind sog. Aquaponik-Produktionsanlagen, die Aquakultur mit Hydroponik (Pflanzenzucht in Wasser) in auf Ressourcenschonung ausgerichteten Kreislaufsystemen verbinden und in moderner Form die Idee der alten asiatischen gemischten Systeme der Karpfenhaltung in überfluteten Reisfeldern aufgegriffen haben. Das Prinzip ist dabei, das Wasser der Aquakultur als Nährstofflösung nach einer biologischen Aufbereitung den Nutzpflanzen zuzuführen und diese so zur biologischen "Reinigung" des Kreislaufwassers einzusetzen. Aus ökologischer Sicht bieten Aquaponik-Systeme mehrere Vorteile, da sie

- keine landwirtschaftliche Nutzfläche beanspruchen (müssen)
- durch die Koppelung der Fisch- und Gemüseerzeugung eine höhere Ressourcen- und Klimateffizienz im Vergleich zu Fischfang/Freilandgemüsebau, aber auch im Vergleich zu herkömmlichen Aquakultur- und Gewächshausproduktionen bieten (Schonung natürlicher Fischbestände, Einsparung von Düngemitteln, reduzierter Wasserverbrauch, Senkung der Abwasserbelastung durch kaskadische Nutzung, Abwärmenutzung)
- idealerweise ohne Antibiotika, sonstige Medikamentenzusätze und ohne chemischen Pflanzenschutz betrieben werden können (bzw. müssen)
- weitgehend unabhängig vom regionalen Klima an vielen Standorten der Erde
 - d.h. auch auf belasteten Böden, im urbanen Bereich und damit in räumlicher Nähe von Verbrauchern und Arbeitskräften errichtet werden können.

Aus agrarökonomischer Sicht ist die Hypothese zu vertreten, dass Aquaponiksysteme vor allem unter spezifischen Standortbedingungen ihre Vorzüge entfalten können, z.B. dort, wo kein fruchtbarer Boden für den "klassischen" Pflanzenbau, aber dafür andere kostengünstige (auch belastete) Flächen vorhanden sind und Energie reichlich und sehr kostengünstig (z.B. auch in Form industrieller Abwärme) zur Verfügung steht. Auf besondere Wassereffizienz ausgelegte Systeme können dort, wo Wasserknappheit herrscht, ihre Vorzüglichkeit entfalten. Schließlich stellt auch ein kaufkräftiges urbanes Umfeld mit Verbrauchern, die technische Innovation in Verbindung mit lokaler und nach-

haltiger Produktion honorieren, einen besonderen Standortfaktor dar, der mit Business-Konzepten der Urbanen Landwirtschaft genutzt werden kann (Direktvermarktung, Gastronomie, Vermittlung von Erlebnissen, Wissen, Erfahrungen....).

1.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Als zentrale Pioniere der modernen Aquaponik gelten James E. Rakocy und seine Forschergruppe von der Agricultural Experiment Station der University of the Virgin Islands, die ein Freilandssystem mit Tilapien und Salatproduktion entwickelten (Rakocy et al. 2004). Auf ihrem besonderen Standort wird die potenzielle Wirtschaftlichkeit des Systems allerdings durch sehr hohe lokale Preise für frische Salate und Kräuter und das warme Außenklima bestimmt, während für Anlagenstandorte in Deutschland die in der Fischvermarktung erzielbaren Preise sowie die Energie- und Anlagenkosten entscheidende Größen sind.

In Deutschland und seinen angrenzenden Ländern gibt es bisher nur einige Pilotanlagen und sehr wenige kommerzielle Anlagen (mit Pilot- bzw. Referenzcharakter) mit diesem innovativen Konzept. Darüber hinaus hat sich eine kleine, aber aktive Szene von bürgerschaftlichen Gruppen und Firmengründern etabliert, die zum Teil Anlagen in kleinem Maßstab unterhalten, wie z.B. in Nordrhein-Westfalen der gemeinnützige Verein Die Urbanisten e.V. (Dortmund), der Förderverein Wasser und Naturschutz Arche Noah e.V. (Menden), das Projektbüro heitro GmbH (Dortmund), die Aquaponik-Manufaktur in Issum und weitere Start-up-Unternehmen, die sich aktuell in der Gründungsphase befinden.

Wissenschaftliche Versuchs- und Pilotanlagen werden in Deutschland durch die Arbeitsgruppe Prof. Dr. Werner Kloas am Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) in Berlin (Rennert et al. 2011), durch das Institut für Aquakultur und Sea-Ranching unter der Leitung von Prof. Dr. Harry Palm an der Universität Rostock (Palm et al. 2014) und am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen in Soest (seit Mai 2015) betrieben. In den Nachbarländern arbeiten die Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, die niederländische Agraruniversität Wageningen und die Universität Liège (Arbeitsgruppe Prof. Dr. Haissam Jijakli) gleichfalls mit eigenen Pilotanlagen an Aquaponik-Fragestellungen.

Erste kommerziell betriebene Anlagen mit Pilot- bzw. Referenzcharakter gibt es seit 2012 in Basel, Schweiz von der Firma Urban Farmers AG (urbanfarmers.com), seit 2015 von der Firma ECF Farmsystems GmbH in Berlin (ecf-farmsystems.com, ecf-farm.de) und seit Mitte 2016 von der Fischerei Müritz-Plau GmbH in Waren an der Müritz, wobei die beiden erstgenannten Betreiber wie die meisten Aquaponik-Anlagen mit der Fischart Tilapia arbeiten. Urban Farmers konnten als Ausgründung der ZHAW deren Vorarbeiten nutzen und kooperiert weiterhin mit dieser Hochschule, während die Anlagen in Berlin und in Waren auf dem technischen Konzept und den Vorarbeiten des IGB Berlin beruhen. Sowohl Urban Farmers als auch ECF Farmsystems sind mit ihren ersten Anlagen als Referenz mittlerweile in das Geschäft der Anlagenprojektierung für Investoren eingestiegen und konnten erste Vorhaben akquirieren. Zurückgezogen aus der Aquaponik hat sich der urbane Landwirtschaftsbetrieb "Uit je Eigen Stad" in Rotterdam (uitjeeigenstad.nl); eigenen Angaben zufolge vor allem wegen des zu hohen Arbeitsaufwandes und der zu geringen Erträge in der Pflanzenproduktion. Ein weiterer Grund könnte die starke Konkurrenz durch das Angebot an frischem Seefisch sein, gegen die Zuchtfische in Küstennähe schwer bestehen können.

In technischer Hinsicht können Aquaponik-Systeme in sehr vielen Spielarten mit jeweils teils erheblichen ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteilen konzipiert werden, wobei es alleine für die Frage der Pflanzenbeetgestaltung zahlreiche Möglichkeiten gibt. Bezüglich der Prozesswasseraufbereitung und der Kreislaufgestaltung ist im Wesentlichen zwischen entkoppelten und gekoppelten Kreislaufsystemen zu unterscheiden. So wurde am IGB Berlin das unter der Bezeichnung ASTAF-PRO bekannte und patentierte Konzept der Entkoppelung der Fisch- und Pflanzenkreisläufe entwickelt, bei dem das Prozesswasser der Fische vor der Übergabe an die Pflanzenstrecken aufgedüngt und sein pH-Wert korrigiert wird. Nur das im Gewächshaus kondensierte Wasser, ergänzt mit Regenwasser, werden bei dieser Variante zurückgeführt; und je nach Auslegung der Anlage bezüglich der Fisch-Pflanzen-Mengenrelationen können erhebliche Mengen des Prozesswassers und seiner Nährstoffe ungenutzt bleiben. Gegenwärtig wird das Verfahren im breiteren Kontext mit internationalen Partnern im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes INAPRO (Innovative model & demonstration based water management for resource efficiency in integrated multitrophic agriculture and aquaculture systems) weiter erforscht (inapro-project.eu), das 2014 unter deutscher Führung an den Start ging. Sowohl die o.e. Anlage in Waren an der Müritz als auch eine weitere Anlage des Anlagenherstellers PAL GmbH in Abtshagen bei Stralsund

sind in das Großprojekt einbezogen. Anlagen mit gekoppelten Kreisläufen streben dagegen die vollständige Nutzung sämtlichen Prozesswassers und aller seiner Inhaltsstoffe sowie seine komplette Zurückspeisung in den Fischkreislauf nach dem Durchfluss der Pflanzenstrecken an. Dieses Verfahren wird in den Pilotanlagen an der Universität Rostock und an der Fachhochschule Südwestfalen, jeweils mit alternativen Fischarten, weiter erforscht und könnte bei erfolgreicher Umsetzung erhebliche ökologische Vorteile bieten.

Wenn auch die prinzipielle Funktionsweise der gekoppelten Konzepte bereits erwiesen ist, so besteht vor allem bezüglich der praktischen und wirtschaftlichen Anwendung noch umfangreicher Forschungs-, Entwicklungs- und Optimierungsbedarf, zumal es aus ökologischer Sicht sinnvoll erscheint, eine technische Alternative zum entkoppelten Verfahren zu entwickeln. Insbesondere sollte das Kreislaufprinzip vollumfänglich umgesetzt und mit einer einheimischen Fischart gearbeitet werden. Besondere Schwierigkeiten bei der Systementwicklung und -steuerung ergeben sich durch die Vielzahl der biologischen Parameter, die innerhalb eines solchen Systems beeinflusst werden können und in wechselseitiger Abhängigkeit stehen. Einen umfassenden aktuellen Überblick über den Stand der Forschung auch unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte wurde zuletzt von Wissenschaftlern aus dem europäischen Netzwerkprojekt COST FA 1305 "The EU Aquaponics Hub Realising Sustainable Integrated Fish and Vegetable Production for the EU" vorgelegt, an dem auch der Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen beteiligt ist. Die Autorengruppe sieht als zentrale künftige Herausforderung die Entwicklung von standortangepassten "voll kontrollierten und standardisierten Aquaponiksystemen", die "leicht zu managen und ebenso wirtschaftlich tragfähig sind" (Goddek et al. 2015). Im Rahmen des Netzwerks wird weiter gemeinsam Forschungs- und Entwicklungsarbeit bzw. wissenschaftlicher Austausch zu Aquaponik betrieben.

1.3 Pilotstudie Aquaponik für NRW

Ziel des hier dokumentierten Vorhabens war es, im Rahmen einer ersten Pilotstudie die technische Machbarkeit, die ökologische Vorteilhaftigkeit und das wirtschaftliche Potenzial eines neu in NRW für NRW entwickelten Aquaponik-Produktionssystems abzuschätzen bzw. unter Beweis zu stellen. Das praktizierte und getestete Verfahren setzte auf Erfahrungen aus Rostock, Berlin und Basel auf, wird aber als vermutlich europaweit erste Aquaponik-Anlage mit dem einheimischen Speisefisch Europäischer Wels (*Silurus glanis*) betrieben.

Ein Nebenziel des Vorhabens war eine erste Abschätzung der öffentlichen Akzeptanz von Bürgern und der Zahlungsbereitschaft von Verbrauchern für Erzeugnisse aus solchen Produktionssystemen. Das Vorhaben wurde in Abstimmung und mit Unterstützung der zuständigen Landesbehörden (Abteilung Fischereiökologie des Landesamtes für Natur- Umwelt und Verbraucherschutz LANUV; Herr Daniel Fey und Kollegen) sowie und in Kooperation mit mittelständischen Unternehmen des Landes durchgeführt. Dies waren der Welszuchtbetrieb Ulrich Schulte (als Jungfischlieferant und Berater) aus Halle/Westfalen, die deutsche Niederlassung der Firma Rijk Zwaan in Wavel (Lieferung von neuen Salatsorten und Beratung zu innovativen Hydroponiksystemen) sowie die Fa. hei-tro GmbH, Dortmund (Steuerungs- und Messsysteme sowie Management). Ein enger regionaler Kontakt besteht ferner zum gemeinnützigen Verein "Die Urbanisten" aus Dortmund, der dort eine Aquaponikanlage im urbanen Umfeld betreibt. Über die gesamte Projektlaufzeit und danach wurden zahlreiche interessierte Besucher durch die Anlage geführt, zu den technischen Möglichkeiten des Verfahrens informiert und zukünftige Kooperationsmöglichkeiten sondiert.

Die Durchführung eines eigenen Pilotprojektes in Nordrhein-Westfalen und eine darauf aufbauende weitere F&E-Tätigkeit im Verbund mit deutschen und ausländischen Forschungspartnern war bzw. ist dadurch gerechtfertigt, dass der aktuelle technische Stand der kommerziellen Anlagen noch verbessert werden kann und Nordrhein-Westfalen besondere Standortfaktoren bietet. So scheinen z.B. die Anlagen in Berlin und Basel auf Grund ihrer besonderen - "exklusiven" - Standorte und ihrer Pionierrolle vergleichsweise hohe Preise für Fisch und Gemüse erzielen zu können. Ihre Vermarktungspositionen sind jedoch weder auf ländliche Räume, noch auf die große Mehrheit der Ballungsgebiete Nordrhein-Westfalens übertragbar. Andererseits verfügt das Bundesland über ein erhebliches Potenzial an ungenutzten Industriebrachen, die sich für bodenlose Produktionsverfahren, idealerweise unter Nutzung von industriellen Abwärmequellen, eignen. Auch im ländlichen Raum sind Synergien zwischen Energieerzeugung und industrieller Abwärme wie z.B. aus der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung oder aus ländlichen Industrien wie z.B. Zementwerken erzielbar, wobei innovative energetische Lösungen eine besondere Kompetenz des Bundeslandes sind.

Für Anlagen in NRW sollte deshalb, wie auch im Rahmen des hier durchgeführten Projekts, eine modifizierte Technik und eine andere, vom Verbraucher allgemein geschätzte einheimische Speisefischart, gewählt werden. Diese wäre gleichzeitig ein nachhaltiges regionales Erzeugnis, und stünde nicht (wie die in

Berlin und Basel gehaltenen Tilapien) mit Fischen aus Teichanlagen in Südostasien in unmittelbarer Konkurrenz.

2 Technische Realisierung der Pilotanlage

2.1 Beschreibung des Teilbereichs "Aquakultur"

Die hier im Pilotbetrieb getestete Aquakultur-Bereich der Pilotanlage wurde durch die Fachhochschule Südwestfalen finanziert und im Mai 2015 in Betrieb genommen. Sie ist in zwei Abteilen des Versuchsgewächshauses des Fachbereichs Agrarwirtschaft untergebracht. Die technische Konzeption sowie die Errichtung wurde von Firma PAL Anlagenbau GmbH, Abtshagen, durchgeführt. Eine besondere Herausforderung bei der Errichtung war der knappe, zur Verfügung stehende Raum: Auf nur 19 m² waren drei 1,2 m³ große Fischtanks einschließlich aller Unterstützungsaggregate unterzubringen. Einen Überblick über die einzelnen Komponenten und ihr Zusammenwirken gibt die nachfolgende Abbildung.

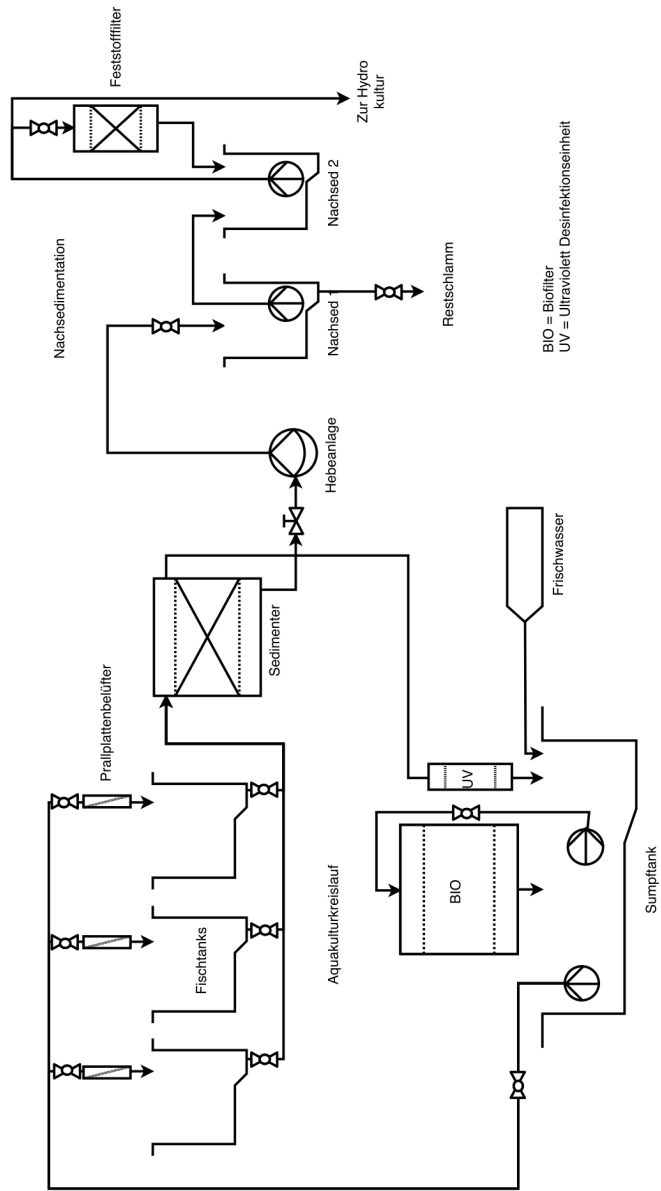


Abbildung 1 Technische Skizze des Aquakultur-Bereichs der Soester Aquaponik-Pilotanlage

Die Aquakultureinheit besteht aus drei parallel geschalteten, ca. 1.200 l großen, rechteckigen Fischtanks aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Der Zulauf ist wandseitig angebracht und mit jeweils einem Prallplattenbelüfter zur zusätzlichen, drucklosen Belüftung des zirkulierenden Wassers bestückt. Direkt daneben befindet sich jeweils eine Frischwasserzufuhr. Das Prozesswasser verlässt die Tanks über einen mit Schutzrohr versehenen Überlauf an der Gangseite der Becken.

Die Überläufe werden unterhalb der Becken vereinigt und fließen in einen Röhrensedimenter (engl. Tube sedimenter) mit 480 l Volumen. Die Röhren zur Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit sind mit Füllkörpern aus Kunststoff bestückt. Der Sedimenter kann durch einen manuell einschaltbaren Bypass umgangen werden. Dies erlaubt Wartungs- und Reinigungsarbeiten am Sedimenter. Das von groben Feststoffen gereinigte Prozesswasser verlässt den Sedimenter über einen Überlauf und wird nach einer Desinfektion durch eine 300 W-UV-Desinfektionslampe in den Sumpftank geführt.

Der Sumpftank hat ein Volumen von 800 l. Im Sumpftank befinden sich die Heizschlangen zur Temperaturhaltung des Prozesswassers. Die dafür benötigte Wärmeenergie wird über eine handelsübliche Heizanlage mit einer elektrischen 6 kW-Heizpatrone erzeugt. Der Sumpftank ist im Verhältnis von ca. 1:5 zweigeteilt. Das abgeteilte Volumen dient als Auffangbecken des Rückstroms aus der Auffangwanne und als Vorratsbehälter für die Kreislaufpumpe. Über diese Konstruktionsweise ist gewährleistet, dass die Heizschlangen ständig mit Wasser bedeckt sind.

Über dem Sumpftank befindet sich ein ca. 4 m³ großer Rieselfilter mit strukturiertem Füllkörper. Dieser stellt den Lebensraum für die nitrifizierenden Bakterien. Die interne Geometrie des Füllkörpers ist so strukturiert, dass überschüssiger Bakterienrasen abgespült wird. Der Rieselfilter ist dadurch wartungsarm und verstopft nicht durch Bakterienmasse. Das Prozesswasser wird über eine Filterpumpe des Typs MultiSystem M 330000 der Firma Messner mit 620 W Leistung über den Rieselfilter gepumpt. Der Rieselfilter ist nach ursprünglicher Konzeption für einen Vollbesatz mit Afrikanischen Welsen die zunächst als Fischart vorgesehen waren, dimensioniert. Er bietet ausreichend Kapazität für die Nitrifikation der Stoffwechselprodukte von ca. 12 kg täglich zugeführtem Fischfutter.

Der Bakterienrasen (Detritus / Biofloc) sammelt sich in einer Auffangwanne mit einem Volumen von ca. 280 l, die unterhalb des Rieselfilters und oberhalb des Sumpftanks angebracht ist. Das Prozesswasser wird über seitlich ange-

brachte, justierbare Überläufe in den zuvor erwähnten Ausgleichsbehälter geleitet. Zwischen Ausgleichsbehälter und Sumpftank bestehen im oberen Bereich mehrere Öffnungen, so dass ein Überlauf in beide Richtungen möglich ist.

Im Anschluss an den Ausgleichsbehälter ist eine Kreislaufpumpe des Typs Badu 90/20 der Firma Speck mit 1,24 kW Nennleistung installiert. Diese pumpt das Prozesswasser unter Drosselung mit einem Volumenstrom von 12,5 m³/h zurück in den Kreislauf. Dies entspricht einem Netto-Fischtankumsatz von ca. 3,3. Die Fischtanks werden also ca. drei Mal pro Stunde umgewälzt.

Die Fütterung erfolgt über drei zeitgesteuerte Futterautomaten der Firma Linn mit einem Beschickungsvolumen von 3 kg.

Die Außentemperatur im Raum wird durch eine Sumpftankheizung sowie über gusseiserne Heizkörper kontrolliert, die über das Nahwärmenetz der Fachhochschule beheizt werden. Aus technischen Gründen sind keine Wärmemengenzähler an die Raumheizungen angeschlossen, so dass Energieaufwände für Heizung geschätzt werden müssen. Zur besseren Isolation wurde der Raum mit 20 mm starken, alukaschierten PUR-Dämmplatten wärmegeklämt.

2.2 Beschreibung des Teilbereichs "Hydroponik"

2.2.1 Überblick

Der Hydroponik- bzw. Hydrokulturbereich der Anlage ist in einem an die Aquakultur angrenzenden Gewächshausabteil auf insgesamt 30 m² Versuchsfläche untergebracht. Das Abteil verfügt über eine automatisierte Belüftung und Beleuchtung sowie über Wärmeschutz-Schirme. Beete, Rohr- und Behältersysteme der Hydroponik wurden von Mitarbeitern der FH in Eigenarbeit geplant und errichtet. Dabei wurde nicht nur mit einfachen Schwimmbeeten gearbeitet, sondern auch mit neuartigen vertikalen Beetsystemen experimentiert. Einen Überblick über diesen Teilbereich gibt die nachfolgende Abbildung.

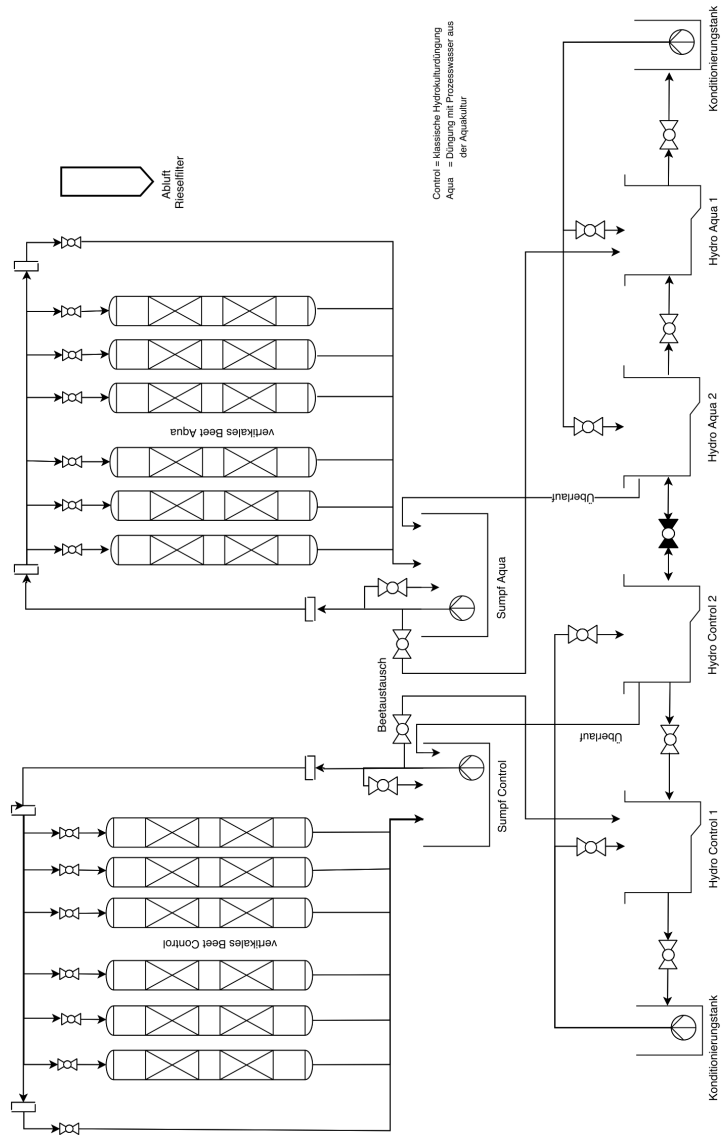


Abbildung 2 Technische Skizze des Teilbereichs "Hydroponik" der Soester Pilotanlage

Die komplette Pflanzenbaustrecke des Soester Systems bestand zum Zeitpunkt des Pilotbetriebs aus vier variabel verschaltbaren sogenannten Deep Water Culture (DWC)-Einheiten und einem vertikalen Beetsystem mit zwei Mal sechs vertikalen Beeeinheiten.

2.2.2 Horizontale Beete

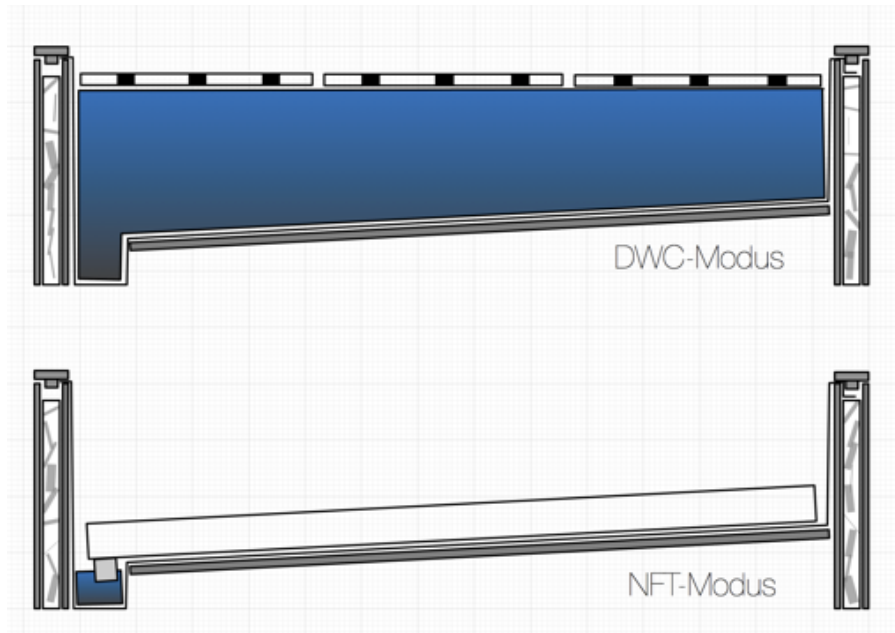


Abbildung 1 Detailzeichnung horizontale Beete

Die DWC-Einheiten wurden aus OSB-Montageplatten und Kautschuk-Teichfolie erstellt. An beiden Enden der Beetstrecke befinden sich so genannte Konditionierungstanks. Aus den Konditionierungstanks wird die Nährlösung mit jeweils einer Sicce Synkra 5.0 Pumpe über eine Verteilerschiene mit Bypass in die Beete gepumpt. Die Wassertiefe der DWC-Beete beträgt ca. 38 cm, ihr Volumen durchschnittlich 1.260 l.

Für die Wachstumsvergleichsversuche werden jeweils zwei Beete zu einem Beetsystem zusammengeschaltet. Die beiden Beete wurden in der Auswertung statistisch als eine Wiederholung bzw. als ein Doppelversuch betrachtet.

In der Anfangsphase wurden Schwimmaufsätze für die Pflanzen selbst gebaut, dann aber auf der Grundlage der daraus gewonnenen Erfahrungen auf ein adäquates kommerzielles Schwimmbeetsystem, sogenannte Rafts ("Schwimmhilfen") der Firma Dry Hydroponics umgestellt. Jedes DWC-Beet wurde mit jeweils drei Rafts der Größe 108 cm x 68 cm bestückt und verfügen so jeweils über eine Anbaufläche von gut 1,8 m³. Jede Schwimmhilfe kann mit 15 Pflanzen besetzt werden, die in einem 3 x 5 Raster angeordnet sind. Die Pflanzdichte beträgt somit 22,5 Pflanzen pro m². Der Lochabstand beträgt 12 cm. Jedes Pflanzloch befindet sich auf einer Erhöhung, die auf der Wasserseite des Rafts eine kleine Kuppel bildet. Diese Kuppel dient der besseren Belüftung der Pflanzenwurzeln. Ein Teil der Wurzeln hängt in diesem System immer in der Luft, so dass die Sauerstoffversorgung der Pflanzen gewährleistet ist. Die Löcher werden mit Trägern aus Kunststoff bestückt, die so gestaltet sind, dass sie die Erdpresstöpfechen mit den Pflanzen sicher über der Wasseroberfläche halten.

2.2.3 Vertikale Beete

Als Ergänzung zu den horizontalen Deep Water Culture-Beeten wurde an einer freien Wand des Gewächshausabteils ein vertikales Beetsystem errichtet. Ziel dieses Beetsystems ist eine bessere Flächennutzung des Hydrokulturabteils. Das Beetsystem wurde technisch angelehnt an ein kommerzielles Beetsystem der Firma Bright Agrotech, USA, das unter dem Namen „ZipGrow Tower“ vermarktet wird. Bei den Beeten handelte es sich um geschlitzte, weisse PVC-Zaunpfähle, 10 x 10cm, die lotrecht aufgehängt werden. Im Inneren befindet sich ein vertikal zweiteiliges Substrat aus Matala-Filtermatten mittlerer Granularität. Dieses Filtermaterial wird üblicherweise in der Aquakultur als mechanischer Filter und Biofilter verwendet. Es zeichnet sich durch ein hohes Leervolumen und hohe strukturelle Stabilität aus.

Die Pflanzen werden über die Länge verteilt zwischen das Substrat eingebracht. Das Substrat bietet dem Wurzelsystem Halt und verteilt das Wasser über die Wurzeln. Über das hohe Leervolumen ist eine gute Belüftung des Wurzelbereichs gewährleistet. Sechs der vertikalen Beete wurden in einem logischen Beetsystem zusammengefasst. Jeweils drei davon werden als ein Beet betrachtet, so dass zwei Beete mit jeweils drei Tower statistisch als eine Wiederholung bzw. als ein Doppelversuch betrachtet werden können. Ein Aufbau mit mehr Wiederholungen war aus Platzgründen leider nicht zu realisieren.

Unterhalb der Beete befindet sich jeweils ein 125 l Sumpftank. Aus diesem Sumpftank wird das Nährmedium mit einer Sicce Syncra 5.0 Pumpe in die Verteilerschiene über den Beeten gepumpt. Jeweils ein Bypass mit Kugelhahn nach der Pumpe, also vor der Verteilerschiene, und ein Bypass nach der Verteilerschiene erlauben eine flexible Anpassung des Wasserdrucks und der Durchflussmengen. Die Verteilerschiene ist mit Kugelhähnen bestückt, an denen der Durchfluss in die Beete individuell eingestellt werden kann. Unterhalb der vertikalen Beete befindet sich eine Sammelschiene aus weißem PVC, die das Nährmedium zurück zum Sumpftank leitet.

2.3 Integration der Bereiche

Die Integration von Aquakultur und Hydroponik erfolgt über den Schlammabzug des Sedimenters des Aquakulturkanals (vgl. Abbildung oben zum Aquakultur-Kreislauf). Hinter einem manuellen Schieber befindet sich eine Hebeanlage für die aus dem System zu entfernenden Schlämme. Die Entfernung wird einmal täglich manuell vorgenommen. Die zu entfernende Menge richtet sich nach der Futterzufuhr und der gewünschten Nitratkonzentration im Aquakultur-Prozesswasser.

Das entnommene Prozesswasser wird einen Tag lang in einem 260 l-Behälter nachsedimentiert. Nach Umpumpen am Folgetag in einen zweiten Nachsedimentationsbehälter gleicher Größe wird das Prozesswasser unter Belüftung kontinuierlich über eine selbst gebaute Filterpatrone gepumpt. Dies dient der Schwebstoffentfernung aus dem Prozesswasser, das danach für die Versorgung der Hydrokultur vorgesehen ist. Aus dem zweiten Nachsedimentations-tank wird das Prozesswasser über einen Prozesswasserzähler in einen der Konditionierungstanks gepumpt. Dieser Wassertransfer ist ebenfalls manuell und wird nach Bedarf dimensioniert und geführt.

Die in der Pflanzenstrecke durchgeführten Wachstumsversuche untersuchten zwei Düngungsvarianten in zwei verschiedenen Beetsystemen. Um sicherzustellen, dass für die selben Düngungsvarianten in beiden Beetsystemen die jeweils selbe Nährlösung zirkulierte, wurden die Beetsysteme miteinander verbunden. Im vertikalen Beetsystem befindet sich unterhalb des ersten Bypasses ein Abzweig mit Kugelhahn, der zum korrespondierenden DWC-Beet führt. Am zweiten DWC-Beet befindet sich ein Überlauf, über den das zugeführte Prozesswasser zum Sumpftank des vertikalen Beetsystems zurück fließen kann. Die Fließgeschwindigkeit dieser Austauschsysteme beträgt ca. 60

l/h, also 1.470 l/Tag. Der Sumpftank der vertikalen Beetsysteme wurde also ca. zehn Mal pro Tag mit Prozesswasser aus den korrespondierenden DWC-Beeten ausgetauscht.

2.4 Zusätzliche Boxversuche

Parallel zum Hauptversuch wurde in einem weiteren separaten Gewächshaus-
abteil ein technisch einfaches Versuchssystem aufgebaut, in dem Pflanzen in
unterschiedlichen Nährlösungen kultiviert und untersucht werden können. Mit
diesen Nebenversuchen sollte die allgemein schwache Datenlage bezüglich
des Nährstoffezugs durch in Hydroponik kultivierten Pflanzen durch eigene
Messungen erweitert werden.

Der Versuchsaufbau bestand aus bis zu zwölf Kunststoffboxen mit je 30 l Vo-
lumen, die mit gelochten Schwimmhilfen (Rafts) aus Schaumstoff abgedeckt
wurden. Es befanden sich jeweils zehn Pflanzlöcher in diesen Schwimmhilfen.
Nach ersten Handhabungsversuchen wurden die Schwimmhilfen unter Zuhil-
fenahme von Draht an der Oberkante der Kunststoffkisten befestigt, so dass
alle Rafts in allen Boxen auf der selben Höhe verblieben und unterhalb von
ihnen eine ausreichende Belüftung gewährleistet wurde. Zur Belüftung wur-
den zwei Aquaforte V30 Luftpumpen mit Ausströmern der Firma Sander ver-
wendet.

Die Pflanzen wurden über Netzöpfchen in die Rafts gebracht. Die Kisten wur-
den mit Klarsichtscheiben versehen, die mit einer Skala zur Ablesung des Flüssig-
keitsstands versehen wurden. Über diese Skala konnte die Verdunstung der
Nährlösung abgelesen werden.

3 Erfahrungen aus der Prozessführung und –steuerung

3.1 Betrieb der Aquakultur

3.1.1 Überblick

Die Aquakulturanlage wurde in einem modifizierten Gewächshausabteil er-
richtet, das entsprechend den Bedürfnissen der Welse nach dunkler Umge-
bung abgedunkelt werden musste. Hierzu wurde zunächst handelsübliche

Sonnenschutzfolie eingesetzt, die sich jedoch nicht als ausreichend erwies. Durch die direkte Bestrahlung des Rieselfilterkörpers kam es zu einem erheblichen Wärmeeintrag in die Aquakultur, was zu stark schwankenden Wassertemperaturen mit Spitzenwerten von über 32°C führte. Die erhöhte Mortalität beim Erstbesatz der Anlage (vgl. unten) war unter anderem auf die zu hohen Temperaturen und die zu hohe Helligkeit zu Beginn zurückzuführen, weshalb so schnell wie möglich der Aquakulturräum mit 2cm dicken aluminiumbeschichteten PUR Dämmplatten zusätzlich isoliert und verdunkelt wurde. Dieses Verfahren, das zu einer guten Temperaturpufferung im Raum führte, hat sich seither bewährt und kann für die Nachrüstung von Bestandsgewächshäusern empfohlen werden.

Die Besatzfische wurden vom Kooperationspartner U.Schulte bezogen. Dieser bezieht seine Besatzfische von zwei Lieferanten im süddeutschen Raum, von denen einer die Vermehrung in geschlossener Aquakultur, und der andere sowohl in geschlossener Aquakultur, als auch in natürlichen Gewässern betreibt. Die Versorgungslage mit Jungfischen beschreibt Herr Schulte als stabil und problemlos.

3.1.2 Anfahrverluste

Die Anlage, errichtet von Fa. PAL Anlagenbau GmbH, Abtshagen, wurde ursprünglich für die Fischart afrikanischer Wels (*Clarias gariepinus*) konzipiert, der über ein rudimentäres Lungenorgan verfügt und eine gewisse Zeit sogar ohne Wasser überleben kann. Eine zusätzliche Belüftung des Prozesswassers ist daher nicht erforderlich. Da die für den Afrikanischen Wels empfohlene Schlachtmethode der Betäubung mit Eiswasser durch die geltenden Tierschutzschlachtverordnung rechtlich nicht abgedeckt ist, entschied sich der Fachbereich Agrarwirtschaft in Abstimmung mit der Abteilung Fischereiökologie des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LaNUV) NRW, stattdessen Europäische Welse (*Silurus glanis*) zu halten. In Absprache mit dem Anlagenbauer PAL GmbH wurden die Becken mit Prallplattenbelüftern im Zulauf nachgerüstet, um ausreichenden Sauerstoffeintrag zu gewährleisten. Dieses Verfahren war jedoch mit starken Vibrationen verbunden, die über die Halterung der Belüfter auf die Becken übertragen wurden, und der Fischgesundheit abträglich sind. Welse als jagende Fische sind mit einer Sensorik ausgestattet, die potentielle Beutefische über Vibrationen im Wasser detektiert, Vibrationen der Becken werden von ihnen folglich als Dauerstress wahrgenommen. Auch diese Störquelle wurde so schnell wie möglich durch eine

alternative Befestigung der Belüfter korrigiert, so dass die Vibrationen nicht mehr in die Fischtanks geleitet werden.

Die ersten Besatzfische wurden mit einer Größe von 600 g – 700 g geliefert, da zum gewünschten Besatzzeitpunkt keine anderen Größen verfügbar waren und der Erstbesatz mit etwas robusteren Tieren erfolgen sollte. Unter anderem wegen der o.e. Gründe kam es im Verlauf der ersten Wochen zu Verlusten. Diese traten jedoch nicht innerhalb eines kurzen Zeitraums auf, sondern jeweils mit zwei bis vier Tagen Abstand über einen längeren Zeitraum, so dass zunächst keine eindeutige Ursache ermittelt werden konnte. Die Verluste verringerten sich nach dem Einfahren des Biofilters leicht, gingen aber nicht komplett zurück. Eine ausführliche Untersuchung toter Fische durch den Besatzfischlieferanten und das LaNUV erbrachte einen Befall mit Exoparasiten (*Dactylogyrus*). Diese Saugwürmer setzen sich in den Kiemen fest, deren Haut sie leicht durchdringen können. Parasiten dieser Art kommen in natürlichen Gewässern häufig vor und werden über die Jungfische potentiell in Aquakulturen getragen, sofern diese nicht ausschließlich mit Juvenilen aus künstlicher Vermehrung bestückt werden.

In gesunden Beständen sind Exoparasiten dieser Art zwar für die Fische lästig, aber nicht gefährlich. Wenn das Immunsystem der Fische jedoch geschwächt ist, kann es zu einer explosionsartigen Vermehrung der Parasiten kommen, die den Bestand weiter unter Druck setzt.

Als Gegenmaßnahme wurde auf Empfehlung des Welszüchters und der Veterinäre eine tägliche Behandlung mit 2,5ml Peroxyessigsäure (PER) pro Kubikmeter Anlagenvolumen und 80ml Wasserstoffperoxid vorgenommen. Die Peroxyessigsäure wirkt nach Aussage der LaNUV-Experten weder auf die adulten Parasiten, noch auf die Eier, sondern auf die aus den Eiern frisch geschlüpften Jungparasiten. Der Vermehrungszyklus wird durchbrochen. Die Behandlung muss über eine gesamte Lebensdauer der Parasiten, ca. vier Wochen, fortgesetzt werden. Laut Aussage der Experten kann durch eine Behandlung die Parasitenfreiheit einer Anlage nicht erzielt werden; dies könne nur eine biologische Sanierung der Anlage ohne Fischbestand gewährleisten.

3.1.3 Stressmortalität

Nicht nur in der ersten Startphase, sondern jeweils auch nach späteren Anlieferungen kam es zu Verlusten, die sich auch in etablierten Betrieben bei Transporten und Neubesatz in üblichen Größenordnungen von bis zu 10 % bewegen können. Die in der hier beschriebenen Anlage beobachteten Ausfälle

bei den ersten Fischlieferungen lagen jedoch über diesem Wert, was nachträglich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Hautverletzungen einer Gruppe von fünf Fischen, verursacht durch einen Handhabungsfehler beim Abfischen aus dem Transportbehälter, zurückzuführen war.

Im Nachgang der zweiten Lieferung trat Kannibalismus im Bestand auf, der zum Tod einiger Tiere mit deutlich sichtbaren Bissspuren führte. Transportstress sowie eine neue, ungewohnte Umgebung sowie eine falsche Besatzdichte können zu diesem Verhalten führen, das sich selbst verstärken und über längere Zeiträume auftreten kann. Ist die Besatzdichte im Becken zu gering, kann sich unter den Fischen ein Territorialverhalten ausbilden, das in Beisseerien und Kannibalismus mündet. Bei der zweiten Fischlieferung war die empfohlene minimale Besatzdichte von 25 kg - 30 kg/m³ zunächst deutlich unterschritten worden. Nach Auftreten der ersten Fälle wurden die Tiere in einen rechteckigen Korb im Euroformat (60 x 40cm) übertragen, der in das Fischbecken eingehängt wurde. Diese Einengung erhöhte die Besatzdichte so weit, dass von den Fischen wieder Schwarmverhalten ausgebildet wurde, in dessen Kontext keine gegenseitigen Angriffe stattfinden. Es kam zu keinen weiteren Verlusten. Im weiteren Verlauf der Mast wurde das Haltungsvolumen um eine weitere Kiste erweitert, bis die Tiere auch für dieses Volumen zu groß wurden und in das komplette Fischbecken entlassen werden konnten.

3.1.4 Unterschiedliche Entwicklung im Bestand

Bei den regelmäßigen Gewichtskontrollen während der Mastperiode wurde festgestellt, dass sich die Einzeltiere im Bestand nach Länge und Gewicht teilweise extrem unterschiedlich fortentwickelten ("Auseinanderwachsen"). So können nach mehreren Wochen Mast einzelne Tiere noch nahe ihres Ausgangsgewichtes liegen, während andere bereits ihr Startgewicht verzehnfacht haben. Erfahrungen aus der Praxis eingeführter Fischbetriebe bestätigen dieses Phänomen. Demnach dominieren einige Exemplare bei der Fütterung so stark, dass andere schwächere Tiere bisweilen fast vollständig von der Futterzufuhr abgeschnitten werden. Die kleineren Exemplare werden gegebenenfalls zur Beute der stärkeren Tiere, so dass es zu einer unsichtbaren Bestandsreduktion kommen kann.

Tabelle 1 Exmpl. Fischwägung 04. April 2016. Liefergewicht: 50 g – 60 g

	Gesamt	Tank 1	Korb 1	Korb 2
Mittelwert Gewicht	322 g	419 g	161 g	278 g
Standardabweichung	94 g	59 g	52 g	22 g
Abweichung vom Mittelwert	29 %	14 %	32 %	8 %
Min	50 g	320 g	50 g	240 g
Max	650 g	650 g	230 g	320 g
Gesamtgewicht	43,18 kg	Mastleistung	35,81 kg	

Auch im professionellen Betrieb wachsen Welse stark auseinander, so dass innerhalb einer Mastperiode fünf bis sechs Mal durchfischt und nach Größe neu sortiert wird. Im Zuchtbetrieb Schulte, der das Projekt mit Jungfischen beliefert und in Haltingsfragen berät, gibt es dafür eine Sortierapparatur. Für die Pilotanlage des Fachbereichs Agrarwirtschaft ist eine solche Anschaffung nicht wirtschaftlich, so dass die Sortierung und das Wiegen von Hand durchgeführt wird.

Ohne geeignete Hilfsapparaturen ist bereits die Vermessung und das Wiegen des Bestands eine arbeitsintensive Aufgabe. Da die Welse ihrer Art entsprechend im trüben Wasser in der Regel am Boden weilen, ist eine Sichtkontrolle nicht möglich. Zur sicheren Feststellung des mittleren Gewichts in einem Tank müssen mindestens zehn Exemplare abgefischt und vermessen werden. Beim Durchfischen kann es passieren, dass agilere Tiere dem Kescher geschickt ausweichen, so dass nur etwas trägere Exemplare vermessen und gewogen werden. Inwiefern dies die Daten verzerrt, wurde bisher noch nicht systematisch ermittelt. Als Alternative könnte der komplette Bestand in einem Becken gewogen und vermessen werden, was jedoch für die Tiere mit erheblichem Stress verbunden ist und i.d.R. mit einigen Tagen reduzierter Futteraufnahme und somit geringerer Mastleistung verbunden ist.

3.1.5 Nitrifikation und pH-Wert

Die bakterielle Nitrifikation des Prozesswassers beim Durchfluss des Biofilters erzeugt salpetrige Säure, welche in Aquakultursystemen zu einem kontinuierlichen Abfall des pH-Wertes führt. Diesem Vorgang muss durch geeignete Maßnahmen zur Stabilisierung des pH-Wertes entgegen gewirkt werden. In der sehr frühen Startphase ohne Fische wurde ein Anstieg des pH-Wertes auf 8,5 und darüber gemessen. Zur Konditionierung des Wassers für den kommenden Fischbesatz wurde in regelmäßigen Abständen Salpetersäure hinzugefügt. Der pH-Wert stieg aber dennoch kontinuierlich an. In der Ursachenforschung wurde festgestellt, dass das zugeführte Brunnenwasser, anders als das Stadtwasser, eine höhere Karbonathärte aufwies. Die im Wasser gelöste Kohlensäure wurde auf dem Biofilter über die große Oberfläche und die Belüftung als CO_2 ausgetrieben; ein Prozess, der den pH-Wert steigen lässt. Zur Vermeidung dieses Effekts wurde für die Startphase auf eine Wasserergänzung mit Stadtwasser umgestellt. Dies ließ sich einfacher für den kommenden Fischbesatz konditionieren.

Durch den im Verlauf des Projektes steigenden Fischbesatz und der damit einhergehenden steigenden Futtermenge wurde das Gleichgewicht zwischen Karbonathärte im Frischwasser und der durch Nitrifikation entstehenden Säure überschritten, so dass in der Folge in unregelmäßigen Abständen die Frischwasserzufuhr wieder auf Brunnenwasser umgestellt werden konnte. Durch die bereits erwähnte höhere Karbonathärte des Brunnenwassers wurde die Versauerung des Systems durch die Nitrifikation kompensiert. Durch weitere Steigerung der Futtermenge im Verlauf des Projekts wurde es später notwendig, Maßnahmen zu Anhebung des pH-Wertes zu ergreifen. Dies wurde durch tägliche Zugabe von bis zu 400 g Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3) realisiert. Der Kalk wurde im Zulauf des Sedimenters als vorgelöste Kalkmilch zugegeben, so dass diese sich über Sedimeter, Sumpftank und Biofilter gut auflösen und vermischen konnte, bevor sie zu den Fischtanks gelangt.

Im Betrieb wurde ein pH-Wert des Prozesswassers von 6,0 bis 6,5 angestrebt; eine Größenordnung, in der auch der Welszuchtbetrieb Schulte sein Prozesswasser hält. Gemäß der Erfahrungen aus diesem Betrieb fühlen sich die Welse in leicht saurem Wasser sehr wohl. Bei noch niedrigeren Werten in der Größenordnung von 5,0 seien sogar noch bessere Mastergebnisse erwarten, aber eine pH-Einstellung von über 6,0 ist anzustreben, um die Bakterienkolonien auf den Biofiltern nicht zu gefährden.

Mit steigender Besatzdichte und damit einher gehender steigender Gesamtfuttermenge nahm die tägliche Absenkung des pH-Wertes zu. Konnte das System an Ausnahmetagen nicht kontrolliert und justiert werden, war eine Absenkung des pH-Wertes bis auf knapp unter 5,0 zu beobachten. Im Gegensatz zur Anlage im Welszuchtbetrieb Schulte, bei dem die Biofilter auf die Sollbestandsdichte dimensioniert sind, war der Biofilter in der Soester Anlage für die ersten Durchläufe überdimensioniert und konnte Schwankungen der pH-Werte besser verkraften.

Bei der Dimensionierung von Biofiltern wird grundsätzlich großzügig gerechnet. Das von den Fischen abgegebene Ammonium wird zwar von den Bakterien verstoffwechselt, ist aber gleichzeitig schädlich, wenn es in zu hohen Mengen und Konzentrationen in einem Filtersystem auftritt. Ist die Nitrifikationsleistung eines Biofilters zu gering, so kann sich Ammonium anreichern und einen Biofilter "zusammenbrechen" lassen. Wegen der geringen Wachstumsraten der nitrifizierenden Bakterien erholt sich ein geschädigter Biofilter nur innerhalb von Tagen und Wochen.

3.1.6 Fütterung

Die Fische wurden im Rahmen des Pilotbetriebs mit pelletiertem Sinkfutter der Marke Ivory X von der Firma Aller Aqua gemästet. Das Futter hat einen sehr hohen Proteingehalt von 55 % und beinhaltet neben Fischmehl und –öl auch Blutmehl als Eiweißkomponenten. Die Fütterung findet nachts über zeitgesteuerte Futterautomaten statt. Der Fütterungszeitraum erstreckt sich über die ganze Nacht. Bei den jungen Fischen mit 50 g wurde Futter mit 3,5 mm-Pellets in einer Menge entsprechend 3 % des Fischgewichts im Tank gefüttert. Im Verlaufe der Mast wurde auf Pellets mit 4,5 mm umgestellt und mit wachsenden Fischen der Futterkoeffizient graduell auf 1,5 % des mittleren Fischgewichts abgesenkt. Zur Kontrolle der Futteraufnahme wurde täglich mit einem feinmaschigen Kescher der Boden der Fischtanks auf ungenutztes Futter inspiziert. Wurde solches gefunden, dann wurde die Futterrate reduziert.

Im späteren Verlauf des Testbetriebs bildete sich auf den Tanks eine stabile Schicht Proteinschaum aus. Dies ist ebenso im Praxisbetrieb ein normales Phänomen. Der Schaum kann als Indikator für das Fressverhalten der Tiere dienen. Fressen sie das Futter nicht vollständig auf, dann wird das im Futter enthaltene Fischöl freigesetzt, welches an der Oberfläche eine stark schaummindernde Wirkung entfaltet. Fehlender Schaum an der Oberfläche deutet für den Betreiber also auf eine Störung des Fressverhaltens hin. Ein zweiter Indi-

kator ist der täglich gemessene pH-Wert. Fällt dieser nicht deutlich ab, so ist die Nitrifikation vermindert, was auf einen geringeren Stoffwechsel der Fische und somit auf eine verringerte Futterraufnahme hinweist. Ein steigender pH-Wert ist ein Warnsignal, das nicht ignoriert werden sollte. Ein dauerhaft verringertes Fressverhalten deutet auf Probleme im Tierwohl hin. In einem solchen Fall sollten die Wasserwerte überprüft, Ursachen erforscht und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Tabelle 2 Beispielrechnung Futterverwertungskoeffizient (Food Conversion Ratio, FCR)

	Tank 2	Tank 3
Bestand April Anzahl	65	69
Bestand April Gewicht	27.250	15.930
Abgänge bis Juli	3	8
Bestand Juli Anzahl	62	61
Mittelwert Stichprobe Juli	1.103	685
Bestand Juli Gewicht Hochrechnung	68.355	41.791
Massezuwachs	41.105	25.861
Futtermenge April – Juli	37.750	25.080
Futterverwertungskoeffizient (FCR)	0,92	0,98

Unter Berücksichtigung der Verluste wurde für zwei Tanks exemplarisch für den Zeitraum von April 2016 bis Juli 2016 ein Futterverwertungskoeffizient von 0,92 bzw. 0,98 ermittelt. Das bedeutet, dass pro 920 g bzw. 980 g Futter ein Kilogramm Fisch produziert wurde. Der FCR wird als Quotient von trockene-

nem Fischfutter und wasserhaltigem Fisch ermittelt, was in diesem Fall zunächst gegenintuitiv erscheinende Werte unterhalb von Eins erzeugt. Aussagekräftiger wäre der Vergleich von Trockenmasse Fisch zu Trockenmasse Futter, was allerdings mit erheblichem Ermittlungsaufwand verbunden wäre.

Ein FCR von unterhalb von Eins wird sowohl für europäischen Wels, als auch für den afrikanischen Wels von den Produzenten berichtet. Bei optimaler Mast sind Werte bis auf 0,8 möglich. Zum Vergleich: Bei Tilapien werden in der Literatur Werte zwischen 1,3 und 1,5 genannt. Zu erwähnen ist dabei aber, dass das Welsfutter einen deutlich höheren Proteingehalt hat als Futter für Tilapien oder andere Spezies.

Der in der Anlage erzielte Futtermittelverwertungskoeffizient von unter Eins ist für das erste Produktionsjahr durchaus zufriedenstellend.

3.1.7 Mastdauer

Die Fütterung der Fische wird am jeweils aktuellen Gewicht und Alter der Tiere orientiert. Juvenile werden mit ca. 3.5% - 4% ihres Gewichtes gefüttert. Mit zunehmendem Alter und Gewicht wird dieser Wert auf ca. 1% - 1.5% reduziert. Wegen des guten Futtermittelverwertungskoeffizienten ist die tägliche Futtermenge mit einer entsprechenden Gewichtszunahme gleichzusetzen. Das Gewicht der Fische nimmt also im Verlaufe der Mast exponentiell zu. Der exponentielle Verlauf der Mastkurve bedeutet, dass die Dauer eines Mastdurchgangs stark von der Größe der eingesetzten Jungfische abhängt. Die Mast von 50g Jungfischen im Vergleich zu 100g Jungfischen unterscheidet sich um ca. 30 Tage. Die Besatzfischkosten werden diesen Sachverhalt entsprechend widerspiegeln.

Für die betriebswirtschaftliche Betrachtung wurde von einem Besatzfischgewicht von ca. 10g ausgegangen, so dass die Dauer eines Mastdurchgangs ca. ein Jahr beträgt.

3.1.8 Zwischenfazit Prozessführung Teilsystem Aquakultur

Der europäische Wels als an sich sehr robuster Fisch, der mit "schlechten" Wasserwerten und starker Trübung gut auskommen kann, eignet sich prinzipiell gut für Aquaponikanlagen, insbesondere durch seine Toleranz niedriger pH-Werte und hoher Nitratwerte. Im Rahmen des Testbetriebs wurde die Nitratkonzentration zunächst auf ca. 300 ppm NO_3 , später auf 550 -600 ppm NO_3

gehalten, in Spitzenzeiten wurden Werte um 800 ppm NO₃ gemessen. Der stabile Betrieb einer Aquakultur erfordert allerdings fundiertes Fachwissen und Erfahrung sowie anlagenspezifische Kenntnisse. Insbesondere in der Startphase eines neuen Systems ist mit Anfahrverlusten zu rechnen. Dies gilt weiterhin für jede Lieferung neuer Besatzfische. Stressfaktoren für die Fische sind so weit wie irgend möglich zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Ein gestörtes Fressverhalten führt zudem über wechselnde Wasserwerte und Systemzustände zu erhöhtem operativen Aufwand.

In kleinen Anlagen mit einer geringen Anzahl von Fischtanks kann das Bestandsdichtemanagement zu einer Herausforderung werden. Speziell der Europäische Wels erfordert wegen der stark variierenden individuellen Mastleistungen und einem zum Kannibalismus neigendem Verhalten bei geringen Bestandsdichten regelmäßige Kontrollen, Durchfischung und Sortierung. Eine reine Sichtkontrolle ist wegen der starken Trübung des Wassers und des bevorzugten Aufenthaltsortes der Tiere am Boden der Tanks nicht möglich. Aus den gleichen Gründen ist eine automatisierte Kontrolle mit computergestützten, bildgebenden Verfahren nicht, oder nur schwierig umzusetzen.

Die Stabilisierung des pH-Wertes in der Aquakultur ist mit Calciumcarbonat, Calciumhydroxid und Kaliumhydroxid möglich. In der angekoppelten Hydrokultur kann das Calcium-Kalium-Verhältnis der Nährlösung signifikanten Einfluss auf die Qualität der Pflanzenprodukte haben. Die Betriebsstoffe zum pH-Wertmanagement sollten daher mit der entsprechenden Weitsicht gezielt eingesetzt werden.

3.2 Betrieb der Hydroponik

3.2.1 Erfahrungen mit selbst erstellten Schwimmhilfen (Rafts)

Für erste Wachstumsversuche in den DWC-Becken wurden Schwimmhilfen (engl. Rafts) aus 4 cm dicken Styrodurplatten geschnitten. Es wurden mit einer Lochsäge Löcher mit einem Durchmesser von 6 cm in Abständen von 10 cm in die Platten gesägt. Der Durchmesser der Löcher war so gewählt, dass Jungpflanzen in Netzöpfchen eingebracht werden können. Jeweils vier dieser Schwimmhilfen konnten in ein Beet platziert werden. Diese Bauweise wurde bei Hydroponiksystemen anderer Gruppen und Institutionen angewandt und wurde deshalb als erstes im Selbstbau übernommen.

Die Erfahrungen mit dem oben beschriebenen System sind negativ. Der Arbeitsaufwand bei der Herstellung der Schwimmhilfen war größer als erwartet, so dass sich ein eventueller Kostenvorteil in Grenzen hält. Die Anschaffungskosten pro Platte liegen bei ca. 7 €. Die Bearbeitungszeit pro Platte, die sich aus dem Zurechtschneiden der Platte auf die richtige Größe und dem Sägen der Löcher zusammensetzt, war deutlich länger als erwartet (ca. 10-15 min pro Platte).

Die Handhabung und Funktionalität dieser selbstgebauten Platten war insgesamt unbefriedigend. Durch eine leichte Unwucht in der Lochsäge waren einige der gesägten Löcher minimal zu groß, so dass die Netztöpfchen mit den Pflanzen keinen Halt hatten. Diese Pflanzen mussten nachträglich im Raft fixiert werden.

Bei der Kultivierung mit diesem Raft-System schien sich ein ungünstiges Mikroklima für die Pflanzen auszubilden, so dass es an den Pflanzenhälsen bei zahlreichen Pflanzen zu Grauschimmelbefall (*Botrytis*) kam. Ein zu enger Lochabstand führte ferner bei den zu dicht stehenden Pflanzen zu Störungen beim Wuchs.

3.2.2 Erfahrungen mit kommerziellen Schwimmhilfen (Rafts)

Die Firma Dry Hydroponics bietet Hydroponik-Komplettsysteme an, die auch Schwimmhilfen beinhalten. Über einen Zwischenhändler konnten eine Anzahl dieser Schwimmhilfen bezogen werden. Mit diesen Rafts ist nach den Erfahrungen aus dem Pilotbetrieb eine qualitativ hochwertige Produktion möglich. Ein optimaler Lochabstand (12 cm) und die Belüftung der Wurzelhäuse und der oberen Wurzelbereiche führen baubedingt zu einem Mikroklima, das *Botrytis*-befall verhindert.

Bei mehreren Kulturen wurde sporadisch ein Austrocknen der Erdpresstöpfchen beobachtet. Sichtkontrollen zeigten, dass die Wurzelmasse der Pflanzen mit trockenem Substrat keinen Unterschied zu jener der Pflanzen mit gut befeuchtetem Substrat aufwies. Dennoch blieben die Pflanzen mit trockenen Erdpresstöpfchen im Wachstum deutlich sichtbar hinter den anderen zurück. Im Kontakt mit den Pflanzenforschern der niederländischen Universität Wageningen ergab sich, dass das beobachtete Phänomen ein bekannter Effekt in Hydroponik-Systemen ist. Das trockene Substrat drückt die Wurzeln mechanisch ab und behindert so die Wasserzufuhr der Pflanze. Die Pflanzen erholen sich nach nachträglichem Befeuchten der Erdpresstöpfchen nicht mehr vollständig. Ursache für ein solches sporadisches Austrocknen ist die nicht ausrei-

chende Kapillarität der ersten ins Wasser ragenden Wurzeln, so dass der über der Wasseroberfläche schwebende Erdballen nicht ausreichend befeuchtet wird. Es muss also in der Anfangsphase der Kultivierung darauf geachtet werden, dass die Erdpresstöpfchen nicht austrocknen. Dies kann durch leichtes Absenken der Rafts in der Anfangsphase durch Beschwerung mit Gewichten erreicht werden. Alternativ könnten anstelle der gepressten Erde andere Substrate mit höherer Kapillarität für die Presstöpfchen verwendet werden. Diese sollten jedoch eine ausreichende innere Kohäsion besitzen, damit die Nährlösung nicht durch abbröckelndes Substrat belastet wird. Kommerzielle Anbieter von Substraten speziell für den Anwendungsbereich der Hydroponik bieten mit quellenden Kunststoffen präparierte Substrate, sogenannte Polyplugs, an. Die Funktionalität dieser Alternativen soll in zukünftigen Versuchen geprüft werden.

3.2.3 Zusätzliche Konditionierungstanks

Vor endgültiger Fertigstellung und dem eigentlichen Pilotbetrieb der Anlage wurde im Rahmen einer studentischen Projektarbeit ein erster Handhabungsversuch für das selbst gebaute Hydroponiksystem durchgeführt. Im Betrieb stieg der pH-Wert des mit konventioneller Nährlösung gedüngten Beetverbundes kontinuierlich leicht an. Um die Vergleichbarkeit der Wachstumsergebnisse innerhalb des Gesamtversuchs zu gewährleisten, wurde der pH-Wert durch Zugabe von Salpetersäure nach unten korrigiert. Die Säure wurde direkt ins Beet dosiert. Im Verlaufe des Versuchs lösten sich die Wurzeln der Pflanzen in jenem Beetsystem auf. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurde dies durch lokal zu hohe Säurekonzentrationen im Wurzelbereich der Pflanzen hervorgerufen, bedingt durch zu geringe Durchmischung bei der Dosierung. Im weiteren Verlauf stieg der pH-Wert weiter stark an. Letzteres war mit der hohen Konzentration organischer Stoffe aus den Wurzeln zu erklären, die im Beet anaerob zersetzt wurden.

Zur Lösung dieses funktionell bedingten Problems wurden zusätzliche Konditionierungstanks in die Beetsysteme integriert. In beide Konditionierungstanks wurde zur Sicherstellung aerober Verhältnisse in den Folgeversuchen die Nährstofflösung mittels Luftpumpe und Belüfterscheiben belüftet.

3.2.4 Abluft des Rieselfilters

Im Rahmen des o.e. ersten Handhabungsversuches wurden in den Beeten zwei und drei statistisch knapp nicht signifikante Positionierungseffekte festgestellt.

Die Nichtsignifikanz dieses Effektes schloß eine gesicherte Aussage aus, lieferte in diesem Fall aber einen deutlichen Hinweis auf einen möglichen Fehler im Versuchsaufbau.

In der Ursachendiskussion wurde die Abluft des Rieselfilters als potentielle Ursache ausgemacht. Diese Abluft des Filters wird baulich bedingt in die Hydroponik-Abteilung geleitet. Fachlich begründet ist diese Art der Systemintegration mit dem zumindest theoretisch höheren CO₂-Gehalt der Abluft der Aquakultur, die in der Hydroponik als zusätzlicher Dünger der Pflanzen genutzt werden kann. Der erhöhte CO₂-Gehalt entsteht zum einen aus dem Stoffwechsel der Fische durch ihre Ausatmung, und zum anderen durch die Karbonathärte des zugeführten Frischwassers. Die Anlage wurde seit geraumer Zeit mit Brunnenwasser betrieben. Messungen hatten ergeben, dass die Karbonathärte, also der Kohlensäuregehalt dieses Brunnenwassers über dem des Stadtwassers liegt. Bei der auf dem Biofilter der Aquakultur stattfindenden Nitrifikation entsteht salpetrige Säure, die als stärkere Säure das Dissoziationsgleichgewicht der Kohlensäure in Richtung dissoziierter Kohlensäure verschiebt, die auf dem Rieselfilter als CO₂ ausgegast wird. Dieser Effekt puffert eine Verschiebung des pH-Wertes im Aquakultursystem und ist somit als betriebsstabilisierend durchaus willkommen. Das entstehende CO₂ kann in der Hydrokultur als Dünger dienen.

Das leicht erhöhte Wachstum der genannten Beete konnte unterschiedliche Ursachen haben, zum Beispiel eine erhöhte Luftbewegung über den betroffenen Beeten, eine erhöhte und konstantere Luftfeuchtigkeit, die über den Luftstrom an die Pflanzen gebracht wurde, sowie ein erhöhter CO₂-Gehalt im Mikroklima. Da ein gleichmäßiges Wachstum innerhalb der Beetsysteme erwünscht war, wurde probeweise der Luftstrom durch Anbau eines Rohrwinkels so gelenkt, dass er die Beete nicht mehr direkt überstrich. In den Folgeversuchen wurde der oben beschriebene Positionierungseffekt nicht mehr festgestellt.

3.2.5 Handhabung der vertikalen Beetsysteme

Die Bestückung der vertikalen Beetsysteme mit Jungpflanzen erwies sich als handarbeitsintensiver als erwartet. Das vergleichsweise steife Substrat lies ein Einziehen des Substrats mit den Pflanzlingen "wie ein Reißverschluss" nicht zu. Diese Methode wird vom Originalhersteller dieses Beetsystems empfohlen. Zur Bestückung wurden die Beetbehaltungen gespreizt und die Pflanzlinge in die erweiterten Öffnungen eingesetzt. Dabei musste auf Einsetztiefe und Aus-

richtung der Erdpresstöpfe geachtet werden. Diese dürfen nicht zu weit herausragen, da sonst im Betrieb die Nährlösung an der Front herunter laufen kann. Die Erdpresstöpfe wurden zudem mit einer leichten Neigung eingesetzt, so dass auftropfendes Wasser nach hinten in den Beetkörper geleitet wurde und nicht nach vorne aus dem Beet herabtropfen konnte. Trotz dieser Maßnahmen kam es im Betrieb häufiger zu Leckagen an der Front, durch die Nährlösung auf den Boden tropfte und die Blattmasse tiefer liegender Pflanzen befeuchtete. Diesem Effekt wurde durch leichtes Schrägstellen der Beetkörper entgegengewirkt.

In den ersten Versuchen mit diesen Beetsystemen verstopften die Zuläufe zu den Beeten schnell, was zu einem erheblichen Reinigungsaufwand führte. Das auf die Erdpresstöpfe tropfende Wasser trug in nicht unwesentlichem Maße Erde ab und spülte sie in die Nährlösung. Teile davon wurden in den Kreislauf gezogen und führten am Kopf der Beete in den Zuläufen zu Verstopfungen. Modifikationen der Zuläufe konnten das Verstopfungsproblem lösen.

Im Vergleich zu horizontalen DWC-Beetsystemen ist der Mehraufwand bei der Handhabung der vertikalen Beete erheblich. Die Versuchsergebnisse wiesen zudem ein signifikant niedrigeres Wachstum der Pflanzen in den vertikalen Beetsystemen im Vergleich zu jenen in den DWC-Beeten nach. Die vertikalen Beetsysteme wurden in diesen Versuchen an einer ungenutzten Wand in einer einzelnen Reihe angebracht. Noch ausgewertet werden müssen potentielle Positionseffekte bezüglich der Höhen der einzelnen Pflanzen in den vertikalen Beeten. Möglicherweise sind die tiefer positionierten Pflanzen bezüglich der Lichtversorgung systematisch benachteiligt. Eine solche Benachteiligung führt zu unterschiedlichen Kopfgrößen und -massen, ein Effekt, der in einem Produktionssystem in Hinblick auf die Vermarktung der Produkte unerwünscht ist.

3.2.6 Austauschstrom zwischen den Beetsystemen

Die horizontalen und vertikalen Beetsysteme wurden zunächst nicht hydraulisch miteinander verbunden. Im ersten Handhabungsversuch zu den vertikalen Beetsystemen wurde zum Versuchsende hin im Sumpftank der vertikalen Beete eine deutlich höhere Abreicherung von Nitrat gemessen als in den horizontalen Beetsystemen. Dies konnte schlüssig mit dem um ca. Faktor zwölf niedrigeren Gesamtvolumen des vertikalen Beetsystems erklärt werden. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse der verschiedenen Beetsysteme wurde zunächst ein täglicher, manueller Austausch der Nährlösung zwischen den Beeten in Erwägung gezogen. Zur Reduktion des Aufwands

wurde diese Option jedoch verworfen und die Beete wurden daraufhin mit einem Austauschsystem versehen.

Über der Pumpen im vertikalen Beet wurde jeweils ein Abzweig mit Kugelhahn installiert, der zum jeweils korrespondierenden Beetsystem führt. Im jeweils zweiten DWC-Beet wurde ein Überlauf zurück zum Sumpftank des vertikalen Systems installiert. Nach einfachen Experimenten zum hydraulischen Verhalten der Austauschleitungen wurde ein Durchfluss eingestellt, der pro Tag einen ca. zehnfachen Austausch der Sumpftanks gewährleistet. Trotz dieses Austauschs wurde im Sumpftank der vertikalen Beete kontinuierlich ein um ca. 0,5 Punkte erhöhter pH-Wert als im Sumpftank der DWC-Beete gemessen. Die genaue Ursache dieses erhöhten Messwerts ist noch nicht geklärt. Eine durch die stark unterschiedlichen Benetzungsoberflächen verursachte Aufnahme oder Abgabe von CO₂ könnte zu einer pH-Wert-Schwankung führen, ist jedoch noch nicht nachgewiesen.

3.2.7 Beschreibung der Kulturversuche

Es wurden drei vergleichende Kulturversuche mit Salanova Cook RZ Kopfsalat durchgeführt, von denen der erste als Handhabungsversuch für die neu errichteten vertikalen Beete gewertet wurde. In diesem Handhabungsversuch waren die Beetsysteme noch nicht miteinander verbunden, so dass vergleichende Aussagen zwischen den Beetsystemen zunächst noch nicht möglich waren.

Die Pflanzen wurden aus Saatgut in der Klimakammer und im Gewächshaus in 4 cm-Erdpresstöpfchen vorgezogen. Die Kulturdauer des zweiten und dritten Versuchs betrug 60 respektive 61 Tage. Nach der Vorzucht wurden die Pflanzen für 22 bis 25 Tage in den Beetsystemen kultiviert und mit einem selbst definierten Bonitierungschema bonitiert.

Tabelle 3 Kulturversuche Salanova Cook RZ mit vertikalen Beeten und Deep Water Culture. Düngung mit Aquaponikwasser im Vergleich zu klassischer Hydrokulturdüngung. Mittelwerte aus Doppelversuchen.

	Versuch 1		Versuch 2	
	(mit Eisenchelat)		(ohne Eisenchelat)	
	Feuchtmasse Kopf [g]	Trockenmasse Kopf [g]	Feuchtmasse Kopf [g]	Trockenmasse Kopf [g]
Aquaponikdüngung DWC Beet 1	1138,6	69,0	1137,4	60,3
Aquaponikdüngung vertikal	417,5	19,6	365,6	16,0
Hydrodüngung DWC	1048,0	59,1	1459,3	52,3
Hydroponikdüngung vertikal	457,9	21,9	390,6	14,8

4 Tierwohl und Tiergesundheit

4.1 Allgemeine Haltungsbedingungen, Haltungsansprüche und Bestandsdichte

Der empfohlene Temperaturbereich für die Mast Europäischer Welse liegt zwischen 22°C und 25°C. Unterhalb von 18°C ist keine Mastleistung mehr zu beobachten. Niedrige Temperaturen werden bis 4°C durch die Fische toleriert, so dass eine Haltung in offenen Gewässern in frostfreien Gebieten möglich ist. Die Ansprüche an die Wasserqualitäten sind vergleichsweise gering. Niedrige Sauerstoffkonzentrationen, sowie relativ hohe Ammonium-, Nitrit- und Nitratwerte werden gut verkräftet. Eine hohe Turbidität (Trübung) des Wassers ist ebenfalls unproblematisch.

Insbesondere in der Startphase des Systems wurden suboptimale Wasserwerte gemessen, mit Sauerstoffgehalten (DO, Dissolved Oxygen) von unterhalb von 5 mg/l, Nitritgehalten von bis zu 40 mg/l sowie hohen Wassertemperaturschwankungen mit Spitzenwerten bis zu 32°C (vgl. Erfahrungen aus der Prozessführung und -steuerung). Diese Probleme wurden umgehend bzw. schnellstmöglich korrigiert. Aus diesem Grund war ein gesicherter Einfluss dieser Werte auf die Sterblichkeit oder Mastleistungen der Fische nicht wissenschaftlich zu belegen, ist aber wegen der erhöhten Mortalität in der Startphase klar zu vermuten. Eine Zuordnung der erhöhten Mortalität zu den einzelnen Parametern konnte jedoch nicht vorgenommen werden.

Europäischer Wels toleriert niedrige pH-Werte, was für eine Integration dieser Spezies in ein Aquaponiksystem sehr günstig ist. In kommerziellen Aquakulturanlagen werden Europäische Welse bei einem pH-Wert von ca. 6,0 gehalten, wobei ein tieferer pH die Mastleistung u.U. sogar noch fördern könnte. Allerdings könnte die Nitrifikationsleistung der Biofilter dann leiden, so dass i.d.R. auf eine weitere pH-Absenkung verzichtet wird.

In der Soester Pilotanlage fiel der pH-Wert durch die Nitrifikation des Ammoniums aus den Ausscheidungen der Fische bei Maximalbesatz täglich um ca. eine pH-Stufe. Durch tägliche Zugabe von Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3) und Kalilauge (Kaliumhydroxid KOH) wurde der pH-Wert nach oben korrigiert und in den Bereich zwischen 6 und 7 gebracht. Unterblieb eine Korrektur, so fiel der pH-Wert in den Bereich zwischen 5 und 6. Einmalig wurde ein pH-Wert knapp unter 5 gemessen. In diesen sehr niedrigen pH-Bereichen wurde ein

Rückgang der Nitrifikationsleistung des Biofilters durch einen leichten Anstieg des Nitritwertes beobachtet.

Entsprechend ihrem natürlichen Habitat bevorzugen Europäische Welse als nachtaktive Raubfische Ruhe, eine eher dunkle Umgebung sowie trübes Wasser als "Deckung" und halten sich bevorzugt in der Nähe des Grundes (auch von Becken) auf. Darauf ist bei den Räumlichkeiten für Fischzucht sowie bei der Gestaltung der Becken Rücksicht zu nehmen.

Bezüglich der Haltung in Tanks sowie der optimalen tiergerechten Bestandsdichte wurden und werden u.a. an der Universität Rostock sowie an anderen spezialisierten Forschungseinrichtungen Versuche und Messungen angestellt, die auf Stressfaktoren der Fische basieren, und die die Haltung in Tanks vom Standpunkt der Tiergerechtigkeit als akzeptabel einstufen. Im konkreten Fall des Europäischen Welses ist zu berücksichtigen, daß dieser Fisch sich in der Natur überwiegend von anderen Fischen - also tierischem Protein - ernährt. Er ist sowohl ein Dasein als einzelner Jäger als auch im Schwarm gewöhnt. Ist z.B. die Bestandsdichte zu gering, so führt dies zahlreichen Beobachtungen zufolge zu erhöhtem Stress, Aggressivität und Kannibalismus, während im dichteren Schwarm diese Effekte nicht festzustellen und die Tiere ruhiger und in besserer Verfassung sind.

Vom Welszuchtbetrieb Schulte wird als maximale Besatzdichte für Europäische Welse eine Spanne von ca. 90 - 100 kg/m³ empfohlen. Eine minimale Besatzdichte von 25 kg/m³ sollte nicht unterschritten werden. Diese Besatzdichtewerte beziehen sich jeweils auf das Schlachtgewicht am Ende einer Mastperiode - sie ist während der Mastphase deshalb tatsächlich deutlich geringer. So kann bei einem angestrebten Schlachtgewicht von 1,5 kg je Fisch ein Tank mit 1.100 l ca. 70 Tiere beherbergen. Zu beachten ist außerdem, dass bei einem Jungfischbesatz die minimale Besatzdichte schnell unterschritten werden kann. Gibt es im Betrieb keine Jungfischbecken, muss der Bestand durch andere geeignete Maßnahmen, wie z.B. in die Becken eingehängte Netzkörbe, eingeeengt werden. Dies kann bei kleinen Betrieben mit geringer Fischtankanzahl und wenig Platz zur logistischen Herausforderung werden.

4.2 Tiergesundheit

Neben abiotischen Stressfaktoren, die jedoch im praktischen Betrieb gut zu vermeiden sind, können Europäische Welse ferner durch Parasiten gefährdet werden (vgl. Erfahrungen zur Prozessführung). Im Pilotbetrieb der Anlage

wurde in der Anfangsphase ein Befall mit Exoparasiten (*Dactylogyrus*) festgestellt, die sich dann stark ausbreiten können, wenn das Immunsystem der Fische durch andere Einflüsse geschwächt wurde. Gegen diesen Befall kann das Prozesswasser in den Tanks täglich mit 2,5 ml Peroxyessigsäure (PER) und 15ml Wasserstoffperoxid pro Kubikmeter Anlagenvolumen behandelt werden. Beide Mittel wirken desinfizierend, zerfallen aber in ökologisch unbedenkliche Metaboliten (Essigsäure, Wasser und Sauerstoff).

4.3 Betäubung und Schlachtung

Betäubung und Schlachtung auch für den Europäischen Wels sind in der geltenden Tierschutzschlachtverordnung gesetzlich geregelt. Während in sehr kleinen Beständen die Betäubung durch einen kräftigen Schlag auf den Kopf vorgenommen werden kann, betäuben kommerzielle Betriebe mit elektrischem Strom. Die Tötung erfolgt i.d.R. durch Kiemenschnitt und die Filetierung von Hand. Die Filetausbeute beträgt zwischen 40 % und 45 % des Schlachtgewichts.

Speziell für den Afrikanischen Wels, der physiologisch bedingt in der Lage ist, sehr starke Stromstöße lebend zu überstehen, wird die Betäubung mit Eiswasser sowie eine Kombination aus Eiswasser und Elektrobetäubung diskutiert; für kleinere Bestände wird dabei die Elektrobetäubung per Kopfdurchströmung, ggf. mit Vorkühlung der Tiere, empfohlen (Gaede et al. 2016, S.78). Erst wenn rechtssicher aus Sicht des Landes Nordrhein-Westfalen geklärt sind, ob aus Tierschutzsicht so verfahren werden kann, kann ein Einstieg in die Haltung Afrikanischer Welse empfohlen werden.

5 Pflanzenernährung und -Pflanzengesundheit

5.1 Nährstoffbalancierung und Nährstoffversorgung

5.1.1 Nährstoffangebot aus der Aquakultur – Konzentration von Nitrat

Der von den Fischen bei der Nahrungsaufnahme aufgenommene und umgesetzte Stickstoff des Proteins im Futter wird von ihnen über die Kiemen in Form von Ammonium (NH_3 bzw. NH_4^+) abgegeben. Ammonium ist in Abhängigkeit vom pH-Wert bereits in geringen Konzentrationen fischgiftig und muss daher aus dem System entfernt werden. In rezirkulierenden Anlagen wird dies über einen Biofilter realisiert, der nitrifizierende Bakterien nutzt, um das Ammonium über das Zwischenprodukt Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) umzuwandeln. Das Zwischenprodukt Nitrit ist ebenfalls fischgiftig, wenn auch in leicht geringerem Maße als Ammonium, während das Endprodukt der Nitrifikation, Nitrat, abhängig von der Konzentration nicht fischtoxisch ist. Erst ist in einer um den Faktor 1000 höheren Konzentration als der kritischen Konzentration für Ammonium wird Nitrat für die Fische zum Problem; es ist dabei aber noch nicht als unmittelbar giftig einzuschätzen. Allerdings führen Nitrat-Konzentrationen auch schon deutlich unterhalb der letalen Schwelle zu Belastungen der Tiere, die sich in reduzierter Futteraufnahme und geringerer Mastleistung niederschlagen. Eine maximal tolerable Nitratkonzentration im Prozesswasser von Kreislaufanlagen wurde bisher noch nicht scharf definiert; vielmehr hat ein Anlagenbetreiber einen gewissen Spielraum bei der Einstellung des Prozesswassers, der durch den Ausgleich des Zielkonfliktes zwischen "Reduktion von Betriebskosten für Abwasser- und Frischwassermenge sowie Energiekosten für die Frischwassererwärmung" einerseits und "Optimierung der Mastleistung" andererseits bestimmt wird.

Die Konzentration von Nährstoffen kann in Massenverhältnissen oder Molverhältnissen angegeben werden. Das Massenverhältnis ppm bezeichnet „Milligramm Substanz pro Kilogramm Prozesswasser“. Bezüglich des Nitratwertes sind zwei Darstellungsweisen etabliert, zum einen die Konzentration von Nitraten (NO_3^-) im Wasser, zum anderen die Massenkonzentration des im Nitrat befindlichen Stickstoffs ($\text{NO}_3\text{-N}$) bezogen auf das Wasser. Die beiden Darstellungen unterscheiden sich um den konstanten Faktor 4,43. Bei Zahlenangaben in der Literatur ist darauf zu achten, welche Darstellungsweise gewählt ist.

In der Literatur sind wenig konkrete Grenzwerte und Empfehlungen zu maximalen Nitratkonzentrationen für die Aquakultur zu finden. Die Empfehlungen unterscheiden sich für unterschiedliche Spezies, da diese unterschiedliche Toleranzen aufweisen können. Der europäische Wels gilt als robuster Fisch, der als tolerant für hohe Nitratwerte gilt. Die im Versuch gewählten Betriebsparameter wurden nicht der Literatur, sondern aus der Praxis des seit über 20 Jahren produzierenden Welszuchtbetriebs Schulte übernommen.

In der Startphase des Betriebs der Aquakultur wurde ein Nitratwert des Prozesswassers von moderaten 300 - 350 ppm NO_3^- angestrebt (entspricht 68 – 80 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$). Die Menge des aus der Aquakultur entnommenen Prozesswassers wurde entsprechend der täglich zugeführten Futtermenge dimensioniert. Bedingt durch die schwankende Futteraufnahme und die kontinuierlich steigende Futtermenge hatte das Prozesswasser schwankende Nitratkonzentrationen innerhalb des gewünschten Bereichs. Das Prozesswasser mit dieser Nitratkonzentration besaß einen EC-Wert von ca. 1,8 (siehe Textbox).

Der EC-Wert (Electric Conductivity – Leitfähigkeit) ist ein Maß für den Salzgehalt und somit ein Indikator für den Nährstoffgehalt einer Nährlösung. Die Leitfähigkeit ist allerdings ein Sammelparameter, der keine Aussage über die Komposition der unterschiedlichen Nährstoffe zulässt. In der gartenbaulichen Produktionspraxis wird der EC-Wert als Regelparameter für den laufenden Betrieb verwendet, anhand dessen die Notwendigkeit einer Nachdüngung der Nährlösung geprüft werden kann. In der Regel verwenden Produzenten für ihre Kulturen Nährlösungen mit definierten und bekannten Zusammensetzungen, so dass der EC als „Handparameter“ in der täglichen Praxis ausreicht. Produzenten lassen zudem in wöchentlichen oder zweiwöchentlichen Abständen die Komposition ihrer Nährlösungen in einem externen Labor messen, so dass sie durch gezieltes Nachdüngen mit Einzelkomponenten die genutzten Nährlösungen auf die gewünschten Zusammensetzungen und Konzentrationen bringen können.

Im späteren Verlauf des Projekts wurde nach einer Messung des Nitratgehalts des Prozesswassers beim Projektpartner Welszuchtbetrieb Schulte die Nitratkonzentration auf den dort eingestellten Wertebereich angehoben. Die Konzentration im System betrug fortan 550 – 600 ppm NO_3^- bei einem EC von 1,8 (entspricht 124 – 135 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$). Bei Maximalbesatz und maximaler Fütterung wurde die Nitratkonzentration aus Handhabungsgründen für wenige Wochen auf einen Maximalwert von ca. 800 ppm NO_3^- (entspricht 180 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$) erhöht. Das Prozesswasser hatte dann einen EC von ca. 2,3. Nach Aussagen von Mitarbeitern von PAL-Anlagenbau, spezialisiert auf Anlagen für Afrikanische Welse, ist 800 ppm NO_3^- der Betriebspunkt, an dem die von dieser Firma errichteten und betreuten Anlagen gefahren werden. Mit hoher

Wahrscheinlichkeit ist dieser Betriebspunkt auch für die Europäischen Weise möglich. Gesicherte Aussagen dazu, ob bei dieser Konzentration eventuell bereits mit Minderungen der Mastleistung zu rechnen ist, lassen sich derzeit noch nicht treffen. Diese Frage sollte jedoch Gegenstand künftiger Überlegungen und eventueller Versuche sein.

Tabelle 4 Nitratkonzentrationen des Prozesswassers im Verlauf des Projekts

Betrieb	Nitrat ppm NO ₃	Nitrat ppm NO ₃ -N	EC
Startphase	300	68	1,2
Regelbetrieb	550 – 600	124 - 135	1,8
Maximalbetrieb	800	180	2,3

Der im Regelbetrieb erreichte EC-Wert des Prozesswassers von 1,8 lag damit geringfügig unterhalb der empfohlenen Höhe von 2,0, der für die Nährstoffversorgung von Salaten in Hydroponik-Kultivierung von der Firma Rijk Zwaan sowie von Forschern der niederländischen Universität Wageningen empfohlen wird. Eigene Untersuchungen zeigten bei moderaten Unterversorgungen in Bandbreiten zwischen EC 1,6 und 2,0 in reiner Hydrodüngung eine noch nicht statistisch abgesicherte Wachstumsreduktion von ca. 10 Prozent. Dies stimmt in der Tendenz mit den Forschungsergebnissen von de Groot und Marcelis an Tomatenpflanzen überein, die für Minderversorgung mit Stickstoff eine nichtlineare Abhängigkeit ermittelten, wonach eine geringe Unterversorgung auch nur zu einer geringen Wachstumsreduktion führte (De Groot C., Marcelis L.F.M. 2003).

Es kann daher die Aussage getroffen werden, dass eine Hydroponik-Kultivierung von Kopfsalaten mit einem auf EC 1,8 eingestellten Prozesswasser aus der Welsproduktion durchaus möglich ist und in der Praxis zu gleichen oder nur wenig verringerten pflanzlichen Erträgen im Vergleich zu auf EC 2,0 eingestellten Nährlösungen führt. Vorläufige Ergebnisse von Wachstumsversuchen in Euroboxen bei unterschiedlichen EC-Werten der Nährlösung im Rahmen einer Masterarbeit. Hauptaufgabe des Versuchsaufbaus ist die Ermittlung

der Transpiration und Evapotranspiration bei unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen. Die

Wachstumsergebnisse sind Nebenergebnisse des Versuchs. Es sind pro Box zehn Pflanzen kultiviert worden. Wegen der geringen Lochabstände sind die Pflanzen innerhalb einer Box unterschiedlich gut gewachsen. Es waren Randeffekte deutlich sichtbar. Das Gewicht ist das Gesamtgewicht der Biomasse pro Box. Gut sichtbar ist, dass sich die Wachstumsergebnisse zwischen Aquaponikdüngung und Hydrokulturdüngung bei gleichem EC und bei einem EC von 2.0 nur gering unterscheiden. Eine vollständige statistische Auswertung der Rohdaten dieser Versuchsreihe steht noch aus. Eine Wiederholung der Versuchsreihe mit größeren Lochabständen ist geplant.

Tabelle 5 Kulturversuche Salanova Cook RZ in belüfteten Euroboxen. Düngung mit Aquaponikwasser im Vergleich zu klassischer Hydrokulturdüngung bei unterschiedlichen EC-Werten. Jeweils Gesamtbiomasse einer Box.

Versuch / EC	Doppelversuch	Feuchtmasse [g]	Trockenmasse [g]
Aquaponik 1.6	1	830	55,87
Aquaponik 1.6	2	910	57,05
Hydrodüngung 1.6	1	1050	57,82
Hydrodüngung 1.6	2	900	53,71
Hydrodüngung 2.0	1	990	53,66
Hydrodüngung 2.0	2	1050	61,35
Hydrodüngung 3.0	1	1040	64,49
Hydrodüngung 3.0	2	970	64,2
Hydrodüngung 4.0	1	940	62,59
Hydrodüngung 4.0	2	1080	68,76

5.1.2 Unterschiedliche Anforderungen an die Komposition der Nährstoffe

Wie die Verwendung des Prozesswassers im Vergleich zu praxisüblichen Nährstofflösungen bei der Hydroponik-Kultivierung von Salaten einzuschätzen ist, wurde in Wachstumsversuchen mit Kopfsalaten der Sorte "Salanova Cook RZ" der Firma Rijk Zwaan untersucht. Salatproduktion mit dieser Sorte in Hydroponik wird bereits in Belgien und Deutschland im Gartenbau praktiziert. Die genauen Nährstoffzusammensetzungen der dabei eingesetzten Nährlösungen wurden über das externe Labor von Eurofins agro analysiert.

Tabelle 6 Exemplarische Nährstoffanalyse zu Beginn des Wachstumsversuchs vom 17.09.2016

Nährstoff / Messgröße	Aquakultur-Prozesswasser	Standard-Nährstofflösung
EC	1,8	1,7
Kationen [mmol/L]		
NH ₄	< 0,1	0,2
K	2,2	10,5
Na	3,9	1,1
Ca	4,3	0,9
Mg	0,4	0,2
Anionen [mmol/L]		
NO ₃	8,8	3,3
Cl	3,0	2,8
S	1,3	2,0
HCO ₃	0,9	0,9
P	0,14	1,61
Spurenelemente [µmol/L]		
Fe	0,3	29
Mn	0,2	2,6
Zn	0,7	4,5
B	24	42
Cu	0,5	0,8
Mo	< 0,1	0,5
Si [mmol/L]	0,16	0,7

Deutlich zeigte sich eine Überversorgung der Pflanzen im Aquakultur-Prozesswasser mit Stickstoff aus Nitrat im Vergleich zur Standard-Nährstofflösung, eine relative Unterversorgung mit Phosphor und deutliche Unterversorgung mit Eisen. Hohe Nitratwerte in der Nährstoffversorgung führen zu erhöhtem vegetativen Wachstum. Bei Pflanzen mit Internodien führt Stickstoffüberversorgung zu langen Internodien und gestreckten Pflanzen, bei Salaten zeigten erste Beobachtungen in den durchgeführten Versuchen Hinweise auf frühes Schossen, ein Wachstumsverhalten, das in der Produktionspraxis unbedingt zu vermeiden ist. Die CNS-Analyse (siehe Textbox) der mit Prozesswasser versorgten Versuchspflanzen zeigte einen erhöhten Stickstoffgehalt in der Trockensubstanz gegenüber den Pflanzen aus den Kontrollbeeten.

CNS-Analyse: Elementaranalytisches apparatives Verfahren zur Bestimmung von Gehalten an Gesamtkohlenstoff, Stickstoff und Schwefel in Gewichtsprozenten.

Dem Nitratüberschuss des Prozesswassers im Vergleich zu den restlichen Nährstoffen kann prinzipiell durch zwei Maßnahmen begegnet werden: Entweder durch Reduktion des Nitratanteils (Denitrifikation) oder durch ein Nachdüngen der Nährlösung mit den unterrepräsentierten Nährstoffen. Um für den praktischen Betrieb die Nitratwerte der mit Prozesswasser gedüngten Salate vor einem Verzehr abzusenken, kann zum einen gegen Ende eines Tages geerntet werden; und/oder zum anderen die Versorgung der Pflanzen zwei Tage vor der Ernte auf (weitgehend nährstoffarmes) Stadtwasser umgestellt werden.

Die Messwerte für Kalium und Calcium zeigen im Aquakultur-Prozesswasser eine Unterversorgung mit Kalium und eine Überversorgung mit Calcium an. Das Kalium:Calcium-Verhältnis ist ein Produktionsparameter, der beim Kopfsalat die Qualität des Produkts beeinflusst. Empfohlen wird ein Kalium:Calcium-Verhältnis von ca. 2:1. Da in der Aquakultur Maßnahmen zur Anhebung des pH-Wertes notwendig sind (vgl. vorne), und diese sowohl mit Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3), Weiskalkhydrat (Calciumhydroxid Ca(OH)_2) als auch mit Kaliumhydroxid (Kalilauge KOH) vorgenommen werden können, ist die Einstellung dieses Produktionsparameters auf optimale Werte leicht möglich. Dieser Sachverhalt wird in zukünftigen Versuchen berücksichtigt werden.

Erste Wachstumsversuche mit Kopfsalat in zwei Düngevarianten, Aquakultur-Prozesswasser und Standard-Nährstofflösung für Hydroponik-Kultivierung, zeigten bei jeweils gleichen EC-Werten von 1,8 ein leicht erhöhtes Wachstum

des Kopfsalats bei der Verwendung des Aquakultur-Prozesswassers. Die Ergebnisse sind statistisch nicht abgesichert; Wiederholungsversuche stehen noch an.

Tabelle 7 Performanceunterschied zwischen Aquakultur- und klassischer Hydrokulturdüngung

Düngung	Frischmasse Kopf gesamt	Frischmasse relativ	Trockenmasse gesamt	Trockenmasse relativ
Aquakultur-Prozesswasser	2.275,2 g	108,5 %	137,9 g	116,6 %
Standard-Nährstofflösung	2.096,0 g	100,0 %	118,3 g	100,0 %

Diese ersten Versuchsergebnisse bestätigen Forschungsergebnisse anderer Arbeitsgruppen, die eine vergleichbare bis leicht erhöhte Produktivität für Aquaponik-Prozesswasser im Vergleich zu Standard-Nährstofflösungen bei gleichen Nährstoffkonzentrationen ermittelt haben. Die Ursachen für diese mehrfach bestätigte Beobachtung sind nicht abschließend geklärt. Als hypothetische Einflussfaktoren zur Erklärung dieses Unterschiedes werden unterschiedliche mikrobielle Aktivitäten, gelöste organische Inhaltsstoffe und Phytohormone genannt.

Die potenziell verringerte Nährstoffverfügbarkeit durch eine Abweichung vom empfohlenen EC-Wert für Hydroponik-Salat von 2,0 nach unten auf 1,8 scheint somit durch andere, die Produktivität positiv beeinflussenden Faktoren ausgeglichen zu werden. Wird Aquakultur-Prozesswasser noch zusätzlich aufgedüngt, so sind gemäß den Versuchsergebnissen einer Forschungsgruppe aus Liège, Belgien weitere Produktivitätssteigerungen bezogen auf Salat-Frischmasse von 38 % im Vergleich zu Standard-Nährlösungen, aber auch im Vergleich zu unbehandeltem Prozesswasser möglich (Delaide B., Goddek S. Gott J. 2016).

5.1.3 Eisenmangel

Ein bereits seit einiger Zeit bekanntes und vielfach beschriebenes Phänomen bei Nährlösungen basierend auf Aquaponik-Prozesswasser ist dessen geringe Eisen-(Fe)-Konzentration (vgl. Tabelle oben), die ohne Nachkorrekturen zu Eisenmangelsymptomen der Nutzpflanzen führen kann. Die über das Fischfutter mit eingebrachte Menge an Eisen ist in der Regel nicht ausreichend. Auch die hier durchgeführten Versuche bestätigten dies. Das spezifische Nährstoffdefizit konnte durch eine zusätzliche Düngung mit 6%iger Eisenchelatlösung (FeDTPA) ausgeglichen werden.

Diese Lösung sollte in der Praxis möglicherweise als verdünnte Blattdüngung appliziert werden, da noch unveröffentlichte Versuche anderer Forscher nahelegen, dass das durch Fischfutter oder durch Nachdüngung ins System eingebrachte Eisen im Prozesswasser nicht pflanzenverfügbar bleibt, sondern sich stattdessen in den festen fäkalen Abfällen und dem Detritus anreichert. Diese Empfehlung wird sich konkretisieren, falls die veröffentlichten Ergebnisse dieser Forscher die vorläufigen Hypothesen bestätigen.

5.1.4 Phosphor und Remineralisierung des Absatzschlammes

Neben Eisen ist Phosphor (P) ein weiterer wichtiger Pflanzennährstoff, der sich im System ungleichmäßig auf das für die Pflanzen verfügbare Prozesswasser und auf den abgesetzten Schlamm (vgl. technische Beschreibung vorne) verteilt. Das im Pilotbetrieb eingesetzte Fischfutter beinhaltet nach Herstellerangaben ca. 1 % -1,5 % Phosphor. Der genaue Verbleib von Phosphat im hier beschriebenen System wurde noch nicht vollständig erfasst und analysiert. Literaturangaben zu früheren Versuchen mit Kreislauf-Aquakulturanlagen lassen darauf schließen, dass vermutlich nur rund 16 % des über Futter zugeführten Phosphors in der Fisch-Biomasse sowie 19 % im Prozesswasser verbleiben (Suzuki et al. 2003). In die gleiche Tendenz gehen die Resultate neuerer Versuchsreihen, denen zufolge der Großteil des Phosphors im System (65 %) sich in den Absatzschlamm anreichert (Xuedong Zhang*, Henri Spanjers, Jules B. van Lier 2013).

Die Nährstoffmessung in den beiden verglichenen Nährlösungen zeigte eine deutlich niedrigere Nährstoffangebot (0,14 mmol/L vs 1,61 mmol/L) des Aquaponik-Prozesswassers. Möglicherweise ist diese Abweichung irrelevant, wie De Groot und Marcelis in Versuchen mit Tomaten nachweisen konnten (De Groot, C. C., Marcelis 2003). Demnach trat eine signifikante Reduktion des Pflanzenwachstums erst bei größeren Abweichungen des Phosphorangebotes

von den empfohlenen Idealwerten auf. Inwiefern die Versuchsergebnis für Tomaten auf Salat übertragen werden können, ist unklar. Nichtsdestotrotz ist angesichts weltweit schwindender mineralischer Phosphorquellen dringend anzustreben, den im Produktionssystem vorhandenen Phosphor für die Pflanzen zu nutzen und ihn nicht mit dem Schlamm aus dem System zu entfernen.

Bisher wurden noch keine präzisen Messungen des Phosphorgehalts im Absatzschlamm der hier beschriebenen Anlage vorgenommen. Diese Messungen sollen jedoch im Rahmen eines in Kürze anlaufenden Kooperationsprojektes zwischen der Fachhochschule Südwestfalen, der Universität Liège, der Universität Wageningen und der Humboldt-Universität Berlin durchgeführt werden. In diesem Projekt sollen an vier Standorten mit einem neuartigen gekoppeltem Doppelreaktor eine zweistufige anaerobe Aufbereitung der in Aquakultursystemen entstehenden Absatzschlämme getestet werden. Unmittelbares Ziel ist dabei die sogenannte Remineralisierung der im Schlamm eingelagerten Nährstoffe, um diese einerseits pflanzenverfügbar zu machen und um andererseits das Schlammvolumen zu reduzieren. Eine hochinteressante Arbeitshypothese ist ferner, dass die bei diesem Prozess voraussichtlich entstehenden flüchtigen Fettsäuren (Volatile Fatty Acids – VFA) sich möglicherweise als organische Nährstoffe für die Bakterienkulturen von Denitrifikationseinheiten in Kreislaufanlagen eignen. Eine solche technische Koppelung von Remineralisierung und Denitrifikation könnte einen wichtigen Schritt zur Optimierung von Aquaponik-Systemen bedeuten.

5.1.5 Saisonale Schwankungen

In der Praxis werden beim Betrieb von Kreislauf-Aquakulturanlagen die Systemtemperaturen und Produktionsparameter im saisonalen Verlauf nahezu konstant gehalten. So wird beispielsweise im Welszuchtbetrieb Schulte die Prozesswassertemperatur zur Heizkosteneinsparung im Winter um 1 °C bis maximal 1,5 °C reduziert. Die Mastleistung geht dort dementsprechend leicht zurück. Im Vergleich zu den saisonalen Unterschieden in der Produktion auf der Pflanzenseite ist diese Variation jedoch als gering einzustufen.

Das Pflanzenwachstum im Winter und der damit verbundene erwünschte Nährstoffentzug hängen signifikant von den beiden Betriebsparametern Wärme und Lichteinfall ab. Während Wärme je nach Standort auch potentiell kostengünstig in Form von industrieller Abwärme ins System eingespeist werden kann, ist für eine ausreichende Versorgung mit Licht in den Wintermonaten (im Regelfall auch hochpreisige) elektrische Energie notwendig. Wird wenig zusätzlich beleuchtet, kann sich die Kulturdauer von beispielsweise Kopfsa-

lat im Winter gegenüber dem Sommer nahezu vervierfachen. Einhergehend damit verringert sich auch der Nährstoffentzug durch die Pflanzen proportional. Durch Heizung und Beleuchtung ist es technisch möglich, auch im Winter gleiche Kulturbedingungen wie im Sommer für die Pflanzenstrecke herzustellen, allerdings nur mit erheblichem energetischem Aufwand, der die Wirtschaftlichkeit des Betriebs in Frage stellen kann.

Die saisonalen Unterschiede im Nährstoffentzug bei gleichzeitig fast konstantem Nährstoffangebot durch die Aquakultur machen die Systemführung bzw. -balancierung zu einer zentralen Herausforderung des Betriebs. Dies gilt ganz besonders für so genannte gekoppelte Systeme wie der hier beschriebenen Anlage, bei der das Prozesswasser nach der Nährstoffabreicherung durch die Pflanzen zurück in die Aquakultur geführt werden soll. Für solche Anlagen gilt es, bereits bei der Dimensionierung in der Planungsphase ein sinnvolles Verhältnis zwischen Aufkommen und Verwertung der Nährstoffe im Prozesswasser im Sommer und im Winter zu finden. Im praktischen Betrieb kann dies dazu führen, dass im Sommer zusätzlich Nährstoffe nachgedüngt werden müssen, im Winter die Pflanzenstrecke beheizt und beleuchtet werden muss und es auch zur Nichtnutzung von Aquakultur-Prozesswasser in den Wintermonaten kommen kann.

Einen gewissen technischen Kompromiss stellen die bisher entwickelten Methoden zur Systemkoppelung wie das so genannte ASTAF-PRO-Verfahren (vgl. vorne) oder die von Simon Goddek vorgeschlagenen Konzepte zu „decoupled aquaponic systems – DAPS“ dar, lösen die o.g. Problemstellung aber nicht vollständig bzw. nur mit schwer zu vertretendem hohem Aufwand. So wird beim ASTAF-PRO-Verfahren das verdunstete Prozesswasser kondensiert und in die Aquakultur zurückgeführt - technisch machbar, aber mit erheblichem Energieaufwand verbunden. Die DAPS-Konzepte wiederum sehen Dimensionierungen der Hydroponik-Abteilungen in jeweils solchen Größenordnungen vor, dass das aus der Aquakultur abzuführende Prozesswasser auch im Winter vollständig verdunstet werden kann.

Abhängig von den angebauten Pflanzen sind zu niedrige Nährstoffkonzentrationen durch Aufdüngungsmaßnahmen zu korrigieren und für die Hydroponik-Abteilungen erhebliche Gewächshausflächen vorzuhalten. Unter aktuellen Markt- und Preisbedingungen für Fisch und Gemüse ist jedoch die Aquakultur-Abteilung in der betrieblichen Praxis bei wesentlich geringerem Gebäude- und Flächenanspruch der wirtschaftlich attraktivere Part, so dass eine auf den Nährstoffanfall abgestimmte Hydroponik-Anlage für die Praxis nicht attraktiv

erscheint. Eher wird auf die Nutzung erheblicher Mengen von Aquakultur-Prozesswasser verzichtet.

5.1.6 Zwischenfazit Nährstoffversorgung

Tatsächlich ist die Abstimmung von Nährstoffangebot der Aquakultur auf die Nährstoffnachfrage der Hydroponik technisch nicht einfach durchzuführen und bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. So stellen bereits die saisonalen Unterschiede des Nährstoffentzugs vor allem für solche Anlagen, die nicht mit Heizung und Beleuchtung auch die pflanzliche Produktion ganzjährig konstant halten (können), eine erhebliche Herausforderung dar. Zudem sind die Konzentrationen und die Zusammensetzungen der Nährstoffe im Prozesswasser der Aquakulturen in ihrer unveränderten Form nicht immer für die Pflanzen optimal und im Vergleich zu Nährstofflösungen der gartenbaulichen Praxis zu gering. Abhilfe kann die gezielte Aufdüngung des Prozesswassers mit Nährstoffen bieten. Um die Rückführung des Prozesswassers in die Aquakultur zu erleichtern, wäre eine geeignete Blattdüngung das Mittel der Wahl.

Ganz allgemein sind die Nährstoffkonzentrationen im Aquakultur-Prozesswasser für viele pflanzliche Kulturen tendenziell zu niedrig. Es gibt Fisch-Pflanzenkombinationen, die durchaus gut funktionieren können, aber für Kulturen mit hohen Nährstoffansprüchen ist fast immer eine Aufdüngung angezeigt. Diese kann jedoch dazu führen, dass das Prozesswasser nach der Nutzung durch die Pflanzen nicht mehr für eine Rückführung in die Aquakultur geeignet ist.

In der Praxis der größeren kommerziellen Aquaponikanlagen in Berlin, Basel, Den Haag und Waren werden aus den o.g. Gründen so genannte entkoppelte Verfahren angewandt und das Aquakultur-Prozesswasser für eine performancegerechte Versorgung von stark zehrenden Pflanzen, wie zum Beispiel Tomaten und Auberginen, mit mineralischem Dünger komplementiert. Das so aufgedüngte Prozesswasser ist am Ende der Pflanzenstrecke dann allerdings noch immer zu konzentriert, so dass es nicht zurück in die Aquakultur geleitet wird; lediglich kondensiertes Verdunstungswasser wird zurückgeführt. Eine vollständige Kondensation allen Prozesswassers wäre energetisch unter mitteleuropäischen Bedingungen sehr aufwendig, ebenso wie die Auslegung der Hydroponik-Abteilungen in einer solchen Größenordnung, dass sämtliches Prozesswasser auf natürliche Weise verdunsten kann. Für wärmere bzw. sehr heiße Standorte wären diese Konzepte dagegen wirtschaftlich vorstellbar.

Kaskadisch angelegte Pflanzenstrecken mit Starkzehrern in einer Linie mit Pflanzen mit geringeren Nährstoffansprüchen könnten einen Teil der Probleme lösen und sollen in künftigen Untersuchungen am hier beschriebenen System getestet werden. Als weiterer vielversprechender Ansatzpunkt könnte ein energetisch optimiertes Membranverfahren dienen, mit dem Aquakultur-Prozesswasser für die pflanzliche Nutzung aufkonzentriert und abgetrenntes "sauberes" Wasser in den Fischkreislauf zurückgegeben wird. Auch dieser technische Ansatz soll zeitnah mit der hier beschriebenen Anlage zur Weiterentwicklung und zum Praxistest aufgegriffen werden. Schließlich ist auch der Verbleib erheblicher Mengen von Phosphor in den Absetzschlammern der Aquakulturen ein ökologisch unzureichend gelöstes Problem, dem mit einem innovativen Reaktor-Verfahren zur Remineralisierung der Nährstoffe im Schlamm sowie zur Reduktion des Schlammvolumens begegnet werden kann. Auch dieser Ansatz wird zeitnah in der hier beschriebenen Anlage aufgegriffen werden, ebenso wie die weiterführende Idee, dabei entstehende flüchtige Fettsäuren als Nährstoffe für Bakterienkulturen für Denitrifikationssysteme einzusetzen und so deren Effizienz weiter zu erhöhen.

5.2 Pflanzenschutz

5.2.1 Vorbemerkung

Konzepte der vertikalen bzw. der "In-door"-Landwirtschaft, zu der auch gebäudebasierte Aquaponik-Systeme zählen, werden von manchen ihrer Vertreter oft damit beworben, dass auf Pflanzenschutzmaßnahmen dank eines geschlossenen Systems ohne Eintrag von Schadorganismen verzichtet werden könne. Grundsätzlich bedeutet aber jede wirtschaftliche Erzeugung von Nutzpflanzen oder Produkten aus Nutzpflanzen eine Konzentration der Pflanzen auf möglichst kleinem Raum unter möglichst kontrollier- und steuerbaren Bedingungen. Aus dieser Notwendigkeit heraus sind die diversen Ackerbau- und Bewirtschaftungssysteme entwickelt worden. Dies gilt sowohl für den klassischen Ackerbau unter Freilandbedingungen als auch für Anbausysteme unter kontrollierten Bedingungen wie im Gartenbau „unter Glas“ (Kulturen in Gewächshäusern aus Glas, Plastik oder anderen Witterungsschutzmaterialien). Unabhängig von der Tatsache, ob die Kulturen im Freiland oder unter Glas kultiviert werden, stellen sie Monokulturen mit allen daraus resultierenden Möglichkeiten und Problemen dar.

Zu den grundlegenden Problemen von Monokulturen gehört die oft erhöhte Anfälligkeit gegenüber Schaderregern. Diese unterteilen sich in die Gruppe der mikrobiellen Schaderreger wie Pilze, Bakterien und Viren sowie in die Gruppe der Schädlinge, in der alle Insekten und ggf. warmblütige Organismen zusammengefasst werden, die den Ertrag der Kulturpflanzen reduzieren können. Um die Schädwirkung der Schaderreger zu minimieren, sind diverse Verfahren entwickelt worden. Chemische Pflanzenschutzmittel zum Einsatz gegen pilzliche Schaderreger und gegen Schadinsekten sind grundsätzlich Teil des Instrumentariums. Sie zeichnen sich in aller Regel durch eine hohe Verträglichkeit bei sachgerechter Anwendung in den Kulturpflanzen und eine hohe Effizienz in der Bekämpfung der Ziel- bzw. Schadorganismen aus. Um die Wirksamkeit zu gewährleisten, sind allerdings umfangreiche, kostspielige und langwierige Studien erforderlich. Diese Studien enthalten nicht nur Aussagen bezüglich der gewünschten Wirkung, sondern auch Informationen über unerwünschte sog. „Nebenwirkungen“ auf andere, sogenannte Nicht- Zielorganismen. Einige dieser Nebenwirkungen beziehen sich auf Fische und sogenannte Fischnährtiere. Dabei wird in der Regel die Nebenwirkung auf Fischnährtiere besser untersucht und dokumentiert als die direkte Wirkung auf Fische.

Ein weiteres Problem bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln kann ferner die Anreicherung von Wirkstoffen oder von Abbauprodukten im Organismus anderer Tiere, z. B. Fischen, sein. Dies geschieht, wenn der Wirkstoff oder seine Abbauprodukte in nicht tödlichen (subletalen) Dosen aufgenommen, nicht oder nur sehr langsam abgebaut und somit im Gewebe der Fische angereichert wird.

Im kommerziellen Unterglasanbau werden, i.d.R. nach Schadschwellenprinzip, eine Reihe von Pflanzenschutzmitteln eingesetzt, welche sich meist gegen pilzliche Schaderreger (Botrytis, echte und falsche Mehltäupilze, Sclerotinia, Fusarien u. ä.) sowie gegen Schadinsekten (Blattläuse, Raupen und andere Larven, Käfer u. ä.) richten. Diese sind auf ihre Wirksamkeit und auf ihr Abbauverhalten untersucht und stellen nach aktuellem Kenntnisstand bei sachgerechter Anwendung keine Gefahren für den Endverbraucher dar. Werden solche Pflanzenschutzmittel jedoch in kombinierten Systemen wie der Aquaponik eingesetzt, ergeben sich eine Reihe von Problemen. Aus den o.g. Studien zur Fisch- und Fischnährtier-Toxizität der eingesetzten Mittel ist von negativen Auswirkungen auf die Fischgesundheit sowie von einer Anreicherung von Wirkstoffen und Abbauprodukten auszugehen, die Qualität und Lebensmittelsicherheit der Endprodukte in Frage stellen.

Umgekehrt werden Fische in den Aquakultur-Abteilungen von Aquaponik-Systemen gleichfalls in "Monokulturen" gehalten und sind daher ebenso einem erhöhten Krankheits- und Schädlingsdruck ausgesetzt. Auch diesen kann in reinen Aquakultursystemen durchaus effektiv und ohne qualitativen Schaden für die Fische mit zugelassenen Medikamenten und Desinfektionsmitteln begegnet werden. In gekoppelten Systemen können diese Mittel jedoch ebenso unerwünschte Nebenwirkungen und Anreicherungen in den Nutzpflanzen nach sich ziehen.

5.2.2 Erfahrungen am Soester Pilotsystem

Aus den o.g. Gründen war ein wesentlicher Aspekt begleitender Untersuchungen zum Pilotbetrieb die Suche nach Methoden und Produkten, die die Gesundheit von Fischen oder Pflanzen wieder herstellen oder erhalten, ohne dem jeweils anderen Teil des Systems Schaden zuzufügen. Zu diesem Zweck diente im bisherigen Projektzeitraum als Fischart der Europäische Wels (*Silurus glanis*) und als Modellorganismus Pflanze ein schnell wachsender Blattsalat (*Lactuca sativa* var. *capitata* „Salanova“). Diese Salate haben den Vorteil, dass sie relativ wenig krankheitsanfällig sind und ihre potentiellen Schadpilze und Insekten mit gut verträglichen, ökologischen Präparaten behandelt werden können, die auch den Fischen nicht schaden. Denn es gibt derzeit keine Produkte, weder für die Behandlung von Fischen noch für Pflanzen, die über eine Zulassung für beide „Produktgruppen“ Fisch und Pflanzen verfügen. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, denn die Probleme der Gesunderhaltung von Fisch und Pflanze im Zusammenspiel sind bei weitem nicht gelöst.

In der aktuell verfügbaren Literatur wird bisher kaum über Schädlinge in Aquaponik-Systemen berichtet; es wird im Gegenteil sogar von vielen Autoren die These vertreten, dass Aquaponik-Systeme aufgrund ihrer Konzeption Krankheits- und Schädlingsbefall verhindern würden. Dies wird mit der „Mikrobiota“, also dem komplizierten Zusammenspiel von Mikroorganismen innerhalb des Gesamtsystems, begründet. So werden vor allem diverse Bakterienstämme dafür verantwortlich gemacht, einen Krankheitsbefall insbesondere der Wurzeln von (Salat)Pflanzen durch kompetitive Effekte oder direkte fungizide Wirkungen zu verhindern. Diese Effekte sollen sich auch auf die Blätter und Früchte der Pflanzen auswirken und so einen Krankheits- oder Schädlingsbefall erst gar nicht möglich machen.

Tatsächlich zeigte sich auch im Testbetrieb der Soester Pilotanlage, die zunächst noch nicht im Vollkreislauf betrieben wurde, dass Pflanzenkrankheiten kaum auftraten und somit kaum ein Problem darstellten. Gleiches galt aber auch für die Kontrollpflanzen, die unter praxisüblichen Hydroponik-Bedingungen kultiviert wurden. Allerdings wurde in beiden Fällen ein sehr ernstzunehmender Insektenbefall festgestellt. Insbesondere Blattläuse, Raupen und Minierfliegen stellten ein ernsthaftes Problem dar. Auch Spinnmilben traten auf, konnten aber durch den Einsatz ihrer natürlichen Feinde (Raubmilben als biologischer Pflanzenschutz) erfolgreich bekämpft werden. Die Schäden durch Raupen und Minierfliegen konnten durch ein (wenn auch eher praxisfernes) manuelles Absammeln der Tiere minimiert werden. Da die Bedrohung des Versuchs durch Blattläuse bestandsgefährdend wurde, wurde im ersten Versuchsdurchgang (ohne Rückführung des Prozesswassers in das Aquakultursystem) mit einem selektiv wirkenden Insektizid (Pirimor) behandelt. Diese Maßnahme verbietet sich jedoch in rezirkulierenden Aquaponiksystemen, da das o.e. Produkt als „sehr giftig für Wasserorganismen“ klassifiziert ist. In reinen Hydroponik-Systemen könnte es dagegen angewendet werden.

Auch wenn bei der Bekämpfung und Vermeidung von Schadinsekten nur mit Methoden des ökologischen Pflanzenschutzes gearbeitet wird, können sich Probleme bei der Vermarktung der Produkte ergeben. Wenn dabei natürlichen Gegenspieler eingesetzt und aktiv und oft in größerer Zahl in die Bestände eingebracht werden, werden immer „Rückstände“ auf den Pflanzen zurückbleiben, z.B. tote Hüllen der Schädlinge oder Eier, Larven oder adulte Tiere der Gegenspieler. Leider unterscheidet der Konsument an dieser Stelle nicht zwischen „gut“ und „böse“, sondern sieht nur „Tierchen“, die nicht in oder auf das Produkt gehören. Somit stellt sich die Frage nach der Einsetzbarkeit von biologischen Gegenspielern in der Insektenbekämpfung immer auch mit Blick auf das zu vermarktende Produkt. Auch an diesem Punkt sollten weitere Forschungsaktivitäten ansetzen, die nicht nur auf die Vermeidung von Schäden bzw. Schadinsekten in den Kulturen, sondern auch auf eine hohe Produktqualität in Hinblick auf die Vermarktbarkeit abzielen.

Unterschiede in der Krankheitsanfälligkeit zeigten sich in diversen Kleinversuchen mit Salatpflanzen, in denen das Pflanzenwachstum im Aquaponik-Prozesswasser und in praxisüblichen Hydroponik-Nährlösungen mit unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen verglichen wurde. Bei natürlich erfolgten Infektionen mit Schaderregern wie Ephemem Mehltau, Sclerotinia-Welke oder Grauschimmelfäule erkrankten die Pflanzen, die mit Aquakultur-Prozesswasser kultiviert wurden, so gut wie nie. Diese ersten Resultate wer-

den im Anschluss an das Pilotprojekt aktuell in Studien, bei denen Salatpflanzen künstlich und reproduzierbar mit Schadpilzen infiziert werden, überprüft.

Ob und in welchem Ausmaß die o.e. „Mikrobiota“ an der Gesunderhaltung von in Aquakultur-Prozesswasser kultivierten Pflanzen beteiligt ist, soll in Kürze in weiterführenden Versuchen untersucht werden. Hierzu werden Mikroorganismen mit bekanntermaßen schützenden Effekten (*Bacillus* spp., *Trichoderma* spp.) an die Pflanzen gebracht und diese anschließend gezielt mit Schadpilzen infiziert. In Kooperationen mit anderen europäischen Forschergruppen im Rahmen des Netzwerkprojekts COST " The EU Aquaponics Hub" (vgl. Einführung) wird diese Fragestellung bereits verfolgt. Hierbei geht es zunächst um die Identifizierung der positiv wirkenden Mikroorganismen im Aquaponik-Wasser und anschließend um die Effektivität und die Einsatzmöglichkeiten dieser Mikroorganismen als Pflanzenschutzmaßnahme in Aquaponik-Systemen.

Ebenfalls aus der erwähnten COST-action heraus wurde vor kurzem in Kooperation mit der Universität Liège in Gembloux (Arbeitsgruppe Prof. Haissam Jijakli) eine Plattform geschaffen mit dem Ziel, alle Erfahrungen und Kenntnisse mit Bezug zu Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz in Aquaponik-Systemen zu bündeln. Die Daten sollen auf wissenschaftlicher Basis ausgewertet werden, um mögliche praktische Hinweise und Handreichungen zum Pflanzenschutz in Aquaponik-Systemen zu entwickeln.

6 Marktpotenzial

6.1 Abschätzung der Verbraucherakzeptanz und Zahlungsbereitschaft

6.1.1 Vorbemerkung

Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen und gesellschaftlichen Trends zu bewussterer Ernährung und Nachhaltigkeit ist zu untersuchen, ob Verbraucher bzw. Bürger Aquaponik-Produktionssysteme als nachhaltig und tiergerecht beurteilen und die darin erzeugten Produkte als qualitativ hochwertige (regionale) Frischeprodukte wertschätzen würden. In einer zweiten Stufe ist dann die Frage nach der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft zu stellen, die letztendlich den Produktpreis und damit auch die potenzielle Wirtschaftlichkeit von Aquaponik-Anlagen bestimmt.

Da bisher kaum Veröffentlichungen zu diesem Themenkomplex vorliegen, wurde im Rahmen des Projektes eine Untersuchung in kleinem Maßstab exemplarisch an zwei Produkten des Europäischen Wels' aus der Soester Pilotanlage vorgenommen, um Zahlungsbereitschaften und deren mögliche Einflussfaktoren zu ermitteln.

6.1.2 Erzeugerpreisniveau bestehender kommerzieller Anlagen

Frisches Fischfilet vom Afrikanischen Wels aus niederländischen oder deutschen Kreislaufanlagen wird Einzelbeobachtungen zu Folge zu Verbraucherpreisen ab 11,50 €/kg (Edeka-Sonderangebotsaktion Oktober 2016) bis zu 19 €/kg (Marktstand) angeboten. Dabei wird i.d.R. nicht oder nur "zurückhaltend" zum Einen auf die genaue Art (*Clarias gariepinus*) und zum anderen auf die Herkunft aus Aquakulturen hingewiesen, aber das Fischfilet als "grätenarm" und "festfleischig" beworben.

Für Europäische Welse aus regionaler Erzeugung, die meist lebend vermarktet werden, liegen Preise bei etwa 6 € je kg Lebendgewicht, was bei einer mittleren Ausschachtung rund 14 €/kg Filet entsprechen würde. Geräucherte Ware ist preislich ähnlich positioniert. Die Praxis vermarktet Europäische Welse abhängig von individuellen Kundenwünschen mit Lebendgewichten zwischen 1.200 g und 4.000 g; als "ideales Schlachtgewicht" gelten 2.000 g.

Die wenigen bisher bestehenden kommerziellen Aquaponikanlagen bieten dagegen überwiegend Tilapien (aus den Tropen und Subtropen stammende Buntbarsche, *Oreochromis* spp., *Tilapia* spp.) an, die als robuste Allesfresser im Vergleich zu Welsen einfacher und kostengünstiger zu halten sind. Endverbraucherpreisvorstellungen für Tilapia aus Aquaponik lagen in Basel bei 20 €/kg Lebendgewicht (ausgenommener ganzer Fisch; Mündliche Aussage Urban Farmers April 2015) und in Berlin (Mündliche Aussage ECF November 2014) zunächst bei 15 €/kg Lebendgewicht, betrug aber nach Anlaufen der Anlage dann knapp 12 €/kg ganzer Fisch mit Kopf (Preisauszeichnung ECF 2016). Diese Preise würden in Basel 47 €/kg Barschfilet und in Berlin gut 28 €/kg Barschfilet entsprechen (zu den Preisvorstellungen der Wels-Aquaponik-Anlage in Waren/Müritz lagen bei Redaktionsschluss noch keine Angaben vor). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Anlage von ECF in Berlin als auch jene der Urban Farmers AG in Basel mit ihren innerstädtischen Anlagen auf besonderen Standorten operieren, als technologische "Frontrunner" das innovative Aquaponik-Konzept als Business-Modell der Urbanen Landwirtschaft äußerst geschickt im Marketing einsetzen und in ihrem hochurbanen Umfeld eine sehr kaufkräftige, an Nachhaltigkeit, lokaler Herkunft, besonderer Frische, sehr kurzen Wegen und an Exklusivität interessierte Kundschaft direkt oder über die gehobene Gastronomie ansprechen können. Diese Erfolgsfaktoren lassen sich kaum auf Standorte im Ländlichen Raum Nordrhein-Westfalens übertragen und dürften auch nur an wenigen ausgewählten urbanen Spitzenlagen in diesem Bundesland gegeben sein.

6.1.3 Befragung beim Fachsymposium Soest

Im Rahmen eines Fachsymposiums zur Aquaponik-Anlage des Fachbereichs Agrarwirtschaft in Soest wurde im Dezember 2015 eine selbstadministrierte Paper-Pencil-Befragung durchgeführt. Der zweiseitige Fragebogen enthielt Fragen zur Geschmacksbeurteilung der verköstigten Welsproben und allgemeine Kriterien zum Fischeinkauf. Beides wurde auf 5-stufigen Likertskalen gemessen. In der Auswertung wurde Äquidistanz der Skalen unterstellt, so dass eine Umrechnung in Zahlenwerte erfolgen konnte. Die Zahlungsbereitschaften wurden gestützt in 0,30 €/100 g-Schritten zwischen 0,60 €/100 g und 3,30 €/100 g für frischen und geräucherten Wels abgefragt und den Klienten dazu zur besseren Orientierung Vergleichspreise für alternative Fischprodukte und deren Herkunft genannt (z.B. Alaska-Seelachsfilet tiefgekühlt / Discounter / aus Fischfang 1,15 €/100g oder Schwertfischfilet frisch / Fischfachgeschäft / aus Fischfang 2,88 €/100g usw.). Zusätzlich wurden Geschlecht, Geburtsjahr

und Beruf als sozio-demografische Variablen erhoben. Die Daten wurden anhand einfacher deskriptiver Statistiken ausgewertet. Mittelwerte (μ) wurden als Lageparameter und Standardabweichungen (σ) als Streuungsparameter gewählt. Zusätzlich wurde für kontinuierliche Variablen der Korrelationskoeffizient herangezogen, um die Stärke des Zusammenhangs zu ermitteln. Durch unvollständige Angaben variiert die Stichprobengröße je nach Auswertung.

- Zahlungsbereitschaften in Abhängigkeit von sozio-demografischen Merkmalen

Insgesamt hatten 28 Personen an der Befragung teilgenommen. Die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft für frischen Wels lag bei knapp 1,90 €/100g und die für geräucherten Wels um knapp 20% höher bei etwas mehr als 2,20 €/100g. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über das Geschlechterverhältnis in der Stichprobe und die zugehörigen Zahlungsbereitschaften. Frauen geben demnach bei einer etwas größeren Streuung im Mittel etwas höhere Zahlungsbereitschaften an als Männer.

Tabelle 8 Zahlungsbereitschaften für frischen und geräucherten europäischen Wels in Abhängigkeit vom Geschlecht in €/100g

	N	Frisch		Geräuchert	
		μ	σ	μ	σ
Frauen	13	1,95	0,67	2,33	0,58
Männer	13	1,80	0,40	2,13	0,49
Gesamt	26	1,88	0,56	2,24	0,54

Anmerkung: μ stellt den Mittelwert, σ die Standardabweichung dar

Da eine große Mehrheit der Befragten aus der Agrarbranche stammt, hat die Variable Berufs- und Bildungshintergrund wenig erklärende Kraft. Der Zusammenhang zwischen Alter und Zahlungsbereitschaften lag bei einem Korrelationskoeffizienten von -0,23 für frischen Wels und bei -0,13 für geräucherten Wels.

- Zahlungsbereitschaften in Abhängigkeit vom Geschmack

Einen klaren Zusammenhang ergab sich zwischen der durchschnittlichen Geschmacksbeurteilung und den Zahlungsbereitschaften, die umso höher angegeben wurden, je positiver die Geschmacksbeurteilung ausfiel (vgl. Tabelle).

Tabelle 9: Zahlungsbereitschaften für frischen und geräucherten europäischen Wels in Abhängigkeit von der Geschmacksbeurteilung bei der Produktverköstigung in €/100g

Geschmacksnote	N	μ	σ
(1=sehr gut; 5=gar nicht)		Frisch	
1	7	2,00	0,50
1,5	10	1,88	0,48
2	6	1,78	0,82
2,5	1	1,70	-
Gesamt frisch	24	1,88	0,56
(1=sehr gut; 5=gar nicht)		Geräuchert	
1	7	2,39	0,63
1,5	10	2,25	0,50
2	6	2,07	0,57
2,5	1	2,00	-
Gesamt geräuchert	24	2,24	0,54

Anmerkung: μ stellt den Mittelwert, σ die Standardabweichung dar

- Zahlungsbereitschaften für frischen und geräucherten Wels

Der Zusammenhang zwischen den Zahlungsbereitschaften für die beiden Produkte frischer und geräucherter Wels ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

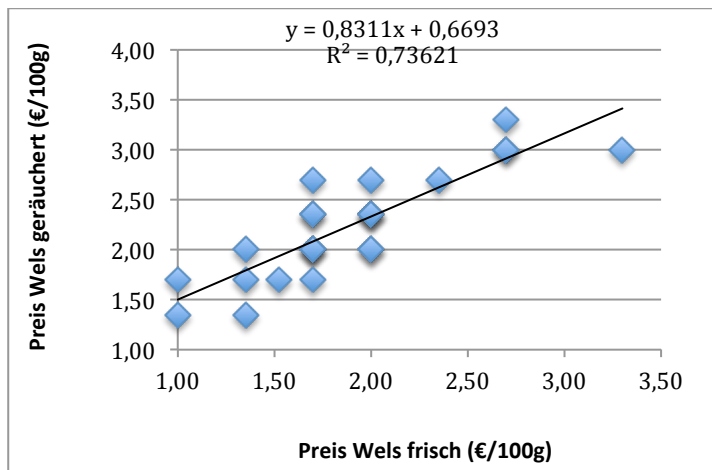


Abbildung 4 Abhängigkeit der Zahlungsbereitschaften für frischen und geräucherten Wels

Mit der vorliegenden Pilotuntersuchung wurden erstmals Werte für mögliche Zahlungsbereitschaften für Fischprodukte aus Aquaponik-Anlagen vorgelegt. Es zeigten sich dabei deutliche Zusammenhänge zwischen der Art der Verarbeitung bzw. zwischen der geschmacklichen Beurteilung bei der Verkostung und der jeweiligen Zahlungsbereitschaft. Dies weist darauf hin, dass der Verarbeitung und sensorischen Produktqualität im Herstellungsprozess erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen ist, wenn hohe Zahlungsbereitschaften erzielt werden sollen.

Der enge Zusammenhang der Zahlungsbereitschaften für frische und geräucherte Produkte lässt vermuten, dass ähnliche Einflussfaktoren bei beiden Formen der Verarbeitung eine Rolle spielen. Allerdings lassen sich zwei Konsumentensegmente differenzieren: Kunden mit einer stärkeren Präferenz für geräucherten Wels (oberhalb der Regressionslinie in der oben gezeigten Abbildung) und diejenigen Konsumenten, die eine stärkere Präferenz für frischen Wels aufweisen (unterhalb der Regressionslinie). Unterschiedliche Marketingstrategien ließen sich darauf aufbauen.

Einschränkend sollte für diese Untersuchung beachtet werden, dass die Ergebnisse kaum zu verallgemeinern sind. Hierfür ist eine größere, auf eine bestimmte Zielgruppe angelegte repräsentative Stichprobenziehung nötig. Auch

sollte das Erhebungsinstrument zur Erfassung der Zahlungsbereitschaft validiert werden, um üblicherweise auftretende hypothetische Verzerrungen bei Zahlungsbereitschaftsabfragen zu verringern. Ein Zentralitätseffekt scheint eine Rolle zu spielen, da beide mittlere Zahlungsbereitschaften auch jeweils im mittleren Bereich der im Erhebungsinstrument vorgegebenen Spannweite liegen. Das weist darauf hin, dass klare Beurteilungskriterien für eine belastbare Angabe der Zahlungsbereitschaft bei den Befragten eher nicht vorlagen und die Zahlungsbereitschaften situativ angegeben wurden.

Mit der vorgestellten Untersuchung als Grundlage für Preistendenzen besteht trotz aller methodischen Mängel die Möglichkeit, erste annähernde Wirtschaftlichkeitsanalysen für Aquaponik-Anlagen durchzuführen, vorausgesetzt die Kosten in Produktion und Distribution können entsprechend abgeschätzt werden. Hier sollten auch weitere Untersuchungen zur Zahlungsbereitschaft ansetzen, die stärker explizit differenzierte Prozessqualitäten, Herkunft und Verkauf-Settings der Fischprodukte betrachten sollten.

6.1.4 Kommunikation des Produktionsverfahrens

Eine weitere Schwierigkeit für das Aquaponik-Marketing, die sich bei der o.g. Testerhebung in Soest bestätigte, ist die Vermittlung der Nachhaltigkeit dieses Konzepts. Dazu muss in der Regel interessierten Verbrauchern das gesamte Verfahren erläutert und zudem begründet werden, warum die Pflanzen nicht in der Erde und die Fische nicht in freiem Gewässer gehalten werden. Die Mehrheit der Verbraucher lässt sich den Erfahrungen der Soester Mitarbeiter im Rahmen von zahlreichen Führungen zufolge nach ausführlicher Darlegung der Vorteile bezüglich Kreislaufgedanken und Ressourceneffizienz von Aquaponik überzeugen, und ist auch bereit, nach entsprechenden Erläuterungen die Haltung der Fische im Tank als tiergerecht zu akzeptieren. Dieser hohe kommunikative Aufwand erschwert es allerdings, Waren über Zwischenhändler zu vermarkten, während im Direktabsatz keine Probleme zu erwarten sind.

Obwohl das Konzept keinen Einsatz von Antibiotika oder chemischen Pflanzenschutzmitteln gestattet, ist es nicht als Verfahren des Ökologischen Landbaus anerkannt und folglich von einer entsprechenden Zertifizierung ausgeschlossen. Sollte sich Aquaponik als Verfahren breiter etablieren können, wäre dringend eine geeignete alternative Form der Nachhaltigkeitszertifizierung anzustreben oder ggf. sogar neu zu entwickeln. Auch bodenlose Gartenbauverfahren, die auf chemischen Pflanzenschutz verzichten, oder nachhaltig betriebene Kreislaufaquakulturen könnten von so einem Ansatz profitieren.

7 Ressourcenansprüche, Kosten und Wirtschaftlichkeit

7.1 Zur Methodik

Betriebsdaten aus der Praxis lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts aus dem Pilotbetrieb der Soester Anlage vor und wurden durch Informationen der seit mehr als 15 Jahre laufenden Aquakultur des Partnerbetriebs Schulte sowie mit Recherchen und Auskünften anderer Partner ergänzt. Belastbare Aussagen können somit für das Pilotsystem getroffen werden, während die Aussagen für größere Systeme auf Modellrechnungen mit zahlreichen Annahmen beruhen und deshalb als Tendenzaussagen einzuschätzen sind.

Bei den Modellrechnungen zur Wirtschaftlichkeit wurden drei Anlagengrößen betrachtet: ein **Mikrosystem** in der Größe der vorhandenen Soester Anlage, ein technisch gesehen baugleiches **Kleinsystem** mit zehn anstelle von nur drei Fischtanks sowie eine **Produktionsanlage** in einer für eine Direktvermarktung realistischen kommerziellen Größenordnung mit einem Aquakulturvolumen von 300 m³.

Die technischen und ökonomischen Daten der "virtuellen" Kleinanlage waren vergleichsweise einfach aus den Praxisdaten der existierenden Soester Mikroanlage abzuleiten, da bei jener viele Komponenten auf eine deutlich größere Produktionskapazität ausgelegt wurden. Es ist mit vergleichsweise geringem zusätzlichen Investitionsaufwand möglich, das Mikrosystem zu einem Kleinsystem mit deutlich höherer Kapazität zu erweitern.

Die "virtuelle" Produktionsanlage ist auf eine Größenordnung skaliert, die für den Betrieb der Aquakultur ungefähr eine Vollzeit-Arbeitskraft erfordert. Für den Betrieb der Hydrokultur sind fünf bis sechs Arbeitskräfte notwendig. Es sollte möglich sein, für die Aquakultur einen qualifizierten Fischwirt und für die Hydroponik einen qualifizierten Gärtner einzustellen, welcher durch vier bis fünf Helfer unterstützt wird. Es wurde die Annahme getroffen, dass sich die Arbeitskräfte der beiden Teilbereiche gegenseitig in Spitzenzeiten unterstützen und ggf. wechselseitig vertreten.

Für die Dimensionierung der Hydroponik-Abteilung wurde aus der erzielbaren Produktionsmenge der Aquakultur die im Prozesswasser verfügbare Menge an Nitrat berechnet und davon abgeleitet die durchschnittliche pflanzliche Produktion geschätzt, die ganzjährig damit realisiert werden könnte. Für drei

Monate des Jahres wurde pro Tag eine Zusatzbeleuchtung der Kulturen von zwei Stunden pro Tag unterstellt.

7.2 Direkt- und Arbeitskosten der Aquakultur

Wesentlicher Ressourcenaufwand sowie Kostenpositionen stellen in der Aquakultur die Fütterung, die Energieversorgung für Heizung, Frischwassererwärmung und Pumpenstrom, weitere Betriebsmittel und Arbeit dar.

7.2.1 Besatz

Die Besatzkosten in der Modellrechnung wurden aus den realen Besatzkosten der Forschungsanlage und aus Angaben des Kooperationspartners sinnvoll abgeleitet. Die unterschiedlichen Abnahmemengen wurden mit entsprechenden Annahmen für Mengenrabatte berücksichtigt. Für den Transport der Besatzfische wurde eine Transportpauschale veranschlagt, die in der Praxis durch die tatsächliche Entfernung zum Lieferanten bestimmt werden wird.

Insbesondere in der Startphase eines Besatzes, aber auch im regulären Betrieb kommt es zu Verlusten im Bestand. Für die Modellrechnung wurde mit einem Verlust von 10% pro Durchgang kalkuliert, der konzeptionell mit einer Überbestückung bei Startbesatz kompensiert wird. Der Verlust geht somit rechnerisch in die Besatzkosten ein, mindert aber nicht die Anlagenauslastung und Erntemenge.

Die Verfügbarkeit von Besatzfischen ist für einen Betrieb ein erfolgsentscheidendes Kriterium, das die Auswahl der Fischart signifikant einschränken kann. Die Besatzfische der Versuchsanlage wurden vom Welszuchtbetrieb Schulte geliefert, der wiederum zwei unabhängige Lieferanten für seine Besatzfische hat.

7.2.2 Anlagenauslastung

In der Anfahrphase einer Anlage ist mit deutlichen Anfahrverlusten zu rechnen. Die Biologie des Biofilters muss sich erst bilden und einstellen, was zu erhöhtem Stress durch hohe Ammonium- und Nitritwerte bei den Fischen führen kann. Handhabungs-, Material- und kleinere konzeptionelle Fehler, die erst behoben werden müssen, sind nicht unüblich.

Da die Produktion gestaffelt gefahren wird, um einen möglichst gleichmäßigen, kontinuierlichen Betrieb zu etablieren, wird der Erstbesatz beim Anfahren der Anlage stufenweise aufgebaut. Zahl und Größe der Stufen hängt unmittelbar von Größe und Anzahl der Fischtanks, sowie von der Jungfischverfügbarkeit ab, und wird mittelbar durch das durch das Auseinanderwachsen notwendige Durchfischen und Sortieren beeinflusst. Durch den stufenweisen Aufbau des Bestandes kommt es erfahrungsgemäß in den ersten Durchgängen zu einem deutlichen Minderertrag bezogen auf die nominelle Anlagenkapazität.

Verluste und Mindererträge durch die Anfahrphase wurden in der Modellrechnung nicht berücksichtigt. Es wurde von einem stabilen, eingefahrenen Betrieb ausgegangen. Nach Aussagen von Fischerei-Experten des LANUV und des Ministeriums gehen die Erfahrungen aus der Praxis jedoch dahin, dass neue Anlagen in den ersten Jahren nur ca. 10% - 30% der maximal möglichen Biomasse produzieren. Im stabilen Betrieb werden Kreislaufanlagen bei ca. 70% - 80% ihrer Kapazität betrieben. In der vorliegenden Betrachtung wurde eine hohe Auslastung der Anlage angenommen; die errechneten Werte zur Wirtschaftlichkeit stellen somit eine Abschätzung nach oben dar.

7.2.3 Fütterung

Die Welse wurden mit Futter des Typs *Ivory X* des Unternehmens Aller Aqua gemästet, das einen sehr hohen Proteingehalt von ca. 55% besitzt. In größeren Mengen ist es für 1,30 €/kg netto zu erstehen, ab einer Menge von 6 t lieferkostenfrei. Für kleinere Lieferungen muss ein Mindermengenaufschlag sowie Fracht bezahlt werden, so dass Futterkosten von ca. 1,60 €/kg pro entstehen. Europäische Welse verfügen über eine sehr gute Futtermittelverwertung mit einem Koeffizienten unter 1. In der Praxis werden Futtermittelverwertungen mit Koeffizienten um 0,8 realisiert (= 1 kg Gewichtszunahme im Bestand mit 0,8 kg Futter). Eine Reduzierung der Futterkosten ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, denn die Mastleistung hängt in sehr hohem Maße von der Qualität der eingesetzten Futtermittel ab. Eine Substitution hochwertiger Proteine tierischer Herkunft durch potentiell kostengünstigere pflanzliche Proteine ist Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Das Optimierungspotential ist allerdings begrenzt; so kostet beispielsweise handelsübliches pflanzenbasiertes Karpfenfutter ca. 1,10 €/kg.

7.2.4 Pumpstrom

Die im Soester Mikrosystem installierte Hauptkreislaufpumpe ist für das vorhandene Fischtankvolumen überdimensioniert. Dies gilt auch für andere Komponenten der Anlage. Die Überdimensionierung ist der geringen zur Verfügung stehenden Experimentalfläche geschuldet. Mit der installierten Ausstattung wäre es mit leichten Modifikationen und dem Einsatz von zusätzlichen Fischtanks voraussichtlich möglich, eine Anlage mit neun bis zehn Fischtanks in der gleichen Größe wie der aktuell eingesetzten drei Tanks zu betreiben.

7.2.5 Heizung

Die Aquakultur im Soester Mikrosystem wird gleichzeitig über die Sumpftankheizung und über die im Gewächshausabteil vorhandene Raumheizung beheizt. Das Hydroponik-Abteil wird über eine Raumheizung beheizt; beide Raumheizungen werden über das Nahwärmenetz der Fachhochschule gespeist. Eine vollständige Erfassung der Heizkosten war aus mehreren technischen Gründen nicht möglich; es wurde daher eine vereinfachte Wärmemengenabschätzung nach Angaben der KTBL-Datenbanken vorgenommen. Diese wurden leicht modifiziert auch für die Aquakultur verwendet.

Kopfsalat ist vergleichsweise kältetolerant. Solange die Wurzeltemperaturen den Bereich von 18°C nicht unterschreitet, kann die Lufttemperatur im Gewächshaus bis auf 10°C oder tiefer abgesenkt werden, was den Heizenergiebedarf signifikant senkt. Andere Pflanzen haben andere Anforderungen an die Kulturbedingungen, so dass eine Übertragung der berechneten Ergebnisse auf andere Kulturen und Betriebsbedingungen nicht ohne weiteres möglich ist. Grundsätzlich wird eine Vorhersage von Energieverbräuchen in Gewächshäusern im Einzelfall als schwierig eingeschätzt (Belau T., KTBL Gartenbau 2009 S.84). Prinzipbedingt ist aber die Kultivierungsform der Hydroponik recht gut dafür geeignet, solare Wärmeenergie oder Niedertemperaturabwärme aus industriellen Quellen einzuspeisen. Weitere Ansätze zur Heizenergieeinsparung wurden im Rahmen des Vorhabens „Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus“ entwickelt und dokumentiert (Tantau H.-J., KTBL 2015).

Für die Wärmeversorgung des größer skalierten Produktionsanlage wurde ein reduzierter Wärmepreis im Vergleich zum Mikro- und Kleinsystemen angenommen. Dieser kann entweder durch Großabnehmerverträge mit einem Gasversorger, durch Abwärmenutzung oder durch den Einsatz eines BHKWs zustande kommen. Auf eine detaillierte Berechnung des Einsatzes eines BHKWs mit Spitzenlastkessel wurde wegen der zahlreichen Berechnungspara-

meter verzichtet. Je nach Konzeption könnte beispielsweise für ein BHKW ein Kraft-Wärme-Koppelungsbonus in Anspruch genommen und die Mineralölsteuer erstattet werden.

7.2.6 Frischwassererwärmung

Der Energieverbrauch der Frischwassererwärmung konnte im vorhandenen Mikrosystem nicht durch eigenständige Messungen ermittelt werden, da eine Unterscheidung der für die Temperaturhaltung im Aquakultursystem benötigten Wärmemenge und der Wärmemenge für die Frischwassererwärmung technisch nicht vorgesehen ist. Die Frischwassererwärmung wurde daher aus der gemessenen Frischwassermenge und der zu überwindenden Temperaturdifferenz ermittelt.

7.2.7 Weitere Betriebsmittel und sonstige Kosten

Die Kosten der sonstigen Betriebsmittel wie H_2O_2 , Peroxyessigsäure, Kalk, Kalilauge etc. wurden aus den getätigten Käufen sinnvoll hochgerechnet. Wegen der geringen benötigten Mengen war der Bezug teilweise nur über hochpreisige Distributoren, wie zum Beispiel Aquaristikfachgeschäfte, möglich. In der Produktionspraxis würde man über sinnvolle Vorratshaltung und Mengenkäufe bessere Einkaufsbedingungen realisieren können. Dies wurde in den Schätzungen für die unterschiedlichen Anlagengrößen berücksichtigt.

Die Entsorgung von Schlachtabfällen ist über das Tierkörperbeseitigungsgesetz geregelt. In kleinen Mengen kann über die lokalen Dienstleister der Tierkörperbeseitigung kostenpflichtig entsorgt werden. Für größere Mengen sind im Bundesgebiet Abnehmer zu finden, die bei Lieferung frei Haus je nach Art der Abfälle zwischen 10 € und 20 € je t zahlen. Gegenzurechnender Kostenfaktor ist der Transport zum Verwerter, der gegebenenfalls durch Kooperation mit anderen Produzenten kostengünstig gestaltet werden kann. Im Schnitt kann für größere Produktionsanlagen mit einer kostenneutralen Entsorgung gerechnet werden.

In der Kalkulation wurden für die beiden Kleinanlagen Kosten von 40 € pro Durchgang berechnet; ein Preis der aus einer vorliegenden Preisliste des regionalen Entsorgers abgeleitet wurde. Für die größere Anlage wurde eine kostenneutrale Entsorgung angenommen.

Tiergesundheits- und Desinfektionskosten wurden ebenso wie sonstige variable Maschinenkosten mit Schätzwerten in die Kostenrechnung integriert.

7.2.8 Arbeitskosten

Für die betrachtete Mikro- und Kleinanlage wurde die manuelle Erledigung aller anfallenden Arbeiten unterstellt, was zu entsprechend hohen Arbeitsaufwänden führt. In größeren Anlagen können (teil-)automatisierte Vorrichtungen die Arbeitsvorgänge unterstützen und den Arbeitsaufwand spürbar verringern. Eine Sortiermaschine beispielsweise kann den zeitaufwändigen Vorgang der Durchfischung spürbar vereinfachen. Eine automatische Beschickung der Futterautomaten eliminiert einen weiteren Arbeitsgang und unterstützt darüberhinaus die Lagerung des Futters in einem Silo, das von anliefernden LKWs direkt beschickt werden kann. Weiterhin werden in größeren Anlagen automatisierte Systeme zur Anlagenüberwachung eingesetzt, sodass zeitaufwändiges, manuelles Messen der Wasserwerte entfällt.

Für die Lohnkosten in der Aquakultur wurde ein Stundensatz von 15 € Arbeitnehmer-Brutto angesetzt, der inklusive von 25 % Lohnnebenkosten zu einem Arbeitgeber-Brutto von 18,75 € führt. Nicht einberechnet sind Overheadkosten für die Lohnbuchhaltung sowie Ausfälle durch Weiterbildung, Krankheit und Schwangerschaft. Der kalkulierte Arbeitsaufwand sowohl für die Aquakultur- als auch für die Hydroponik-Abteilungen aller drei Anlagenvarianten ist in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10 Vergleich der Arbeitskosten

Arbeitskosten	Einheit	Mikro	Klein	Produktion
Arbeitskosten im Vergleich				
Arbeitszeit Aquakultur	Tage/Jahr	25	55	300
Lohnkosten Aquakultur	€/Jahr	3.705	8.198	45.000
Arbeitszeit Hydrokultur	Tage/Jahr	21	56	1.196
Lohnkosten Hydrokultur	€/Jahr	3.148	8.395	179.443
Summe Lohnkosten ohne Overhead	€/Jahr	6.853	16.593	224.443
Summe Arbeitszeit	Tage/Jahr	46	111	1.496
Anz. Personalstellen	-	0,21	0,5	6,8

7.2.9 Modell-Deckungsbeiträge

Die wichtigsten Parameter für die weiteren Berechnungen sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Dabei werden für die kommerzielle Produktionsanlage eine Rationalisierung der Arbeitserledigung und geringere Stückkosten angenommen. Bei der Vermarktung wurde von einer Direktvermarktung zu einem Erzeugerpreis am oberen Ende des Marktpreisspektrums ausgegangen.

Die potenziell erzielbaren Deckungsbeiträge der Aquakultur-Abteilungen der drei Anlagenvarianten sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Der am Markt beobachtete Endkundenpreis für Welsfilet lag zwischen 13 €/kg und 19 €/kg. Der Fisch wurde in der Regel als „Wels“ gekennzeichnet, ohne zwischen afrikanischem Wels und europäischem Wels zu unterscheiden. Die Kennzeichnung war gelegentlich durch die Verwendung der lateinischen Artbezeichnung, *Silurus glanis* beziehungsweise *Clarias gariepinus* fachlich und rechtlich einwandfrei, durch die Verwendung des Oberbegriffes „Wels“ jedoch nicht transparent für die Kunden.

In der Modellrechnung wurde für die große Anlage von einem Erzeugerpreis für Filet von 18,80 €/kg brutto ausgegangen, der durch die Direktvermarktung der sehr nachhaltigen Produktionsmethode erzielt werden soll. Diese Preiseinschätzung wurde aus der Verbraucherbefragung übernommen. Von anderen kommerziellen Aquaponikprojekten ist bekannt, dass diese ebenfalls Erzeugerpreise zum Teil deutlich über dem üblichen Marktniveau erzielen können. So liegt beispielsweise der Erzeugerpreis für Tilapa bei einem Produktionssystem der Urban Farmers in Den Haag bei ca. 30 €/kg Filet, weit über den marktüblichen Preisen von ca. 12 € bis 16 € je kg.

Tabelle 11 Wichtige Parameter zur Berechnung der Deckungsbeiträge der Aquakultur

Parameter Deckungsbeitrag Aquakultur				
Parameter	Einheit	Mikro	Klein	Produktion
Wassermenge	L	3.000	10.000	300.000
Produktionsdauer pro Durchgang	Tage	365	365	365
Erzeugerpreis Direktvermarktung Filet	€/kg	17,5	17,5	17,5
Stromleistung Pumpen und Lüftung	kW	3	4	12
Strombedarf Fischproduktion	kWh/Jahr	25.800	34.400	103.200
Heizung Wärmebedarf	kWh/ Jahr	20.000	32.000	199.000
Akh-Bedarf Produktion	Akh/Durchgang	164	365	2.190
Arbeitsaufwand filetieren	min/Fisch	8,0	5,0	0,5
Arbeitsaufwand Schlachtung	min/Fisch	2,0	1,5	0,2
Futtermittelkosten	€/kg	1,60	1,60	1,30

Tabelle 12 Übersicht Deckungsbeiträge der Aquakultur

		Mikro		Klein		Produktion	
Übersicht 6. Betriebsjahr							
Produktionsmenge pro Jahr		300	1000				
Marktleistung Filet	Kg Lebendgewicht/Jahr	2239	7464			27000	
Summe variable Kosten	€/Jahr	6412	10030			201519	
Deckungsbeitrag	€/Jahr	-4173	-2566			86657	
Lohnkosten Aquakultur	€/Jahr	3705	8198			114862	
Arbeitszeit Aquakultur	Tage/Jahr	25	55			45000	
						300	

Demnach ist sowohl der Betrieb eines Mikrosystems wie der Soester Pilotanlage als auch eine erweiterte Kleinanlage nicht in der Lage, ohne Ansatz von Arbeitskosten seine Direktkosten zu decken. Das gleiche gilt für eine Kleinanlage etwas größerer Auslegung. Variiert man den Erzeugerpreis, so kommt die Kleinanlage erst bei einem Erzeugerpreis von ca. 24 €/kg Filet netto bzw. bei einem Endkundenpreis von über 25 €/kg Filet auf einen neutralen Deckungsbeitrag.

In einer kommerziellen Produktionsanlage mit den o.g. Produktionsparametern könnte dagegen ein Deckungsbeitrag von rd. 115.000 €/Jahr realisiert werden.

7.3 Direkt- und Arbeitskosten der Salat-Hydroponikproduktion

Wesentlicher Ressourcenaufwand sowie Kostenpositionen stellen in der Hydroponik die Energie- und Wasserversorgung, Düngung, die Jungpflanzen, weitere Betriebsmittel und die Arbeit dar.

7.3.1 Düngung

Die für Zusatz- bzw. Ausgleichsdüngungsmaßnahmen anzusetzenden Kosten wurden durch Preisabfragen im Gartenbaubedarf ermittelt. Die im Betrieb tatsächlich benötigten Mengen hängen unmittelbar von der gewählten Betriebsart und der Ausbalancierung der beiden Betriebsbereiche Aquakultur und Hydroponik ab. Die Kosten für Hydroponik-Dünger fallen jedoch in Relation zu den Kosten der anderen Betriebsmittel nur gering ins Gewicht. Dementsprechend ist das Einsparpotential der Aquaponik an dieser Stelle vergleichsweise gering (und es ist die Frage zu diskutieren, ob die Vermeidung von Abwasser nicht der entscheidendere Systemvorteil einer Aquaponik-Anlage ist).

7.3.2 Pumpstrom

Die Hydrokulturbeete werden mit Kreiselpumpen umgewälzt und über Belüfterpumpen mit ausreichend Luftsauerstoff versorgt. Der Strombedarf dieser Pumpen ist als niedrig einzuschätzen. Im Mikrosystem analog zur Soester Pilotanlage wurden vergleichsweise kleine Forschungsbeete mit vier Pumpen zu jeweils 85 W Nennleistung umgewälzt. In der Praxis würden flächenmäßig zusammenhängende größere Beete mit Pumpen von geringerer relativer Ge-

samtleistung umgewälzt und belüftet werden können. Dies wurde bei der Kostenstruktur der Klein- und der Produktionsanlage berücksichtigt.

7.3.3 Beleuchtung

Zur Abschätzung der Kosten für die Beleuchtung wurde eine moderate Beleuchtungsichte von 400 W Lichtleistung pro Quadratmeter bei einer elektrischen Effizienz von 50 % angenommen. Die Beleuchtung wurde für drei Monate im Jahr für täglich zwei Stunden kalkuliert. Dies stellt eine vereinfachte Rechnung gegenüber der Produktionspraxis dar, bei der die Beleuchtungsdauer über das Tagesintegral (DLI = Daily Light Integral) geregelt wird. Seitens der Saatzuchtfirma Rijk Zwaan wird die Sicherstellung von zehn Stunden Einstrahlung mit mindestens 5000 Lux empfohlen. Für die Realisierung dieser Empfehlung wäre eine automatische Beleuchtungsanlage mit Außenlichtsensor notwendig, über den die Anlage in Soest nicht verfügt. Für dieses Mikrosystem wurde die Beleuchtung zeitgesteuert ein- und ausgeschaltet. Die von der Beleuchtung in das System eingetragene Wärme wurde bei der Abschätzung der Jahreswärmemenge berücksichtigt. Die Pflanzenbeleuchtung, für die kostenintensive elektrische Energie notwendig ist, ist ein Betriebsparameter, über den die Wirtschaftlichkeit einer Anlage leicht ins negative geraten kann.

7.3.4 Arbeitskosten

Ebenso wie in der Aquakultur (s.o.) ist auch in der Hydroponik mit steigender Systemgröße mit deutlichem Rationalisierungspotential zu rechnen. Beispielsweise kann für die Reinigung und Desinfektion der Schwimmhilfen (Rafts) bei großen Systemen eine Reinigungsmaschine eingesetzt werden, so dass dieser zeitaufwändige Arbeitsschritt entfällt. In der Praxis reiner kommerzieller Hydroponik-Anlagen sind noch weitere Verfahrensschritte automatisiert. Als Stundenlohn wurde wie für Arbeiten in der Aquakultur ein Satz von 15 € Arbeitnehmer-Brutto angesetzt.

7.3.5 Modell-Deckungsbeiträge

Die wichtigsten Parameter für die weiteren Berechnungen sind in Tabelle 13 und die potenziell erzielbaren Deckungsbeiträge der Hydroponikabteilungen der drei Anlagenvarianten in Tabelle 14 zusammengestellt. Für diesen Produktionsbereich wurden für die größere Anlage verringerte Erzeugerpreise im Vergleich zu den beiden kleineren Varianten unterstellt.

Tabelle 13 Wichtige Parameter für die Berechnung der Deckungsbeiträge der Hydrokultur im Vergleich

Parameter Deckungsbeitrag Hydrokultur				
Parameter	Einheit	Mikro	Klein	Produktion
Kosten Pflanzling	€/Stk	0,20	0,15	0,10
Erzeugerpreis Direkt- bzw Lokalvermarkt	€/kg	2,50	2,50	1,50
Strombedarf Pumpen und Belüftung	W/m ²	40	10	8
Stromkosten	€/kWh	0,15	0,15	0,15
Wärmepreis	€/kWh	0,055	0,055	0,035
Beleuchtungsleistung pro Anbaufläche	kW/m ²	0,8	0,8	0,8
Jahresbeleuchtungsdauer	h	180	180	180

Tabelle 14 Übersicht Deckungsbeiträge der Hydrokultur

Übersicht 6. Betriebsjahr		Mikro EW	Klein EW	Prod EW
Produktionsmenge pro Jahr	kg/Jahr	3.834	12.780	364.222
Marktleistung	€/Jahr	9.585	31.949	910.566
Summe variable Kosten	€/Jahr	8.894	18.123	369.469
Deckungsbeitrag	€/Jahr	691	13.827	541.087
Lohnkosten Hydrokultur	€/Jahr	3.148	8.395	179.443
Arbeitszeit Hydrokultur	Tage/Jahr	21	56	1.196

Demnach kann ein Mikrosystem wie die Soester Pilotanlage ohne Ansatz von Arbeitskosten nur knapp seine Direktkosten decken, während in einer Kleinanlage ein Deckungsbeitrag von immerhin 13.800 € pro Jahr zur Verfügung stünde. Ein kommerziell betriebenes Produktionssystem nach den definierten Parametern könnte sogar einen Deckungsbeitrag von rd. 541.000 €/Jahr in seiner Hydroponik-Abteilung erzielen.

7.4 Investitionskosten

Investitionskosten für Gebäude und technische Einrichtungen wurden anhand der realen Kosten der Soester Pilotanlage und unter Zuhilfenahme der KTBL-Datenbanken sowie anderer Informationsquellen geschätzt. Für das Gewächshaus der beiden Varianten "Klein-" und "Produktionsanlage" wurde ein Doppelfoliengewächshaus mit Schattierung und Klimatisierung ausgewählt, das einerseits kostengünstig ist, andererseits aber auch noch einen akzeptablen Dämmwert besitzt. Für das Aquakulturgebäude wurde die Errichtung einer Halle in sogenannter Sandwichbauweise unterstellt. Gebäude dieses Typs sind kostengünstig zu errichten und besitzen ebenfalls gute Dämmwerte. Beide Gebäude wurden als unmittelbar miteinander verbunden angenommen, was in der Heizleistungsabschätzung berücksichtigt wurde.

Auf die Investitionssummen wurden geschätzte Zuschläge für Planungs-, Genehmigungs- und Vertragskosten (Anwalts- und Notarkosten) aufgeschlagen. Weiterhin wurde ein "Kalkulationspuffer" für unvorhergesehene zusätzliche Ausgaben von 15 % einkalkuliert.

Flächenkosten und Flächenvorbereitungskosten für Aquakultur und Hydrokultur sowie Infrastrukturanschlusskosten (Elektrizität, Erdgas, Wasser, Abwasser) wurden nicht berücksichtigt, da diese in der Praxis sehr standort- und projektabhängig sind und in einigen Fällen auch nicht zusätzlich anfallen würden. Kühlräume, Sozialräume und bestimmte Außenanlagen wurden berücksichtigt, dabei jedoch nicht die Flächenkosten an sich, sondern die Kosten für die Implementierung der jeweiligen Funktion. Das breite Spektrum der möglichen Flächenkosten erstreckt sich von 2,50 €/m² Miete pro Monat für eine Dachterrace eines Industriegebäudes, wie es beispielsweise das Projekt der UrbanFarmers AG in Den Haag zu tragen hat, bis hin zu ca. 3 - 5 €/m² Kaufpreis für kostengünstige Agrarflächen. Ersterer Betrieb muss dauerhaft 30 €/m² und Jahr erwirtschaften, um die Fläche zu finanzieren, wohingegen ein Landwirtschaftsbetrieb für eine Investition auf einer gekauften Fläche im Außenbereich

nur mit Finanzierungskosten von wenigen €Cent pro Quadratmeter und Jahr kalkulieren müsste.

Die wichtigsten Parameter und Annahmen zu den Investitionskosten für Gebäude und technische Einrichtungen sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15 Wichtige Parameter und Annahmen zu den Investitionskosten für Gebäude und technische Einrichtungen der Modellkalkulationen zur Wirtschaftlichkeit

Modellrechnung Investitionskosten				
	Einheit	Mikrosystem	Kleinsystem	Produktionssystem
Gewächshaus				
Beetfläche	m ²	59	195	5.568
Gewächshausfläche	m ²	83	274	6.682
Baukosten	€/m ²	150	150	33
Schattierung	€/m ²	25	15	12
Beetsystem Deep Water Culture	€/m ²	90	60	40
Düngedosierung	€/m ²			2
Beleuchtung	€/m ²	36	36	36
Klimatisierung	€/m ²	65	16	2,7
Baukosten Gewächshaus	€	30.393	76.027	837.100
Gebäude Aquakultur				
Fläche Aquakultur	m ²	40	80	750
Technikhalle Sandwichplattenbauweise	€/m ²	750	600	350
Baukosten Aquakulturgebäude	€	30.000	48.000	262.500
Aquakultur				
Fischtankvolumen	m ³	3	10	300
Kosten pro Fischtankvolumen	€/m ³	17.600	10.000	6.000
Sortieranlage	€			12.000
Betäubungsvorrichtung	€			3.000
Aquakultur komplett	€	52.800	100.000	1.815.000
Heizungssystem				
Benötigte Heizleistung Aquakultur + Hydrokultur	kW	26	56	916
Wärmeerzeugung Erdgas Brennwert	€/kW	160	120	92
Wärmeausbringung Vegetationsheizung im Bestand	€/kW	88	66	57
Kosten Heizsystem	€	6.419	10.496	136.661
Zusatzkomponenten				
Fläche Kühlkammer bzw Sozialraum	m ²	0	10	50
Kosten Kühlkammer	€/m ²		835	618
Sozialraum / Büroraum	€/m ²		418	293
Fläche Aussenanlagen	m ²	100	100	1.000
Kosten Aussenanlagen	€/m ²	46	46	46
Kosten Zusatzkomponenten	€	4.639	17.171	91.971
Investitionssumme (aufgerundet)				
Planungs und Projektierungskosten Gebäude	€/m ²	40	30	10
Planungs und Projektierungskosten Gebäude	€	4.920	10.620	74.320
Genehmigungs- und Vertragskosten		2.500	2.500	4.500
Puffer für Unvorhergesehenes	15%	19.757	39.727	483.309
Summe				
Investition pro Fläche	€/m ²	1.231	860	499
Investition pro Deckungsbeitrag	€/€	-43	27	6
AfA Gebäude- und Anlagenkosten 20 Jahre				
Zinsansatz 2%	€/a	7.573	15.229	185.269
	€/a	1.515	3.046	37.054

7.5 Rentabilität

Zur Abschätzung der potenziellen Rentabilität von Aquaponik-Produktionsanlagen wurden für die drei unterstellten Anlagenvarianten jeweils vereinfachte Leistungs-Kosten-Differenzrechnungen durchgeführt. Dazu wurden aus den Direktkosten und den projektierten Erträgen zunächst die Deckungsbeiträge berechnet (s.o.). Auf der Ertragsseite wurde für die Fischvermarktung für alle drei Anlagenvarianten eine Direktvermarktung mit vergleichsweise hohen Erzeugerpreisen angenommen, für die eine aktive Kommunikation der Nachhaltigkeit der Produktionsmethode die Voraussetzung ist. Dies wurde gleichfalls für die Vermarktung der Pflanzenprodukte der Klein- und Mikroanlage unterstellt. Für die Pflanzenerzeugung des aufskalierten Systems der "Produktionsanlage" wurde dagegen eine lokale beziehungsweise regionale Vermarktung mit niedrigeren durchschnittlichen Erzeugerpreisen angenommen, die aber noch immer einiges über tatsächlichen Großhandelspreisen liegen. Vom Deckungsbeitrag wurden zur Ermittlung der Leistungs-Kosten-Differenz, die als Gewinnbeitrag interpretiert werden kann, die Arbeitskosten, die Abschreibung für Gebäude und Anlagen und ein Zinsansatz auf das eingesetzte Investitionskapital abgezogen. Für die Abschreibung wurde vereinfacht für die kompletten Gebäude und Anlagen Linearität, eine Dauer von 20 Jahren und ein Restwert von 0 unterstellt. Der Zinssatz zur Kalkulation des Zinsansatzes auf das gebundenen Investitionskapital betrug 2 %. Die potenziellen Gewinnbeiträge, ausgewiesen als Leistungs-Kosten-Differenz, sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Den Ergebnissen der Modellkalkulationen zufolge zeigt sich relativ klar, dass ein Mikrosystem wie die Soester Pilotanlage sowie ein Kleinsystem in etwas größerer Dimension auch mit recht hohen Erzeugerpreisen nicht wirtschaftlich zu betreiben sind. Anlagenkosten und Arbeitskosten lassen sich mit diesen kleineren Anlagen nicht decken. Dagegen besteht für eine auf praxisübliche Dimensionen aufskalierte Produktionsanlage auch mit niedrigeren Erzeugerpreisen für die pflanzliche Produktion eine realistische Chance auf wirtschaftlichen Erfolg: Sie könnte den Modellrechnungen zufolge sechs vollbeschäftigte Arbeitskräfte tragen und ohne Ansatz von Flächenkosten sowie weiterer Gemeinkosten einen Gewinnbeitrag von rd. 210.000 € pro Jahr erzielen.

Tabelle 16 Potenzielle Gewinnbeiträge dreier Varianten von Aquaponiksystemen, errechnet als Leistungs-Kosten-Differenz (in €/Jahr)

Kennzahlen und Analysen					
Leistungskostendifferenz	Einheit	Mikro	Klein	Produktion	
Deckungsbeitrag Aquakultur	€/a	-4173	-2.566	114.862	
Deckungsbeitrag Salat	€/a	691	13.827	541.087	
Summe Deckungsbeiträge		-3.483	11.260	655.948	
Arbeitskosten Aquakultur	€/a	3.705	8.198	45.000	
Arbeitskosten Salat	€/a	3.148	8.395	179.443	
Summe Arbeitskosten	€/a	6.853	16.593	224.443	
Flächenkosten / Gemeinkosten (Pacht, Overhead)		n.b.	n.b.	n.b.	
AfA Gebäude- und Anlagenkosten 20 Jah	€/a	7.573	15.229	185.269	
Zinsansatz 2%	€/a	1.515	3.046	37.054	
Leistungs-Kostendifferenz	€/a	-19.424	-23.607	209.183	

8 Abschätzung und Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

8.1 Konzept zur Abschätzung der Nachhaltigkeit

In der Diskussion um gesellschaftliche Akzeptanz und um politische Unterstützung mit dem Argument der volkswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit müssen sich agrarwirtschaftliche Produktionsverfahren einer ganzheitlichen Bewertung ihrer Nachhaltigkeit - also in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht - stellen. Zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit in Verbund mit Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz bietet sich die Life Cycle Assessment-Methode ("Ökobilanz") an, deren Erstellung in den beiden internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 niedergelegt ist (siehe Textbox). Dieser recht breit angelegte Untersuchungsrahmen kann hinsichtlich individueller Ziele und entsprechend wählbaren Bewertungsindikatoren gestaltet werden.

Life Cycle Assessment (LCA): dt. Lebenszyklusanalyse, ein systematisches Konzept, um die Umweltwirkungen eines Produktes während seines gesamten Entstehungs- und Lebensweges ("from cradle to gate" - von der "Wiege bis zum Fabrikator" zu analysieren und zu quantifizieren. Alternativ kann als Endpunkt der Betrachtung auch das Ende des Produktlebensweges gewählt werden ("from cradle to grave" - "von der Wiege bis zur Bahre").

Für die Abschätzung der ökologischen Nachhaltigkeit z.B. von Verfahren der Urbanen Landwirtschaft bietet sich ein LCA-Ansatz "von der Wiege bis zum Hoftor" an, der z.B. bezogen auf 1 kg Frischmasse eines Endprodukts die für seine Erstellung notwendigen Treibhausgasemissionen (in kg CO₂ eq) ausweist (Gasperi et al. 2016). Dabei sind auch die anfallenden Emissionen der Vorprodukte und jene zur Erstellung von Produktionsanlagen einzubeziehen.

Ein relativer ökologischer Vorteil im Vergleich zu anderen Produktionsverfahren ist nur nachzuweisen, wenn vergleichbare Produkte aus deren Produktionsketten gleichfalls mit der gleichen Methodik und mit den gleichen Indikatoren bewertet werden. Die Aquaponik wäre diesbezüglich mit Verfahren des Gartenbaus, mit reinen Aquakulturproduktionen und mit dem Fischfang aus freien Gewässern zu vergleichen. Vor allem zur Bewertung des Fischfangs bestehen methodische Fragen, z.B. ob und wie eine Gefährdung von Fischbeständen zu berücksichtigen ist und wie diese einbezogen werden kann.

Im Rahmen des hier beschriebenen Pilotprojektes wurden die für eine LCA-Erstellung notwendigen anlagespezifischen Daten so umfassend und detailliert wie möglich erfasst; sie sind für die Erstellung einer vergleichenden LCA in einem künftigen Forschungsprojekt vorgesehen. Eine LCA-Erstellung im Rahmen dieses Projektes war aus Gründen noch nicht vollständig geklärt methodischer Fragen und der beschränkten Arbeitskapazitäten nicht zu leisten und soll einem eigenständigen Forschungsvorhaben vorbehalten bleiben. Erste Ansätze dazu werden im Frühjahr 2017 gemeinsam mit einer Gastwissenschaftlerin von der Universität Bologna in Soest realisiert.

8.2 Ansatzpunkte für eine verbesserte Umwelt- und Klimabilanz

Befürworter von Aquaponiksystemen heben abhängig von dem von ihnen verfolgten technischen Konzepten nicht nur Vorteile wie geringe THG-Emissionen, Einsparungen von Mineraldünger und einen niedrigen Wasserverbrauch hervor, sondern betonen auch die Möglichkeit, unfruchtbare Standorte mit dem Verfahren zu nutzen. Über eine volkswirtschaftliche Vorzüglichkeit im Vergleich mit anderen Produktionskonzepten sollte aber nicht ein einzelner Indikator, sondern die gemeinsame Betrachtung mehrerer Indikatoren entscheiden. Als bestimmend für eine relative Vorzüglichkeit sollte die Ressourceneffizienz des jeweils aus ökologischer Sicht "knappsten" Produktionsfaktors bestimmend für die Auswahl eines Produktionsverfahrens sein. So kann z.B. ein in besonders wassersparendem Design ausgelegtes technisches System im ariden Gebiet ökonomisch überlegen sein, während in wasserreichen Gegenden eine solche Auslegung zu sinnlos überhöhtem Aufwand führt. Auf höchste Energieeffizienz getrimmte Systeme wären bei einer auf fossilen Energieträgern basierenden Energieversorgung vorzuziehen, während eine solche Auslegung bei der Nutzung überschüssiger Abwärmequellen oder reichlich zur Verfügung stehender Erneuerbarer Energien weniger zweckdienlich ist. Zu hohen Gebäudekosten erstellte vertikale Produktionssysteme in Mitten großer Städte können dort realisiert werden, wo Platz für Produktionsgebäude ein absolut limitierender Faktor ist - sie machen aber wenig Sinn, wenn z.B. an der Peripherie von Ballungsräumen ohne nennenswerte ökologische Nutzungskosten Produktions- und Logistikflächen erschlossen werden können.

Vor dem Hintergrund der Standortverhältnisse in Nordrhein-Westfalen und der im Pilotbetrieb erfassten Ressourcenansprüche und Kosten bieten sich zur

weiteren ökologischen Optimierung von Aquaponiksystemen folgende Ansatzpunkte:

- Senkung des Wärmebedarfs bzw. der Wärmekosten, z.B. durch Gebäudeisolation, durch Nutzung von Abwärmequellen (Grubenwasser, industrielle Abwärme, Biogas-BHKW-Wärmenutzung, Biomeiler...) sowie ggf. auch mit Hilfe von innovativen Wärmespeicherverfahren, um Abwärme und/oder Sonnenenergie mit zu nutzen
- Senkung des Bedarfs an (nicht nachhaltig erzeugter) elektrischer Energie, z.B. durch Verwendung von energieeffizienteren Aggregaten, durch Koppelung mit Anlagen zur Erzeugung Erneuerbarer Energien, ggf. mit Hilfe von Speichertechnik sowie von aus energetischer Sicht optimierten Anlagensteuerungen
- Senkung des Bedarfs an Fütterungskomponenten aus tierischem Protein, insofern diese als nicht nachhaltig erzeugt anzusehen sind (dies ist im Einzelfall abhängig von den eingesetzten Futtermitteln zu klären). Grundsätzlich kann aber empfohlen werden, den Anteil pflanzlicher Komponenten in der Fütterung nach Möglichkeit zu erhöhen
- Reduzierung von endgültig aus den Anlagen abgeführtem Prozesswasser und Absatzschlamm sowie des zu ergänzenden Anteils an Frischwasser durch Optimierung des Kreislaufbetriebs, wobei unter hiesigen Standortbedingungen die Vermeidung der Abführung nährstoffreichen Prozesswassers und die produktive Nutzung der Absatzschlamm die wichtigere Aufgabe ist.

Zu allen genannten Ansatzpunkten bestehen bereits weiterführende Überlegungen im Detail (vgl. auch Ausführungen vorne). So könnten Gewächshäuser auch als Wärmekollektoren fungieren; und in der Übergangsphase könnte mit dem Einsatz von so genannten Luft-Wärmepumpen mit Kollektoren innerhalb des Gebäudes Wärme für die Aquakultur gewonnen werden. Weiterhin wäre die saisonale thermale Speicherung der Überschusswärme der Gewächshäuser technisch vorstellbar (Thermales Speichersystem; TES), aber ggf. aktuell noch nicht wirtschaftlich. Entsprechende Low-Cost-Konzepte wären gefragt. Schließlich könnte auch die CO₂-haltige Abluft der Aquakultur gezielt als Pflanzendünger in der Hydroponik eingesetzt werden, müsste jedoch vorher entfeuchtet werden. Auch dieser Ansatz wird in der Entwicklung weiter verfolgt.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Erfahrungen aus der Prozessführung im Pilotbetrieb

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass auch der Europäische Wels (*Silurus glanis*) neben den bereits in Aquaponik-Systemen gehaltenen Fischarten Tilapia und Afrikanischer Wels für dieses Haltungskonzept geeignet ist, da er vergleichsweise niedrige pH-Werte und vergleichsweise hohe Nitratwerte problemlos toleriert und trübes Wasser präferiert. Eine Bestandsdichte von 90 - 100 kg/m³ ist sowohl tiergerecht als auch wirtschaftlich, während ein Besatz von unter 25 kg/m³ zu Kannibalismus führen kann und deshalb zu vermeiden ist. Regelmäßige Maßnahmen zur Desinfektion sind zur Gesunderhaltung des Bestandes erforderlich; ebenso die Vermeidung von Stressfaktoren.

Bei der Gestaltung der Beete für die Pflanzenproduktion haben sich Deep Water Culture (DWC)-Beete, bestückt mit kommerziellen "Schwimmhilfen" (Rafts) als praktikabel und effizient im Einsatz erwiesen. Vertikale Beetformen wurden getestet und zeigten sich prinzipiell funktionsfähig, aber umständlich in der Handhabung und ungleichmäßig bezüglich der Entwicklung der eingesetzten Pflanzen. Die pflanzenbaulichen Hydroponik-Versuche wurden mit Kopfsalaten der Sorte Salanova Cook RZ (*Lactuca sativa* var. *capitata* „Salanova“) des Züchtungsunternehmens Rijk Zwaan durchgeführt. Dabei wurden jeweils Nährlösungen mit Aquakultur-Prozesswasser mit kommerziell üblichen Nährlösungen verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass mit Aquakultur-Prozesswasser von Europäischen Welsen in praxisüblichen Bestandsdichten Kopfsalat in Hydroponik erfolgreich produziert werden kann, wobei diese Salate sogar eine um rd. 15 % höhere Trockenmasseentwicklung als die mit kommerziellen Nährlösungen versorgten Pflanzen zeigten. Allerdings ist ergänzende Blattdüngung mit Eisenchelatlösung zu empfehlen, da Eisenmangel sowohl im Soester System beobachtet wurde als auch in der Literatur vielfach beschrieben ist. Eine weitere Beobachtung war, dass sich der essentielle und sich weltweit verknappende Pflanzennährstoff Phosphor im Absatzschlamm des Aquakultur-Teilsystems anreichert.

Sowohl der Betrieb einer Aquakultur als auch eines Hydroponiksystems erfordern fundiertes Fachwissen, Erfahrung und anlagenspezifische Kenntnisse. Insbesondere in der Startphase eines neuen Systems ist mit Anfahrverlusten zu rechnen. Für ein Aquaponiksystem mit zwei recht unterschiedlichen Pro-

duktionsbereichen gilt dies umso mehr. Der Anspruch an z.T. sehr spezifisches Fachwissen kann sich als Barriere für die Übernahme in die Praxis erweisen, die aber mit Aus-, Weiterbildungs- und Beratungsangeboten überwunden werden kann. Angebote dieser Art könnten z.B. in Nordrhein-Westfalen gemeinsam durch Landwirtschaftskammer, Fachhochschule, Bürgervereine wie z.B. Die Urbanisten und ggf. mit Unterstützung von Fachabteilungen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz LANUV realisiert werden.

9.2 Nährstoffbalance und Weiterentwicklung des Anlagendesigns

Die saisonalen Unterschiede im Nährstoffentzug bei gleichzeitig fast konstantem Nährstoffangebot durch die Aquakultur machen die Systemführung bzw. -balancierung zu einer zentralen Herausforderung des Betriebs. Dies gilt ganz besonders für so genannte gekoppelte Systeme wie der hier beschriebenen Anlage, bei der das Prozesswasser nach der Nährstoffabreicherung durch die Pflanzen zurück in die Aquakultur geführt werden soll. Für solche Anlagen gilt es, bereits bei der Dimensionierung in der Planungsphase ein sinnvolles Verhältnis zwischen Aufkommen und Verwertung der Nährstoffe im Prozesswasser im Sommer und im Winter zu finden. Im praktischen Betrieb kann dies dazu führen, dass im Sommer zusätzlich Nährstoffe nachgedüngt werden müssen, im Winter die Pflanzenstrecke beheizt und beleuchtet werden muss und es auch zur Nichtnutzung von Aquakultur-Prozesswasser in den Wintermonaten kommen kann.

Tatsächlich ist die Abstimmung von Nährstoffangebot der Aquakultur auf die Nährstoffnachfrage der Hydroponik technisch nicht einfach durchzuführen und bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. So stellen bereits die saisonalen Unterschiede des Nährstoffentzugs vor allem für solche Anlagen, die nicht mit Heizung und Beleuchtung auch die pflanzliche Produktion ganzjährig konstant halten (können), eine erhebliche Herausforderung dar. Zudem sind die Konzentrationen und die Zusammensetzungen der Nährstoffe im Prozesswasser der Aquakulturen in ihrer unveränderten Form nicht immer für die Pflanzen optimal und im Vergleich zu Nährstofflösungen der gartenbaulichen Praxis tendenziell zu gering. Abhilfe kann die gezielte Aufdüngung des Prozesswassers mit Nährstoffen bieten. Um die Rückführung des Prozesswassers in die Aquakultur zu erleichtern, wäre eine geeignete Blattdüngung das Mittel der Wahl.

Ganz allgemein sind die Nährstoffkonzentrationen im Aquakultur-Prozesswasser für viele pflanzliche Kulturen tendenziell zu niedrig. Es gibt Fisch-Pflanzenkombinationen, die durchaus gut funktionieren können, aber für Kulturen mit hohen Nährstoffansprüchen ist fast immer eine Aufdüngung angezeigt. Diese kann jedoch dazu führen, dass das Prozesswasser nach der Nutzung durch die Pflanzen nicht mehr für eine Rückführung in die Aquakultur geeignet ist. In der Praxis der größeren kommerziellen Aquaponikanlagen in Berlin, Basel, Den Haag und Waren werden aus den o.g. Gründen so genannte entkoppelte Verfahren angewandt und das Aquakultur-Prozesswasser für eine performancegerechte Versorgung von stark zehrenden Pflanzen, wie zum Beispiel Tomaten und Auberginen, mit mineralischem Dünger komplementiert. Das so aufgedüngte Prozesswasser ist am Ende der Pflanzenstrecke dann allerdings noch immer zu konzentriert, so dass es nicht zurück in die Aquakultur geleitet wird; lediglich kondensiertes Verdunstungswasser wird zurückgeführt. Eine vollständige Kondensation allen Prozesswassers wäre energetisch unter mitteleuropäischen Bedingungen sehr aufwändig, ebenso wie die Auslegung der Hydroponik-Abteilungen in einer solchen Größenordnung, dass sämtliches Prozesswasser auf natürliche Weise verdunsten könnte. Für wärmere bzw. sehr heiße Standorte wären diese Konzepte dagegen wirtschaftlich vorstellbar.

Kaskadisch angelegte Pflanzenstrecken mit Starkzehrern in einer Linie mit Pflanzen mit geringeren Nährstoffansprüchen könnten einen Teil der Probleme lösen und sollen in künftigen Untersuchungen am hier beschriebenen System getestet werden. Als weiterer vielversprechender Ansatzpunkt könnte ein energetisch optimiertes Membranverfahren dienen, mit dem Aquakultur-Prozesswasser für die pflanzliche Nutzung aufkonzentriert und abgetrenntes "sauberes" Wasser in den Fischkreislauf zurückgegeben wird. Auch dieser technische Ansatz, der gekoppelte Anlagenkonzepte in größerer Dimension bei wesentlich verbesserter Nährstoffversorgung der Pflanzen ermöglichen könnte, soll zeitnah mit der hier beschriebenen Anlage zur Weiterentwicklung und zum Praxistest aufgegriffen werden. Schließlich ist auch der Verbleib erheblicher Mengen von Phosphor in den Absetzschlammern der Aquakulturen ein ökologisch unzureichend gelöstes Problem, dem mit einem innovativen Reaktor-Verfahren zur Remineralisierung der Nährstoffe im Schlamm sowie zur Reduktion des Schlammvolumens begegnet werden kann. Auch dieser Ansatz wird zeitnah in der hier beschriebenen Anlage aufgegriffen werden, ebenso wie die weiterführende Idee, dabei entstehende flüchtige Fettsäuren als Nähr-

stoffe für Bakterienkulturen für Denitrifikationssysteme einzusetzen und so deren Effizienz weiter zu erhöhen.

9.3 Pflanzengesundheit und Pflanzenschutz

Grundsätzlich werden hydroponisch im Aquakultur-Prozesswasser gehaltene Pflanzen genauso wie alle anderen in Monokultur geführten Bestände von Schaderregern angegriffen. Der Einsatz chemischer Präparate, wie sie im kommerziellen Unterglasgartenbau üblich sind, ist jedoch wegen der vielfach ausgewiesenen Fisch- und Fischnährtier-Toxizität dieser Mittel technisch ausgeschlossen. Es sind daher lediglich ökologische Verfahren anzuwenden. Dabei stellt sich die Frage nach der Einsetzbarkeit von z.B. biologischen Gegenspielern in der Insektenbekämpfung immer auch mit Blick auf das zu vermarktende Produkt, denn auch bei ökologischen Bekämpfungsmaßnahmen können Rückstände wie tote Reste der Schädlinge oder lebende Nützlinge auf den Nutzpflanzen verbleiben und zu Irritationen oder Ablehnung der Verbraucher führen. Künftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sollten diesem Aspekt zusätzlich Rechnung tragen.

Eine "systembedingte" natürliche Gesundheit von mit Aquakultur-Prozesswasser versorgten Pflanzen, wie von manchen Autoren vertreten, konnte ad hoc nicht bestätigt werden. Allerdings zeigten jene in den Soester Begleitversuchen eine geringere Krankheitsanfälligkeit gegen Schaderreger wie Echtem Mehltau, Sclerotinia-Welke oder Grauschimmelfäule im Vergleich zu den mit praxisüblichen Nährlösungen gedüngten Pflanzen. Weiterführende Versuche in Abstimmung mit internationalen Partnern sollen untersuchen, ob dies auf die Schutzeffekte diverser Bakterienstämme der so genannten „Mikrobiota“, also dem komplexen Zusammenspiel von Mikroorganismen innerhalb des Gesamtsystems, zurückzuführen ist. Sollte die Identifizierung von positiv wirkenden Mikroorganismen im Aquaponik-Prozesswasser gelingen, so könnten darauf aufbauend effektive Pflanzenschutzmaßnahmen für Aquaponik-Systeme entwickelt werden. Zur Unterstützung der künftigen Forschungsaktivitäten zum Pflanzenschutz in Aquaponik-Systemen wurde neu eine Plattform geschaffen, die diesbezügliche Erfahrungen und Kenntnisse bündeln soll und an der der Fachbereich Agrarwirtschaft beteiligt ist.

9.4 Verbraucherakzeptanz und Zahlungsbereitschaft

Zwar liegen zu Verbraucherhaltungen zu verschiedenen Fischhaltungssystemen sowie zu Zahlungsbereitschaften für Fische und Fischprodukte Informationen vor, doch Einstellungen und Zahlungsbereitschaften zu Aquaponik-Erzeugnissen sind noch nicht im Detail untersucht. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen und gesellschaftlichen Trends zu bewussterer Ernährung und Nachhaltigkeit ist zu klären, ob Verbraucher bzw. Bürger Aquaponik-Produktionssysteme als nachhaltig und tiergerecht beurteilen und die darin erzeugten Produkte als qualitativ hochwertige (regionale) Frischeprodukte wertschätzen würden. In einer zweiten Stufe ist dann die Frage nach der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft zu stellen, die letztendlich den Produktpreis und damit auch die potenzielle Wirtschaftlichkeit von Aquaponik-Anlagen bestimmt.

Die von den wenigen bestehenden kommerziellen Aquaponikanlagen erzielten Erzeugerpreise für Tilapien lassen für besonders exponierte urbane Anlagenstandorte eine hohe Rentabilität vermuten, so lange man in einer exklusiven Marktnische agieren kann. Der Erfolg von Anlagen auf diesen Standorten beruht darauf, dass sie als technologische "Frontrunner" das innovative Aquaponik-Konzept als Business-Modell der Urbanen Landwirtschaft äußerst geschickt im Marketing einsetzen und in ihrem hochurbanen Umfeld eine sehr kaufkräftige, an Nachhaltigkeit, lokaler Herkunft, besonderer Frische, sehr kurzen Wegen und an Exklusivität interessierte Kundschaft direkt oder über die gehobene Gastronomie ansprechen können. Diese Erfolgsfaktoren lassen sich kaum auf Standorte im Ländlichen Raum Nordrhein-Westfalens übertragen und dürften auch nur an wenigen ausgewählten urbanen Spitzenlagen in diesem Bundesland gegeben sein.

Für Aquaponik-Anlagen im Ländlichen Raum, auf weniger exponierten urbanen Standorten und für solche, die eine gewisse Produktionsmenge überschreiten, müssen deutlich niedrigere Erzeugerpreise angenommen werden. Diese werden sich an den Preisen der Konkurrenzprodukte - auch des Afrikanischen Welses, der in der Praxis oft nur als "Wels" ausgezeichnet ist - als Preisuntergrenzen orientieren müssen. Gelingt es, den Europäischen Wels als nachhaltig erzeugtes, regionales und frisches Produkt zu positionieren und eine positive Einstellung der Verbraucher zum System Aquaponik zu etablieren, so kann eine preisliche Differenzierung nach oben durchgesetzt werden. Erste Untersuchungen im Rahmen des Projekts ergaben tendenzielle Zahlungsbereitschaften von 18,80 € je kg frischem Filet und von 22,40 € je kg

geräuchertem Filet, allerdings bei Kunden, die zuvor verköstigt und über das Produktionsverfahren informiert worden waren.

Grundlegende Hemmnisse eines Aquaponik-Marketings, die sich bei der o.g. Testerhebung in Soest bestätigten, sind die eher geringen Kenntnisse von Verbrauchern zu Aquakultur-Produktionen, der noch geringere Bekanntheitsgrad des Begriffs Aquaponik und die Vermittlung der Nachhaltigkeit dieses Konzepts. Dazu muss in der Regel interessierten Verbrauchern das gesamte Verfahren erläutert und zudem begründet werden, warum die Pflanzen nicht in der Erde und die Fische nicht in freiem Gewässer gehalten werden. Die Mehrheit der Verbraucher lässt sich den Erfahrungen der Soester Mitarbeiter im Rahmen von zahlreichen Führungen zufolge nach ausführlicher Darlegung der Vorteile bezüglich Kreislaufgedanken und Ressourceneffizienz von Aquaponik überzeugen, und ist auch bereit, nach entsprechenden Erläuterungen die Haltung der Fische im Tank als tiergerecht zu akzeptieren. Dieser hohe kommunikative Aufwand erschwert es allerdings, Waren über Zwischenhändler höherpreisig zu vermarkten, während im Direktabsatz keine Probleme zu erwarten sind.

Obwohl das Konzept keinen Einsatz von Antibiotika oder chemischen Pflanzenschutzmitteln gestattet, ist es nicht als Verfahren des Ökologischen Landbaus anerkannt und folglich von einer entsprechenden Zertifizierung ausgeschlossen. Sollte sich Aquaponik als Verfahren breiter etablieren können, wäre dringend eine geeignete alternative Form der Nachhaltigkeitszertifizierung anzustreben oder ggf. sogar neu zu entwickeln. Auch bodenlose Gartenbauverfahren, die auf chemischen Pflanzenschutz verzichten, oder nachhaltig betriebene Kreislaufaquakulturen könnten von so einem Ansatz profitieren.

9.5 Wirtschaftlichkeit

Den Ergebnissen der Modellkalkulationen zufolge zeigte sich klar, dass ein Mikrosystem wie die Soester Pilotanlage sowie ein Kleinsystem in etwas größerer Dimension auch mit recht hohen Erzeugerpreisen für Fisch und Salat nicht wirtschaftlich zu betreiben sind. Anlagenkosten und Arbeitskosten lassen sich mit diesen kleineren Anlagen nicht decken; es sei denn, die Aquaponik wird im Verbund z.B. mit einem Gastronomie-, einem Umweltbildungs- oder einem Erlebnis-/Eventkonzept betrieben. Dagegen kämen bei einer Produktionsanlage in praxisüblicher Dimension, die z.B. über ein Fischtankvolumen von 300 m³ und über eine Hydroponik-Produktionsfläche von 5.500 m² verfügen

würde, Skaleneffekte durch mögliche (Teil-)Automatisierung, effizientere Arbeitserledigung und niedrigere Energiekosten zum Tragen. Eine solche Anlage könnte den Modellrechnungen zufolge mit durchschnittlichen Erzeugerpreisen von 17,50 €/kg Fischfilet netto und von 1,50 €/kg Kopfsalat netto wirtschaftlich betrieben werden, sechs vollbeschäftigte Arbeitskräfte tragen und ohne Ansatz von Flächenkosten sowie weiterer Gemeinkosten einen Gewinnbeitrag von rd. 210.000 € pro Jahr erzielen. Je nach Standort und (begleitendem) Konzept sind in der Direktvermarktung für eine solche Anlage auch höhere Preise erzielbar, und eine intelligente Nutzung vorhandener Abwärme-Energiequellen sowie generell eine energetische Optimierung könnte die Wirtschaftlichkeit deutlich steigern.

9.6 Ansätze für eine verbesserte Umwelt- und Klimabilanz

In der Diskussion um gesellschaftliche Akzeptanz und um politische Unterstützung mit dem Argument der volkswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit müssen sich auch Aquaponik-Produktionssysteme einer ganzheitlichen Bewertung ihrer Nachhaltigkeit - also in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht - stellen. Für die Abschätzung der ökologischen Nachhaltigkeit ist ein LCA-Ansatz "von der Wiege bis zum Hoftor" in Vorbereitung, der z.B. bezogen auf 1 kg Frischmasse eines Endprodukts die für seine Erstellung notwendigen Treibhausgasemissionen (in kg CO₂ eq) sowie die Inanspruchnahme weiterer umweltrelevanter Ressourcen als Indikatoren ausweisen wird. Im Rahmen des hier beschriebenen Pilotprojektes wurden die für eine LCA-Erstellung notwendigen anlagespezifischen Daten so umfassend und detailliert wie möglich erfasst; sie sind für die Erstellung einer vergleichenden LCA in einem künftigen Forschungsprojekt vorgesehen.

Vor dem Hintergrund der Standortverhältnisse in Nordrhein-Westfalen und der im Pilotbetrieb erfassten Ressourcenansprüche und Kosten bieten sich zur weiteren ökologischen Optimierung von Aquaponiksystemen folgende Ansatzpunkte:

- Senkung des Wärmebedarfs bzw. der Wärmekosten, z.B. durch Gebäudeisolation, durch Nutzung von Abwärmequellen (Grubenwasser, industrielle Abwärme, Biogas-BHKW-Wärmenutzung, Biomeiler...) sowie ggf. auch mit Hilfe von innovativen Wärmespeicherverfahren, um Abwärme und/oder Sonnenenergie mit zu nutzen

- Senkung des Bedarfs an (nicht nachhaltig erzeugter) elektrischer Energie, z.B. durch Verwendung von energieeffizienteren Aggregaten, durch Koppelung mit Anlagen zur Erzeugung Erneuerbarer Energien, ggf. mit Hilfe von Speichertechnik sowie von aus energetischer Sicht optimierten Anlagensteuerungen
- Senkung des Bedarfs an Fütterungskomponenten aus tierischem Protein, insofern diese als nicht nachhaltig erzeugt anzusehen sind (dies ist im Einzelfall abhängig von den eingesetzten Futtermitteln zu klären). Grundsätzlich kann aber empfohlen werden, den Anteil pflanzlicher Komponenten in der Fütterung nach Möglichkeit zu erhöhen.
- Reduzierung von endgültig aus den Anlagen abgeführtem Prozesswasser und Absatzschlämmen sowie des zu ergänzenden Anteils an Frischwasser durch Optimierung des Kreislaufbetriebs, wobei unter hiesigen Standortbedingungen die Vermeidung der Abführung nährstoffreichen Prozesswassers und die produktive Nutzung der Absatzschlämme die wichtigere Aufgabe ist.

Zu allen genannten Ansatzpunkten bestehen bereits weiterführende Überlegungen im Detail.

9.7 Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis

Das durchgeführte Pilotprojekt hatte die Aufgabe, vorhandene Erfahrungen und Kenntnisse zu Aquaponik-Konzepten aufzugreifen, ihre Realisierbarkeit im praktischen Betrieb zu überprüfen und ihre Potenziale aus Sicht der Agrar- und Ernährungswirtschaft Nordrhein-Westfalens abzuschätzen. Wie oben ausgeführt, ist das Konzept grundsätzlich technisch und wirtschaftlich umsetzbar und kann mit überschaubarem weiteren Forschungs- und Entwicklungsaufwand zur Praxisreife bei gleichzeitig verbesserter ökologischer Vorteilhaftigkeit geführt werden.

Aquaponik-Systeme könnten durch verschiedene Akteure, mit unterschiedlichen Zielsetzungen und unter verschiedenen Markt- und Standortbedingungen in den kommenden Jahren in die Praxis übertragen werden, und zwar

- als wärmeverwertender Betriebszweig landwirtschaftlicher Biogas-Erzeugerbetriebe oder anderer energieerzeugender Unternehmen
- als wärmeverwertender Betriebszweig energieintensiver ländlicher oder urbaner Industrie- und Gewerbebetriebe

- als Erweiterung bestehender Aquakultur- und Unterglas-Gartenbaubetrieben um den jeweils nicht vorhandenen anderen Produktionsbereich, um die ökologische Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz des Gesamtbetriebes zu verbessern. Für stadtnahe Gewächshausbetriebe, die auf dem Zierpflanzenmarkt einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt sind, könnte Aquaponik eine Chance zur Diversifizierung bedeuten; für Aquakulturbetriebe könnte eine (weitgehend) komplette Nutzung des Prozesswassers umweltrechtliche Vorteile bieten
- als kommerziell genutztes Produktionsverfahren der Urbanen Landwirtschaft mit Direktvermarktung, Gastronomie-, Event- und/oder Bildungsangeboten
- als Produktionsverfahren in partizipativen Formen der Landwirtschaft; z.B. der Solidarischen Landwirtschaft
- als Konzept für urbane Selbstversorger, im Hobby-, Kleingarten- und Gemeinschaftsgartenbereich
- als Betriebskonzept für sozial-educative Unternehmen (z.B. Schaffung von Ausbildungs- und Arbeitsplätzen für Personengruppen mit erschwertem oder keinem Zugang zum ersten Arbeitsmarkt sowie zum Bildungssystem)
- als in der Entwicklungszusammenarbeit einsetzbares und auf vielfältige ökologische und geographische Standortbedingungen anpassbares Betriebskonzept.

Auch in Nordrhein-Westfalen sind einige Akteure bereits in Planungen zum Einstieg in die Praxis eingestiegen. So bietet das Zentrum für Unternehmertum SWICE (South Westphalia International Center for Entrepreneurship) der Fachhochschule Südwestfalen Begleitung und Beratung für Firmenneugründungen aus dem Umfeld der Hochschule an. Erste Aktivitäten zu Geschäftsmodellen in Verbindung mit Aquaponik wurden bereits durchgeführt.

9.8 Gesamtbewertung

Aquaponik-Produktionssysteme sind sicher nicht der alleinige "Königsweg" zu einer nachhaltigen Lebensmittelproduktion, aber ein Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz und Klimafreundlichkeit. Wenn auch die bisher realisierten Ansätze in Versuchs- und Praxisanlagen vielversprechend sind, so besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die potenziellen ökologischen Vorteile des Verfahrens vollumfänglich zu realisieren. Auch für ein Binnenland wie

Nordrhein-Westfalen bietet die Entwicklung von Aquaponik-Systemen hochinteressante Zukunftsperspektiven, die weiter aktiv verfolgt werden sollten.

Literatur

- Agrarministerkonferenz der Bundesrepublik Deutschland und Nationale Ansprechstelle für Aquakultur in Deutschland. (2014). *Nationaler Strategieplan für Aquakultur für Deutschland*. Von <http://www.portal-fischerei.de/bund/aquakultur/strategieplan-aquakultur/> abgerufen am 15.10.2016
- Belau, T., & Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Eds.). (2009). *Gartenbau: Produktionsverfahren planen und kalkulieren* (1. Aufl). Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Bugbee, B. G., & Salisbury, F. B. (1988). Exploring the Limits of Crop Productivity : I. Photosynthetic Efficiency of Wheat in High Irradiance Environments. *PLANT PHYSIOLOGY*, *88*(3), 869–878.
- Channel Catfish Farming Handbook*. (2014). Springer Verlag.
- Danaher, J. J., Shultz, R. C., Rakocy, J. E., & Bailey, D. S. (2013). Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems. *Journal of the World Aquaculture Society*, *44*(3), 374–383.
- De Groot, C. C., Marcelis, L. F. M., van den Boogaard, R., Kaiser, W. M., & Lambers, H. (2003). Interaction of nitrogen and phosphorus nutrition in determining growth. *Plant and Soil*, *248*(1/2), 257–268.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water*, *8*(10), 467.
- Deutsche Agrarforschungsallianz - DAFA. (2014). *Breite Zustimmung für Strategieentwurf Aquakultur der Deutschen Agrarforschungsallianz* (Pressemitteilung

vom 12.03.2014). Von

http://www.dafa.de/no_cache/de/startseite/presse/presseinformationsseite/Pressemitteilung/breite-zustimmung-fuer-strategieentwurf-aquakultur-der-deutschen-agrarforschungsallianz.html abgerufen am 15.10.2016

FAO (Ed.). (2016). *Contributing to food security and nutrition for all*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Jaede, L., Füllner, G., Bräuer, G., Gottschalk, J., Einspanier, A., Ludewig, M., ... Möbius, G. (n.d.). *Tierschutzgerechte Schlachtung Afrikanischer Weise* (No. Heft 1 / 2016). Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie - LfULG.

Jasper, D., Sanyé-Mengual, E., Muñoz, P., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2016). Rooftop agriculture: sustainability improvement through LCA methodology. Presented at the VI International Conference on Landscape and Urban Horticulture, Athens. Von https://www.researchgate.net/publication/305315490_Rooftop_agriculture_sustainability_improvement_through_LCA_methodology abgerufen am 10.10.2016

Joddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224.

Jraber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147–156.

LTBL. (2010). *Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern*. Darmstadt.

- Laber, H., & Lattauschke, G. (2014). *Gemüsebau* (2nd ed.). Verlag Eugen Ulmer.
- Lange, D., & Deutsche Agrarforschungsallianz (Eds.). (07). *Aquakulturforschung gestalten! Fachforum Aquakultur ; Strategie der Deutschen Agrarforschungsallianz*. Braunschweig: Deutsche Agrarforschungsallianz (DAFA).
- 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. *Aquaculture International*, 14(6), 539–550.
- Palm, H. W., Seidemann, R., Wehofsky, S., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: System design, chemo-physical parameters and general aspects. *AAEL Bioflux*, 7(1), 20–32.
- Paungfoo-Lonhienne, C., Rentsch, D., Robatzek, S., Webb, R. I., Sagulenko, E., Näsholm, T., ... Lonhienne, T. G. A. (2010). Turning the Table: Plants Consume Microbes as a Source of Nutrients. *PLoS ONE*, 5(7), e11915.
- Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. In *Acta Horticulturae* (Vol. 648, pp. 63–69).
- Roosta, H. R. (2014). Effects of Foliar Spray of K on Mint, Radish, Parsley and Coriander Plants in Aquaponic System. *Journal of Plant Nutrition*, 37(14), 2236–2254.
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396–402.

- Moosta, H. R., & Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae*, 146(0), 182–191.
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E. H., & Verreth, J. a J. (2005). Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32(3-4), 379–401.
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. (2015). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft BMEL.
- Stantau, H.-J. (2015). *Niedrigenergiegewächshäuser: Ergebnisse des ZINEG-Verbundprojektes*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Toumi, S., & Vidal, R. (2010). A Comparison of Urban Agriculture and Short Food Chains in Paris and Tunis. *Urban Agriculture Magazine*, 31–34.
- Ulladice, A. (2011). *Energy analysis of the closed greenhouse concept towards a sustainable energy pathway*. Stockholm: Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology (KTH).
- Wang, X., Spanjers, H., & van Lier, J. B. (2013). Potentials and limitations of biomethane and phosphorus recovery from sludges of brackish/marine aquaculture recirculation systems: A review. *Journal of Environmental Management*, 131, 44–54.

Anhang: Bilder der Soester Aquaponik-Pilotanlage



Fischtanks und Futterautomaten



Biofilter



Europäischer Wels beim Sortieren



Aussaat der Hydroponik-Salate



Horizontale und vertikale Beete



Vertikale Beete



Ergänzende Boxversuche mit verschiedenen Nährlösungen



Boxversuche