

## Abschlussbericht

EIP-Agrar NRW Projekt Innovationsprojekt:

**PROJEKT BINÄA**  
BIOLOGISCHER NÄHRSTÖFFTRANSFER  
DURCH MIKROALGEN

„Biologischer Nährstofftransfer  
durch Mikroalgen (BiNäA)“

geführt unter dem Aktenzeichen (17.02.12.01–8/19-EIP130321249-19-001)

Projektlaufzeit: 11.05.2020 – 31.12.2022



Ministerium für Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums: Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete unter Beteiligung des Landes Nordrhein-Westfalen

## Inhaltsverzeichnis

<b>A Kurzdarstellung</b>	3
I. Ausgangssituation und Bedarf	3
II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	4
III. Mitglieder der OG	4
IV. Projektgebiet	5
V. Projektlaufzeit und -dauer	5
VI. Budget	6
VII. Ablauf des Vorhabens	7
VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse	9
<b>B Eingehende Darstellung</b>	11
I. Verwendung der Zuwendung	11
II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn	12
III. Ergebnisse der OG	15
IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes	16
V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	32
VI. Verwertung und Nutzung der Ergebnisse	32
VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	33
VIII. Kommunikations- und Disseminationskonzept	33
Grundsätzliche Schlussfolgerungen	35
Literaturverzeichnis	36

## A Kurzdarstellung

### I. Ausgangssituation und Bedarf

Für die landwirtschaftliche Urproduktion (Getreide, Mais, Reis etc.) werden zunehmend Grundnährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K) benötigt, deren Ressourcen endlich sind. Diese Nährstoffe sind in sowohl landwirtschaftlichen als auch kommunalen Abwasser zu unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden, können aber oft mittels herkömmlicher Verfahren nicht effektiv abgefangen werden. Diese Stoffe verlassen oft ungenutzt und unwiderruflich den landwirtschaftlichen und urbanen Kreislauf. Das primäre Bestreben des vorliegenden Vorhabens war, durch die Produktion und Verarbeitung von Algen aus Abwässern einen Wirtschaftsdünger reich an Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) zu gewinnen. Das biologisch erzeugte Algenprodukt (Algenbiofilm) sollte sowohl lagerfähig als auch transportwürdig sein, und damit im landwirtschaftlichen Kreislauf als Dünger gezielt auf den Anbauflächen eingesetzt werden können. Das gezielte Anbringen des Düngers auf den landwirtschaftlichen Anbauflächen ist enorm wichtig, gerade vor dem Hintergrund aktueller Regelungen im Düngerecht (Sperrfristen, Düngebilanzen).

Aus diesem Grund haben sich die Projektpartner, welche langjährige Erfahrungen in der landwirtschaftlichen Urproduktion, dem Anlagenbau, der Algen Diversität und -anzucht, aber auch der Gestaltung innovativer Projekte aufweisen, zusammengefunden, um Grundlagenforschung in der Praxis zu evaluieren. In den vergangenen Jahren haben sich Forschungseinrichtungen aus Jülich (FZJ) und Bielefeld (UNIBI) mit der Nutzung von Algen zur Separation und selektiven Gewinnung von Einzel Nährstoffen und der hierdurch gleichzeitig zu erzielenden Reinigung von Abwässern beschäftigt. Wissenschaftliche Vorarbeiten dazu seitens der Universität Bielefeld und dem Forschungszentrum Jülich haben die grundsätzliche Möglichkeit der vorgesehenen Nährstoffrückgewinnung durch Algen aus landwirtschaftlichen Abwässern wie Gülle, Jauche sowie auch aus kommunalen Abwässern gezeigt. Im Rahmen des vorliegenden Projektes galt es, Anbaumethoden und Techniken zu entwickeln, mit denen nährstoffangereicherte Algenbiofilme landwirtschaftlich kosteneffizient produziert werden können und im Ackerbau als Gründünger zum Einsatz kommen. Die Nutzung der mit Nährstoffen angereicherten Algen in Verbindung mit der Abwassernutzung als Nährstoffquelle ist ein Garant für zukünftige Nachhaltigkeit und Innovation in der Landwirtschaft.

## II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Die Rückgewinnung der wertvollen Nährstoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern sowie deren Zurverfügungstellung dem landwirtschaftlichen Nutzpflanzenanbau war im Zentrum der Projektaufgabenstellung. Dazu sollten im Rahmen des Projektes Algenkultivierungssysteme entwickelt werden, welche eine möglichst hohe Produktivität der Algenbiomasse in Bezug auf den Nährstofftransfer aus den Abwässern ermöglichen würden. Mikroalgen entziehen bei ihrem Wachstum dem Abwasser Nährstoffe, welche sonst für eine weitere Nutzung verloren wären oder nur in ungünstiger Verfügbarkeit/Konzentration für den Pflanzenanbau verwertbar sind. Die so landwirtschaftlich angebauten Algen sollen als Gründünger z.B. im Nutzpflanzenanbau eingesetzt werden.

Die Etablierung einer kostengünstigen, anwenderfreundlichen und praxistauglichen (im Verhältnis zu konventionellen Algenbioreaktoren) Algenproduktionsanlage stellte die Prämisse des vorliegenden Projektes dar. Zusätzlich galt es, die zur Algenanzucht geeigneten Substrate aus den landwirtschaftlichen und kommunalen Systemen zu identifizieren und zu qualifizieren. Die mit Nährstoffen angereicherten Algenbiofilme sollten anschließend als Dünger in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion getestet werden, damit die Rückführung von Nährstoffen in den Nährstoffkreislauf ermöglicht werden kann. Zudem sollte die operationelle Gruppe (OG) den Landwirten das Know-how für die zukunftsweisende Kultivierung zur Verfügung stellen.

## III. Mitglieder der OG

Wilhelm David (Forstwirt), Alte Amtsstraße 57, 33100 Paderborn

Eduard Gockel (Landwirt), Husener Str. 200, 33100 Paderborn

Josef Hecker (Landwirt), Lange Trift 3, 33165 Lichtenau

Josef Tacken (Landwirt), Siedlung Eilern 3, 33181 Bad Wünnenberg

Jürgen Amediek (Landwirt), Glasebachstr. 27, 33165 Lichtenau

Tobias Roeren-Wiemers (Landwirt), Lange Str. 14, 33165 Lichtenau (2020 – 2022)

Thomas Lückehe (Landwirt), Dorfstr. 4, 33178 Borcheln

Prof. Dr. Olaf Kruse (Universität Bielefeld), Universitätsstraße 25, 33615 Bielefeld

Dr. Holger Klose u. Dr. Diana Reinecke-Levi (Forschungszentrum Jülich), Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich

Georg Wigge (Geschäftsführer, Stadtwerke Lichtenau GmbH), Leihbühl 21, 33165 Lichtenau

#### IV. Projektgebiet

Das Projektgebiet liegt in der Energiestadt Lichtenau, welche zum Kreis Paderborn gehört. Die walddreiche und vielfältige Naturlandschaft am Eggegebirge sowie der ländliche Charme der Energiestadt Lichtenau eignen sich besonders als Projektgebiet. Von der naturräumlichen Gestalt her gehört Lichtenau zum größten Teil zur Paderborner Hochfläche. Mit ihren 15 Dörfern und rund 11.800 Bürger und Bürgerinnen zählt die ländliche Kommune zu einer der größten Flächengemeinden Nordrhein-Westfalens. Das Projektgebiet ist stellvertretend für andere landwirtschaftliche Regionen zu sehen. Drei ATS-Anlagen befanden sich auf einem Bauernhof (N51°38'03.3. E 8°52'32.6") und eine ATS-Anlage auf dem Gelände einer Kläranlage (WWTP) (N 51°36'15.1". E 8°46'01.7").

#### V. Projektlaufzeit und -dauer

Das Projekt wurde für die Laufzeit vom 01.01.2020 bis zum 31.12.2022 beantragt. Gemäß dem Bewilligungsbescheid vom 11.05.2020 betrug die Projektlaufzeit 31,5 Monate. Aufgrund der COVID-19-Pandemie gab es einige Verzögerungen.

Zum Anfang des Projektes hatte die Algrar GbR die Leadpartnerschaft. Im Verlauf des Projektes hat sich jedoch gezeigt, dass die Algrar GbR aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung mit Landwirten als Partner die an sie gestellten Anforderungen als Leadpartner nicht vollständig erfüllen konnte. Insbesondere der zeitliche und verwaltungstechnische Aufwand als Leadpartner war von der Algrar GbR nicht dauerhaft zu bewältigen. Für eine erfolgreiche Weiterführung des Projektes war es daher unabdingbar, dass die Leadpartnerschaft von einem mit juristischen Fragestellungen und mit bürokratischen Abläufen vertrauten Partner übernommen wird, der die koordinatorischen Aufgaben besser und erfolgreicher zu leisten imstande ist. Alle Partner haben der Übernahme der Leadpartnerschaft und den damit einhergehenden Veränderungen im Geschäftsplan zugestimmt.

Daher haben sich im ersten Halbjahr 2021 einige Änderungen im Projekt ergeben. Die Algrar GbR hat die Leadpartnerschaft abgegeben, welche am 01.07.2021 von der Universität Bielefeld (OG-Partner Prof. Dr. Olaf Kruse) übernommen wurde. Die entsprechenden Anträge und Kooperationsverträge wurden fristgerecht eingereicht.

## VI. Budget

Gemäß dem Zuwendungsbescheid vom 11.05.2020 an die Algrar GbR sind für das Projekt insgesamt 492.796,60 € bewilligt worden. Die Summe verteilt sich wie folgt:

- Ausgaben für die Zusammenarbeit, Einrichtung und Tätigkeit einer Operationellen Gruppe in Summe 80.071,70 € aufgeteilt in:
  - Personalausgaben in Höhe von 64.458,00 €
  - Ausgaben für den Geschäftsplan in Höhe von 5.945,00 €
  - Gemeinkostenpauschale in Höhe von 9.668,70 €
- Ausgaben für die Durchführung des Innovationsprojekts in Summe 412.724,90 € aufgeteilt in:
  - Personalausgaben in Höhe von 221.606,00 €
  - Aufwandsentschädigungen in Höhe von 157.878,00 €
  - Gemeinkostenpauschale in Höhe von 33.240,90 €

Bei der Übernahme der Leadpartnerschaft durch die Universität Bielefeld wurde geprüft, welche Mittel bereits im Projekt mit Verwendungsnachweis bis zur Übernahme abgerechnet wurden. Die übrigen Mittel wurden im Änderungsantrag erneut beantragt.

Gemäß dem Zuwendungsbescheid vom 15.03.2022 an die Universität Bielefeld sind für das Projekt insgesamt 413.234,10 € zur Fortführung des Projektes bewilligt worden. Die Summe verteilt sich wie folgt:

- Ausgaben für die Zusammenarbeit, Einrichtung und Tätigkeit einer operationellen Gruppe in Summe 58.349,64 € aufgeteilt in:
  - Personalausgaben in Höhe von 50.738,00 €
  - Gemeinkostenpauschale in Höhe von 7.610,82 €

- Ausgaben für die Durchführung eines Innovationsprojektes in Summe 354.884,46 € aufgeteilt in:
  - Personalausgaben in Höhe von 213.049,20 €
  - Aufwandsentschädigungen in Höhe von 109.877,88 €

Gemeinkostenpauschale in Höhe von 31.957,38 €

## VII. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war zunächst mit Startschwierigkeiten versehen und konnte aufgrund des verspäteten Zuwendungsbescheids (11.05.2020) sowie gleichzeitigen Belastungen bedingt durch die COVID-19-Pandemie nur schleppend vorangetrieben werden. Des Weiteren hatte die Algrar GbR im Mai 2021 die Leadpartnerschaft abgegeben, da sie aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung (Landwirte als Partner), die an sie gestellten Anforderungen als Leadpartner nicht vollständig erfüllen konnte. Insbesondere der zeitliche und verwaltungstechnische Aufwand als Leadpartner war von der Algar GbR dauerhaft nicht zu bewältigen gewesen. Die Leadpartnerschaft wurde am 01.07.2021 von der Universität Bielefeld übernommen.

Dennoch hatten die Partner in Zusammenarbeit die ersten Test-Anlagen bereits im Mai 2020 aufbauen und die ersten Versuche zur Kultivierung von Mikroalgen durchführen können. Hierfür wurden im Labor gezüchteten Mikroalgen (Spezies wie *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* und *Edaphochlamys*) als Animpfkultur genutzt. Allerdings haben die ersten Kultivierungen gezeigt, dass die Anzuchtsanlagen sehr schnell von Algenfressern (Grazern) überwachsen wurden und die Algenbiomasse sich kaum entwickeln konnte. Daher wurde im Herbst 2020 beschlossen, auf ein anderes, einheitliches und modifiziertes System (in Anlehnung an die Jülicher ATS-Anlagen (ATS = *Algal-Turf-Scrubbers*)) zu wechseln. Die Planung und Auslegung von vier ATS-Anlagen sowie die Beschaffung der wichtigen Anlagenteile und der Bau erfolgte im Winter 2020/2021. Bereits im Mai 2021 wurden vier ATS-Anlagen in Betrieb genommen, durchgängig betrieben und während der Vegetationsperiode wöchentlich und ab dem Herbst zweiwöchentlich beprobt und geerntet.

Drei der ATS-Systeme wurden parallel in Lichtenau aufgestellt. Die Positionierung der Systeme an einem Standort hatte den Vorteil, dass diese synchron betrieben werden konnten (gleiche Bedingungen, Probenentnahme durch gleiche Personen zu definierten Zeitpunkten), was eine

wissenschaftliche Vergleichbarkeit der Produktionseffizienz deutlich erhöhte. Drei unterschiedliche Abwässer, namentlich Rinder- und Schweinegülle (*Cattle, Pig*) sowie Schlammüberstand aus einer Biogasanlage (BGE) wurden regelmäßig von den Landwirten bereitgestellt und zum Standort der Versuchsanlagen geliefert. Ein weiteres ATS-System wurde auf dem Betriebsgelände der Stadtwerke Lichtenau errichtet und vor Ort mit kommunalem Abwasser (tertiäres Abwasser) betrieben.

Eine Zwischenevaluierung der Ergebnisse für das Jahr 2021 zeigte diverse Schwierigkeiten für die mit den landwirtschaftlichen Substraten betriebenen ATS-Anlagen und gleichzeitig stabile und gute Produktivität der mit kommunalem Abwasser betriebenen Anlage (weitere Details sind in Teil B, Kapitel IV zu entnehmen). Aufgrund dieser Umstände wurden im Februar 2022 zwei der ATS-Systeme, die zuvor mit Schweinegülle und BGE betrieben wurden, zur Kläranlage Lichtenau transferiert und seitdem mit kommunalem Abwasser (tertiäres Abwasser) betrieben, so dass dort drei identische ATS-Anlagen zur besseren Vergleichbarkeit parallel betrieben werden konnten. Zusätzlich konnten mittels dieser Anlagen aussagekräftige Daten zur Modifikation (z.B. Supplementierung mit CO<sub>2</sub> sowie die Verringerung der Durchflussraten) der betrieblichen Parameter erhoben werden. Ein ATS-System wurde bis zum Projektende mit separiertem Rindergülle-Abwasser (Reduktion von organischen Schwebstoffen) betrieben, was einen reibungsloseren Betrieb der Anlage ermöglichen sollte.

Um die allgemeine Vergleichbarkeit der Proben zu gewährleisten, wurden die manuelle Ernte der Algenbiomasse nahezu gleichbleibend durchgeführt. Dabei waren sowohl die jeweiligen Betreiber der Anlagen als auch ein Mitarbeiter der Universität Bielefeld involviert. Die so reproduzierbar gewonnenen Proben wurden an der Uni Bielefeld und dem FZ Jülich vielseitig untersucht. Neben den physikalischen Parametern (Nass- und Trockensubstanz sowie die elementare Zusammensetzung der Algenbiofilme) wurde die Zusammensetzung des Algenkonsortiums sowie deren Änderungen mikroskopisch überwacht. Außerdem wurden mit repräsentativen Algenbiofilmen 16S-rDNA- (für bakterielles Konsortium) sowie ITS-rDNA (eukaryotisches Konsortium, (*ITS = internal transcribed spacer*)) Amplicon-Sequenzierungsanalysen durchgeführt, um die mikrobielle Zusammensetzung der Biomasse im Detail festzuhalten und zu analysieren.

Um die Eignung der ATS-Biomasse (Algenbiofilme) als Wirtschaftsdünger festzustellen und um eine Gefährdung für Umwelt und Mensch ausschließen zu können, wurden ausführliche

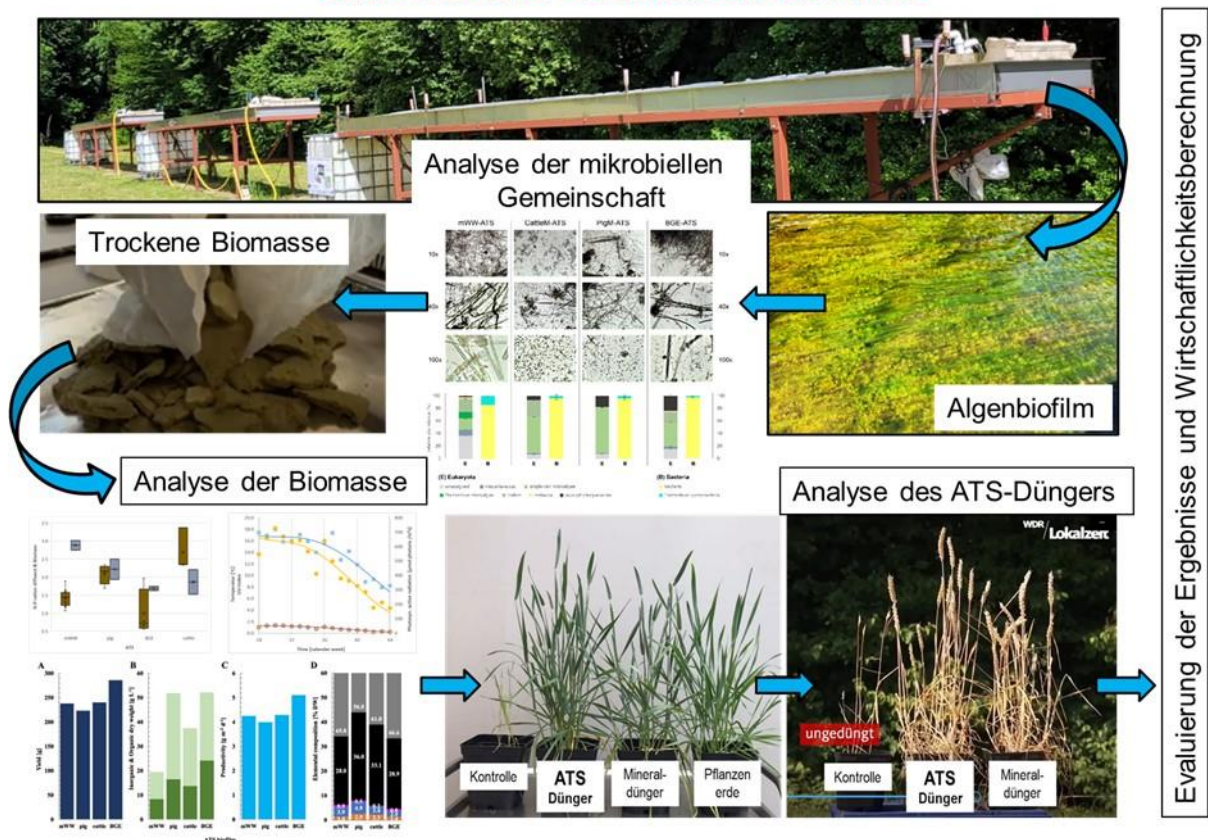


Untersuchungen nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) durchgeführt. Diese beinhalteten Analysen, wie die Bestimmung der Gehalte an Schwermetallen, perfluorierte Tensiden (PFT), Krankheitserregern wie z.B. *Salmonella sp.*, *E. coli*, Enterobakterien sowie auf Antibiotikarückstände.

In Düngeversuchen wurde die Algenbiofilme als Düngemittel für die Kultivierung von handelsüblichem Weizen der Sorte *Triticum aestivum* untersucht.

### VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse

## GRAPHISCHE ZUSAMMENFASSUNG



In dem auf etwa drei Jahre angelegten BiNäA-Projekt wurde die abwasserbasierte Produktion von Mikroalgen und deren Einsatz als Düngemittel in der Landwirtschaft untersucht. Es wurden mehrere experimentelle Mikroalgenproduktionsanlagen auf lokalen landwirtschaftlichen Betrieben sowie an einer Kläranlage im Raum Lichtenau installiert, in denen vier Abwässer und verschiedene Kultivierungsstrategien im Hinblick auf optimales Mikroalgenwachstum getestet wurden. Das technische und biologische Know-how des Forschungszentrums Jülich und der Universität Bielefeld (CeBiTec) wurde genutzt, um ein effizientes Verfahren zur Algenzucht im Freiland mit landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern zu etablieren. Im Verlauf des Projektes wurden die Auswirkungen der

Substratherkunft sowie saisonalen Veränderungen auf die Biomasseproduktivität und mikrobiologische Zusammensetzung untersucht. Das Projekt zielte insgesamt darauf ab, die Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Innovationstransfer aus den Forschungseinrichtungen zu verbessern.

Insgesamt konnte innerhalb des Projektes festgehalten werden, dass ein landwirtschaftlicher Anbau von Mikroalgen herausfordernd ist. Die Kultivierung der Mikroalgen auf ATS-Systemen unter Verwendung von vier unterschiedlichen Abwässern (Rinder- und Schweinegülle, Überstand aus einer Biogasanlage und kommunalem Abwasser (tertiäres Abwasser)) konnte insgesamt als erfolgreich eingestuft werden. Es gab große Unterschiede im ATS-Betrieb und der Biomasseproduktivität bei der Verwendung von landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern, die zum größten Teil mit der mikrobiologischen Zusammensetzung der Algenbiofilme erklärt werden konnten. Während das mit kommunalem Abwasser betriebene ATS-System stets durch eine reproduzierbare, stabile und hohe Mikroalgenproduktivität (bis zu  $\sim 11 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) mit hohem Anteil an filamentösen Algen charakterisiert war, zeigten die mit landwirtschaftlichen Abwässern betriebenen Systeme einen hohen prozesstechnischen Aufwand mit niedriger Produktivität und unregelmäßigen Ernten. Die Analyse, der mit landwirtschaftlichen Abwässern generierten Algenbiofilme, zeigte deutlich, dass diese keine bzw. einen sehr niedrigen Anteil an filamentösen Algen aufwiesen und zum größten Teil aus einzelligen Algen bestanden. Einzellige Mikroalgen in offenen Kultivierungssystemen scheinen besonders sensibel gegenüber saprophytischen und parasitären Mikroorganismen wie Viren, Pilze und Mikroalgenfresser (Grazer) zu sein und daher kam es wohl oft zu einem Zusammenbruch der mit landwirtschaftlichen Abwässern betriebenen ATS-Anlagen. Daher lässt sich schlussfolgern, dass das in diesem Projekt herausgearbeitete ATS-System sich am besten für Abwasser mit niedrigen Nährstoffkonzentrationen und wenigen Schwebstoffen eignen. Dennoch haben eingehende Analysen der produzierten Algenbiomassen zur Düngereignung für die Landwirtschaft gezeigt, dass alle getesteten Algenbiofilme (aus landwirtschaftlichen sowie kommunalen Abwässern) als Dünger erfolgreich eingesetzt werden können und eine vergleichbare, wenn nicht gar überlegene Performanz zu handelsüblichem Mineraldünger aufweisen.

## **B Eingehende Darstellung**

### **I. Verwendung der Zuwendung**

#### Operationelle Gruppe:

Für die Tätigkeiten in der Operationellen Gruppe wurden Personalkosten zzgl. 15 % Gemeinkostenpauschale sowie Ausgaben für den Geschäftsplan in Höhe von insgesamt 80.071,70 € bewilligt. Aufgrund des späten Zuwendungsbescheids vom 11.05.2020 konnte das Projekt nicht wie geplant am 01.01.2020 beginnen. Weitere Verzögerungen haben sich durch die COVID19-Pandemie und den dadurch entstandenen Problemen, vor allem in Hinblick auf Quarantäne, ergeben. Aus diesem Grund wurden im 1. Halbjahr 2020 keine Mittel abgerufen.

Im 1. Halbjahr 2021 hat sich im Projekt eine Änderung ergeben. Die Algrar GbR hat die Leadpartnerschaft abgegeben, welche am 01.07.2021 von der Universität Bielefeld übernommen wurde. Die entsprechenden Anträge und Kooperationsverträge wurden fristgerecht eingereicht. Zusätzlich ist es durch eine Sanktionierung zu einem Abzug der bewilligten Fördermittel gekommen, sodass im Endeffekt nicht mehr der Gesamtbetrag zur Verfügung stand. Insgesamt haben diese Umstände dazu geführt, dass nicht alle Mittel abgerufen wurden. Es hat sich herausgestellt, dass auch die Arbeit in der OG zunächst viel Zeit in Anspruch genommen hat. Es mussten zahlreiche Rahmenbedingungen geklärt und weitergegeben werden. Erst nach ca. einem Jahr konnte sich die Arbeit in der OG auf die tatsächlich vorgesehenen Tätigkeiten beschränken. Generell hat die COVID-19-Pandemie dazu geführt, dass regelmäßige Treffen der OG zum Austausch aller Beteiligten nur eingeschränkt möglich waren, was die Durchführung des Projektes erheblich erschwert hat.

Seit der Übernahme der Leadpartnerschaft durch die Universität Bielefeld sind 11.267,70 € für Personalausgaben inkl. der Gemeinkostenpauschale für die Zusammenarbeit der OG aufgewandt worden.

#### Innovationsprojekt:

Die Bewilligung der Kosten für die Durchführung des Projektes betragen 412.724,90 €. Diese beinhalteten die Personalausgaben in Höhe von 221.606,00 € sowie Aufwandsentschädigungen in Höhe von 157.878,00 €. Die Gemeinkostenpauschale betrug 33.240,90 €.

Seit der Übernahme der Leadpartnerschaft durch die Universität Bielefeld wurden für die Durchführung des Projektes Personalausgaben inkl. der Gemeinkostenpauschale in Höhe von 264.352,48€ aufgewandt. Die Landwirte erhielten Aufwandsentschädigungen in Höhe von 34.104,00 €.

Spätere Personaleinstellungen während der Projektlaufzeit:

Fr. Dr. Ing. Diana Reinecke-Levi wurde zum 01.10.2020 eingestellt,

Fr. Dr. Olga Blifernez-Klassen wurde zum 01.02.2022 eingestellt.

## II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

### Ausgangssituation:

Die Knappheit an Grundnährstoffen wie Stickstoff (N), Kalium (K) und vor allem Phosphor (P) für die landwirtschaftliche Urproduktion (Getreide, Mais, Reis etc.) wird zunehmend problematisch, besonders weil diese Ressourcen nicht unbegrenzt und lokal zur Verfügung stehen. Diese Nährstoffe sind jedoch in sowohl landwirtschaftlichen als auch kommunalen Abwasser zu unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden, können aber oft mittels herkömmlicher Verfahren nicht effektiv abgefangen werden und verlassen oft ungenutzt und unwiderruflich die landwirtschaftlichen und urbanen Kreisläufe. Daher wird allgemein nach der kostengünstigen und effektiven Möglichkeit gesucht, aus Abwässern einen Wirtschaftsdünger zu gewinnen, der reich an Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) ist.

Mikroalgen sind zur Aufnahme von Nährstoffen in geringen aber auch in hohen Konzentrationen besonders gut geeignet, da sie bedingt durch die geringe Größe der Zellen ein hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis aufweisen. Die Gewinnung von Mikroalgenbiomasse ist aufgrund der hohen Kosten für die Bioreaktoren und deren Peripherie sowie der Energie für die Umwälzung und Ernte normalerweise relativ ressourcenintensiv und amortisiert sich in der Regel nur durch die Erzeugung von Hochwertprodukten<sup>1</sup>. Eine ressourcenschonende Möglichkeit zur Gewinnung von Mikroalgenbiomasse mittels einer Nährstoffaufnahme aus den landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern bieten Algenbiofilm-Systeme (ATS), mit welchen vergleichbare Produktivitäten wie in konventionellen Mikroalgenkultivieranlagen in Deutschland<sup>2,3</sup> erzielt werden können<sup>4-6</sup>.

Die erzeugten Algenprodukte (Algenbiofilme) sollten sowohl lagerfähig als auch transportwürdig sein und damit im landwirtschaftlichen Kreislauf als Dünger gezielt auf den Acker-

anbauflächen eingesetzt werden können. Die Nutzung der mit Nährstoffen angereicherten Algen in Verbindung mit der Abwassernutzung als Nährstoffquelle ist ein Garant für zukünftige Nachhaltigkeit und Innovation in der Landwirtschaft.

Der Zusammenschluss an Projektpartnern, welche langjährige Erfahrungen in der landwirtschaftlichen Urproduktion, dem Anlagenbau, der Algendiversität und -anzucht, aber auch der Gestaltung innovativer Projekte aufweisen, hatte dabei ein hohes Potential um die Ergebnisse der Grundlagenforschung in der Praxis zu testen. Wissenschaftliche Vorarbeiten dazu seitens der Universität Bielefeld und dem Forschungszentrum Jülich haben die grundsätzliche Möglichkeit der vorgesehenen Nährstoffrückgewinnung durch Algen aus landwirtschaftlichen Abwässern wie Gülle, Jauche, sowie auch aus kommunalen Abwässern gezeigt.

#### Projektaufgabenstellung:

Das Innovationsprojekt hatte zum Ziel, Nährstoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern dem landwirtschaftlichen Nutzpflanzenanbau in gezielter und separierter Form zugänglich zu machen. Dazu sollten im Zuge des Projektes Algenkultivierungssysteme entwickelt werden, an welchen optimale Bedingungen für eine möglichst hohe Produktivität in Bezug auf den Nährstofftransfer aus den Abwässern in die Algen ermöglicht werden. Mikroalgen entziehen bei ihrem Wachstum dem Abwasser Nährstoffe, welche sonst für eine weitere Nutzung verloren wären oder nur in ungünstiger Verfügbarkeit/Konzentration für den Pflanzenanbau verwertbar sind. Die so landwirtschaftlich angebauten Algen sollen als Gründünger z.B. im Nutzpflanzenanbau eingesetzt werden.

Dabei lag der Schwerpunkt der Zusammenarbeit der Projektpartner primär auf der Identifikation von geeigneten Substraten (aus den landwirtschaftlichen und kommunalen Systemen) sowie der Etablierung einer praxistauglichen Algenproduktion mittels geeigneter Kultiviersysteme. Die gewonnene Algenbiomasse (Algenbiofilme) sollten von UNIBI und FZJ eingehend auf ihre Bestandteile (Biomassenproduktion, Gehalt an Nährstoffen wie N, P, K; aber auch Schwermetalle) sowie mikrobielle Zusammensetzung untersucht werden. Die mit Nährstoffen angereicherten Algenbiofilme sollten anschließend als Dünger in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion getestet werden, damit die Rückführung von Nährstoffen in den Nährstoffkreislauf ermöglicht werden kann. Im Rahmen des vorliegenden

Projektes galt es Anbaumethoden und Techniken zu entwickeln, mit denen nährstoffangereicherte Algenbiofilme landwirtschaftlich kosteneffizient produziert werden können und im Ackerbau als Gründünger zum Einsatz kommen. Zudem sollte die operationelle Gruppe den Landwirten das Know-how für die zukunftsweisende Kultivierung zur Verfügung stellen.

Das Projekt sollte in langfristigen Feldversuchen mit Hilfe der geeigneten Kultiviersysteme die Anwendbarkeit in der landwirtschaftlichen Urproduktion beantworten:

- Welche Nährstoffe können praktisch unter verschiedenen Umwelteinflüssen durch welche Algenspezies rezykliert werden?
- Lassen sich definierte Nährstoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern gezielt separieren und fixieren?
- Ist ein gezielter Algen-Sortenanbau für die Separation von Vorteil?
- Welchen Einfluss haben Witterungsbedingungen?
- Wie sind Produktionsanlage und deren Betriebsparameter zu optimieren?

Durch das Projekt sollten mehrere innovative Ziele und eine Stärkung des ländlichen Raumes erreicht werden:

### **1. Produktion biologischer N-, P- und K-Dünger**

Durch die Produktion von Algen sollten biologische Düngemittel für die Versorgung der landwirtschaftlichen Urproduktion mit Phosphor, Kalium und Stickstoff erzeugt werden. Vor allem die Rückgewinnung von Phosphor ist aufgrund seiner Endlichkeit von sehr hoher Bedeutung. Die Rezyklierung und die Erforschung der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe (vor allem Phosphor) sollte durch das Projekt mit abgedeckt werden.

### **2. Sicherung der landwirtschaftlichen Urproduktion**

Durch die lokale Rückgewinnung von Nährstoffen wird die landwirtschaftliche Urproduktion langfristig gesichert.

### **3. Nutzung von Abwässern als Substrat**

In Bezug auf landwirtschaftliche Betriebe und Kläranlagen müssen dauerhaft steigende gesetzliche Anforderungen erfüllt werden. Die Nutzung des Abwassers zur Kultivierung von Algen wird hierbei ein möglicher Weg sein, die neuen Grenzwerte zu erreichen.

#### **4. Stärkung des ländlichen Raumes**

Landwirte erhalten durch die Nutzung neuer biologischer Düngung in Form selbst angebaute Algen und deren Verwendung im eigenen Ackerpflanzenbau die Möglichkeit einer nachhaltigen Einkommenssteigerung, und der biologische Nährstofftransfer sorgt für nachhaltige Kreisläufe in der Landwirtschaft.

### III. Ergebnisse der OG

#### Gestaltung der Zusammenarbeit der OG:

Zu Beginn des Projektes übernahm die Algar GbR die Leadpartnerschaft des EIP-Projektes „BINÄA“. Algar GbR stellte somit eine wichtige Schnittstelle zwischen den Partnern der Operationellen Gruppe. Über eine extra gegründete WhatsApp-Gruppe oder per Rundmails wurden die Partner regelmäßig über vorrangig administrative Aufgaben informiert und um Arbeitserledigung gebeten. Entgegen der ursprünglichen Planung zu Projektbeginn, war die administrative Durchführung des Projekts hinsichtlich der Mittelabrufe und Kosten- bzw. Stundennachweise deutlich arbeitsaufwendiger als vorab veranschlagt. Zusätzlich kamen noch weitere Belastungen bedingt durch die COVID-19-Pandemie hinzu. Daher war der zeitliche und verwaltungstechnische Aufwand als Leadpartner von der Algar GbR dauerhaft nicht zu bewältigen gewesen. Die Leadpartnerschaft wurde am 01.07.2021 von der Universität Bielefeld übernommen und hat das Format mit permanentem Austausch zwischen den Partnern aufrechterhalten und die Funktion der wichtigen Schnittstelle zwischen den Partnern der OG beibehalten. Die internen Abläufe und Erfahrungsaustausche wurden durch die OG moderiert und in regelmäßigen Treffen diskutiert. Nach Möglichkeit wurde die Gruppe nach außen vertreten und die OG-Partner bei der Außendarstellung unterstützt.

#### Mehrwert des Formates einer OG für die Durchführung des Projekts:

Die klassische Tätigkeit der OG bestand hauptsächlich in der Verwaltung des Projekts. Hierbei waren auch Kenntnisse der fachlichen Arbeit des Innovationsprojekts zur Einschätzung von Ausgaben und Mittelumwidmungen notwendig. Für die Öffentlichkeitsarbeit der OG waren tiefgehende Kenntnisse des Innovationsprojekts für Veröffentlichungen, Interviews und Beantwortung von Anfragen und Gesprächen unerlässlich. Eine strikte Trennung von OG und Innovationsprojekt war im Projekt BiNäA nicht vorgesehen und auch nicht wirklich möglich. Die Projektpartner waren in diesem Sinne miteinander vernetzt und auch voneinander abhängig und

damit eng aneinander durch das gemeinsame Ziel gebunden und zu einem regelmäßigen Austausch motiviert.

### Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Projektende:

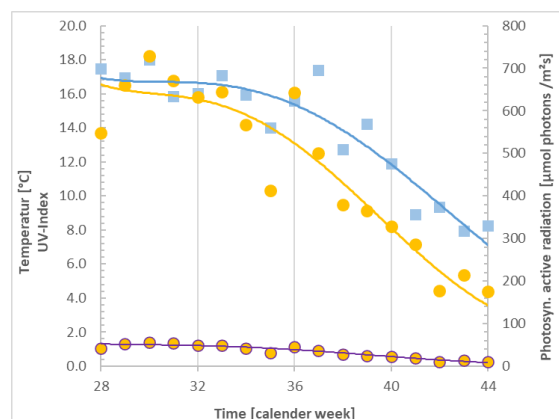
Die koordinative Funktion der OG und gemeinsames bewältigen von Problemen wurde von den Partnern positiv bewertet. Nach Projektende soll eine geeignete Form der weiteren Zusammenarbeit gefunden werden und auch neuen Partnern die Teilnahme ermöglichen.

## IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes

### Zielerreichung:

Im Rahmen einer erforderlichen Anpassung des Versuchsaufbaus konnten ab Juli 2021 die beschriebenen Arbeitspakete 2- 8 insgesamt erfolgreich bearbeitet und die formulierten Ziele erreicht werden.

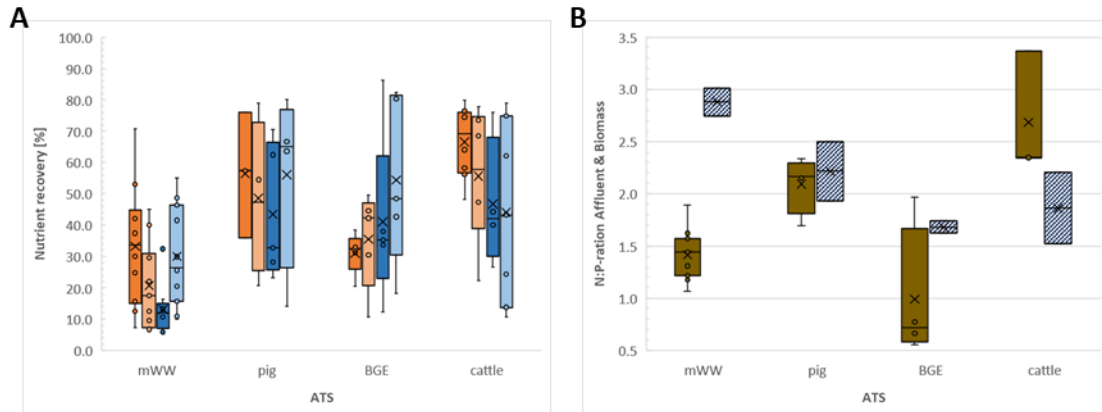
Mit Hilfe von automatisierten Sensormessungen und wöchentlichen Analysen wurden die Umweltdaten (Abb. 1) für die vier ATS-Systeme erhoben. Diese wurden im weiteren Verlauf mit den Nährstoffaufnahmen (N, P) und den Gehalten in der Biomasse korreliert. Die Nährstoffaufnahmen aus den Abwässern (Abb. 2A) sowie die Stickstoff- und Phosphor- Verhältnisse in den vier verschiedenen Medien und Biomassen (Abb.



**Abbildung 1:** Kulturbedingungen während des Versuchszeitraums KW 28-44 für das Jahr 2021 (15.07.-11.11.). Erfasst wurden die photosynthetisch aktive (PAR, ●) und Ultraviolette Strahlung (UV-Index, ○), sowie die Temperatur (■).

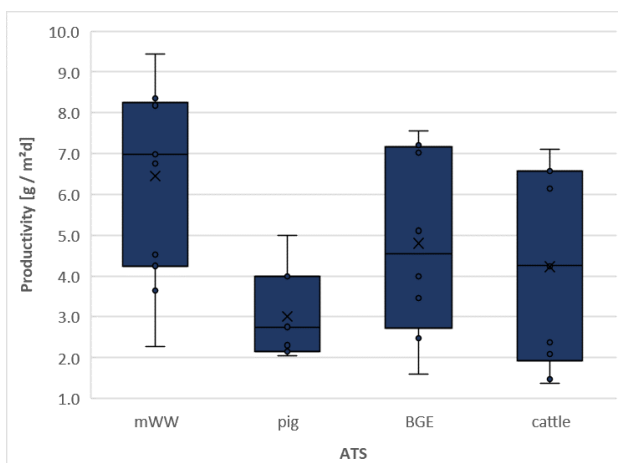
2B) wurden wöchentlich bei Start und Ernte via Laboranalytik erhoben. Die höchste Nährstoffaufnahme erfolgte in Rindergülle (Cattle, TP  $66.5 \pm 11.5$  %, TN  $46.7 \pm 20.9$  %), gefolgt von Schweinegülle (Pig, TP  $56.4 \pm 20.0$  %, TN  $43.5 \pm 21.5$  %), kommunalen Abwasser (mWW, TP  $33.3 \pm 19.5$  %, TN  $13.1 \pm 7.8$  %) und Biogaseffluent (BGE, TP  $31.1 \pm 6.5$  %, TN  $41.1 \pm 27.1$  %) (Fig. 2A). Das Stickstoff- zu Phosphor- Verhältnis (N:P-ratio) in den vier Abwässern zeigte eine große Spannweite (BGE  $\geq 0.7$ , Cattle  $\leq 3.4$ ). Die resultierenden Algenbiomassen wiesen hingegen für alle Medien eine stabiles N:P-ratio (1.5– 3.0) auf und indizierten somit eine robuste Homöostase der zellulären N:P- Verhältnisse unabhängig vom Medium (Abb. 2B).





**Abbildung 3:** Kastengrafiken zu den Nährstoffaufnahmen und -gehalten visualisieren signifikante Unterschiede zwischen den vier getesteten Abwässern und den produzierten Biomassen für den gesamten Versuchszeitraum. **A)** Die Retention von Phosphor, Phosphat, Stickstoff und Nitrat aus den Abwässern zeigte eine große Spannweite. **B)** Die Stickstoff- Phosphor- Verhältnisse (N:P-ratio) in Abwässern und produzierten Biomassen indizieren ein robustes zelluläres N:P-Verhältnis. Legende: Phosphor (TP, ■), Phosphat (PO<sub>4</sub>, ■), Stickstoff (TN, ■), Nitrat (NO<sub>3</sub>, ■), N:P-Verhältnis in Abwässern (■) und Biomassen (▨).

Die resultierenden Biomasseproduktivitäten und -zusammensetzungen zeigten signifikante Unterschiede zwischen den vier Abwässern (Abb. 3, Tab. 1). Die jährliche Produktivität war im Jahr 2021 am höchsten im kommunalen Abwasser (mWW,  $6.4 \pm 2.4 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), gefolgt von dem Biogaseffluent (BGE,  $4.8 \pm 2.3 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), Rindergülle (Cattle,  $4.2 \pm 2.3 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), und Schweinegülle (Pig,  $3.0 \pm 1.1 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) (Abb. 3). An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass regelmäßige Ernten (wöchentlich) nur auf dem ATS-System mit dem kommunalen Abwasser (mWW) möglich waren. Die Ernten der mit den landwirtschaftlichen Abwässern betriebenen ATS-Systeme konnten nicht regelmäßig erfolgen, da die Algenbiofilmbildung auf den ATS instabil war, was sich negativ auf die Produktivität ausgewirkt hatte und daher oft einen Ernte-



**Abbildung 2:** Kastengrafik zu der jährlichen Biomasseproduktivität visualisiert die signifikanten Unterschiede zwischen den vier Substrate im Jahr 2021 (15.07.-28.10.). Die höchste Produktivität wurde im kommunalen Abwasser (mWW) erzielt, gefolgt vom Biogaseffluent (BGE), Rindergülle (cattle), und Schweinegülle (pig).

Rhythmus von 2-3-Wochen erforderte. Es kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass der Anteil an Schwebstoffen und damit auch der Eintrag an organischen Bestandteilen in den landwirtschaftlichen Abwässern sehr hoch war und damit auch zu einer Verfälschung der Gesamtproduktivität dieser Anlagen beigetragen hat.

Der organische Anteil in der Biomasse zeigte ebenfalls signifikante Unterschiede

**Tabelle 1:** Analysis of variances (ANOVA) zu der Biomasseproduktivität und -zusammensetzung fand signifikante Unterschiede zwischen den vier getesteten Abwässern. Zusammenfassend dargestellt sind die paarweisen Vergleiche des Effekts von Abwasser auf die abhängige Variablen Biomasseproduktivität, organisches und anorganisches Trockengewicht (Tukey test, HSD), die Modelleignung (Fisher's F Test, LSD) und dazugehörige Signifikanzen ( $p$ -Werte), sowie die Minima, Maxima und Mittelwert der Variablen.

Abhängige Variable	Analyse der Unterschiede	Kategorien				Min.	Max.	Mittel
		mWW	pig	BGE	cattle			
Produktivität	HSD	B	A	A/ B	A/ B	1.4	9.4	4.8
	LSD	6.4	3.0	4.8	4.2			
	$p$		<b>0.004</b>	0.150	<b>0.055</b>			
Trockengewicht org.	HSD	B	A	A	A	10.5	45.5	24.9
	LSD	15.4	31.2	27.5	27.7			
	$p$		<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.001</b>	<b>0.001</b>			
Trockengewicht anorg.	HSD	C	A	B	A/ B	9.4	59.1	33.3
	LSD	22.0	27.9	47.7	30.2			
	$p$		<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.000</b>	<b>&lt; 0.0001</b>			
	$p$ (zu BGE)		<b>0.047</b>		0.566			
Häufigkeiten		11	7	8	10			

zwischen den vier Substraten (Tab. 1). Hier wies das kommunale Abwasser (mWW) den geringsten Anteil auf, gefolgt von Rindergülle (Cattle), Biogaseffluent (BGE), Schweinegülle (Pig) (Tab. 1). Der anorganische Anteil (die Asche mit Nährsalzen), war am höchsten im

kommunalen Abwasser (mWW), gefolgt von Biogaseffluent (BGE), Rindergülle (Cattle), und Schweinegülle (Pig) (Tab. 1). ANOVA wurde angewandt, um simultan den Effekt der Abwässer auf die drei abhängigen Variablen Biomasseproduktivität, organisches und anorganisches Trockengewicht zu testen. Die Tabelle 1 präsentiert eine Zusammenfassung des Tukey-Tests (Paarweiser Vergleich), Fisher's F Test (Modelleignung) und der  $p$ -Wert (Signifikanz), sowie Minima, Maxima und Mittelwert für jede abhängige Variable. Beide, Tukey und Fisher's F Tests, fanden signifikante Effekte für die Biomasseproduktivität im kommunalen Abwasser (mWW). Diese formte die statistische Gruppe B ( $F_{11, 36} = 6.4$ ) im Vergleich zu der Produktivität in der Schweinegülle (Pig), Gruppe A ( $F_{7, 36} = 3.0$ ,  $p = 0.004$ ). Die Produktivität in der Rindergülle (Cattle) zeigte partielle Übereinstimmung mit beiden Gruppen, war jedoch signifikant anders und formte die Gruppe A/B ( $F_{10, 36} = 4.2$ ,  $p = 0.055$ ) zusammen mit dem Biogaseffluent (BGE) ( $F_{8, 36} = 4.8$ ,  $p = 0.150$ ) (Tab. 1). Insbesondere das organische Trockengewicht im kommunalen Abwasser unterschied sich signifikant ( $p \leq 0.001$ ) von den anderen Abwässern und formte eine eigene statistische Gruppe B ( $F_{11, 36} = 15.4$ ). Auch das anorganische Trockengewicht im kommunalen Abwasser unterschied sich signifikant ( $p \leq 0.0001$ ) von den anderen Abwässern und formte eine eigene statistische Gruppe C ( $F_{11, 36} = 22.0$ ). Zusätzlich formte das Biogaseffluent eine eigene statistische Gruppe B ( $F_{8, 36} = 47.7$ ) im Vergleich zu der Schweinegülle, Gruppe A ( $F_{7, 36} = 27.9$ ,  $p = 0.047$ ) und der Rindergülle Gruppe A/B ( $F_{10, 36} = 30.2$ ,  $p = 0.566$ ) (Tab. 1).

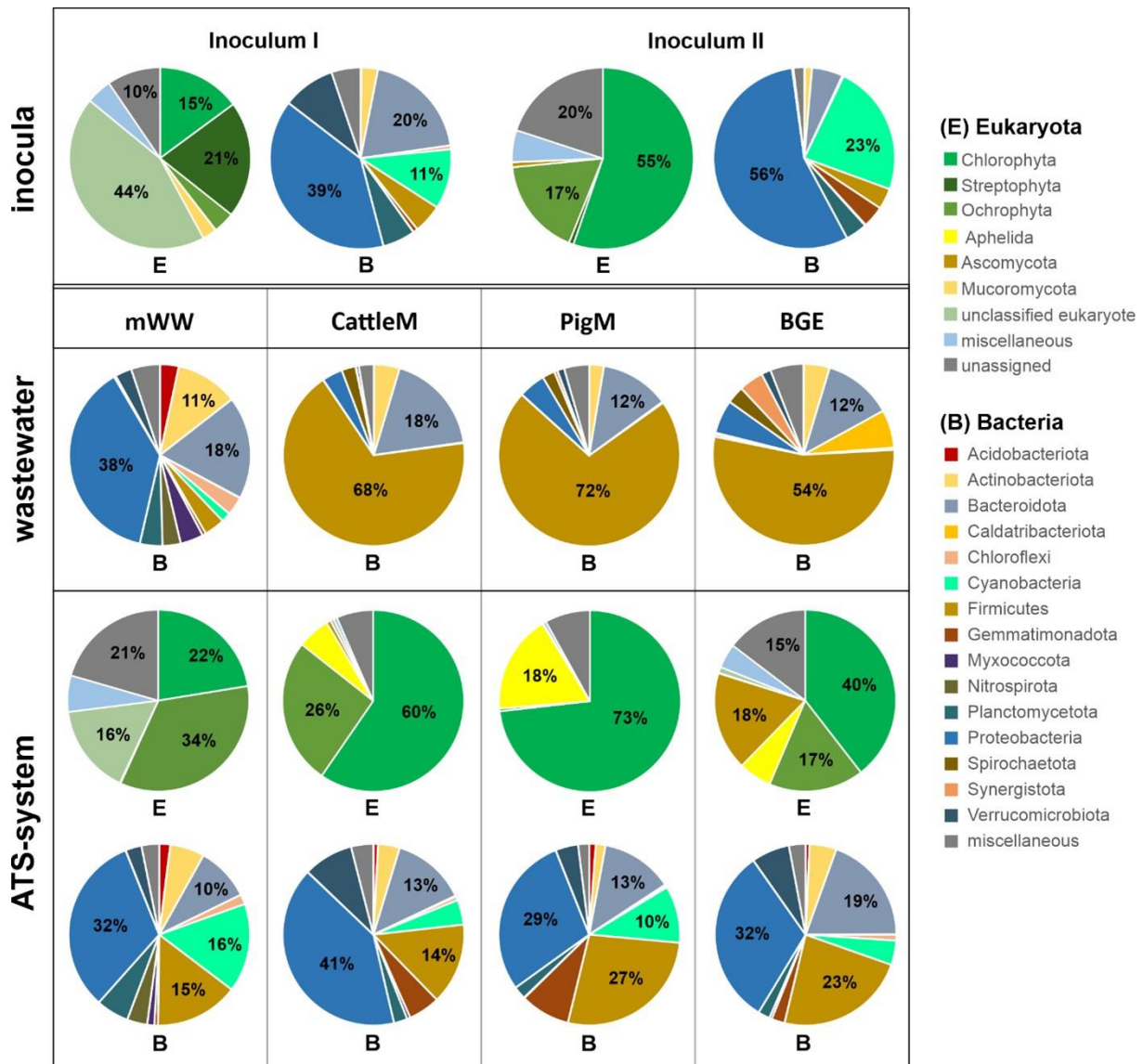
**Tabelle 2:** Die Erfassung der operative taxonomischen Einheiten (OTUs) während der taxonomischen Mikrobiome-Profilierung der Animpfkulturen (Inoculum I und II), der Substrate sowie der jeweiligen Algenbiofilme erfolgte mittels der Amplicon-Sequenzierungsanalysen der Markergene 16S rDNA für die bakterielle und ITS rDNA für eukaryotische Spezies. (Inoculum I: Vorkulturen der Jülicher ATS-Anlagen, Inoculum II: einheimischer Algent Teppich, kultiviert bei den Stadtwerken Lichtenau. Kommunales Abwasser (mWW), Rindergülle (CattleM), Schweinegülle (PigM) sowie Biogaseffluent (BGE)).

	bakterielle Spezies OTUs: 16S rDNA	eukaryotische Spezies OTUs: ITS rDNA	
Inoculum I	779 ± 33	239 ± 21	
Inoculum II	1002 ± 104	625 ± 20	
Kulturmedium	mWW	1903 ± 258	
	CattleM	1992 ± 186	
	PigM	1301 ± 106	
	BGE	1456 ± 45	
ATS-System	mWW-ATS	2135 ± 263	792 ± 67
	CattleM-ATS	1372 ± 105	277 ± 31
	PigM-ATS	1590 ± 482	191 ± 11
	BGE-ATS	1096 ± 65	475 ± 33

Parallel zu der Erfassung der wachstumsspezifischen Parameter sowie Umweltparameter, wurden die Algenbiofilme der vier ATS-Systeme regelmäßig (vor allem bei jeder Ernte) visuell und mikroskopisch kontrolliert. Nach allen erforderlichen Optimierungen der ATS-Anlagen und Stabilisierung der Produktionsparameter erfolgten im September 2021 die ersten taxonomischen Mikrobiome-Profilierungsanalysen. Dabei wurde die Zusammensetzung der

mikrobiellen Gemeinschaft der Animpfkulturen (Inoculum I und II), der Abwässern sowie der Algenbiofilme, die mit den vier Substraten (kommunalen/kommunalem Abwasser (mWW), Rindergülle (Cattle), Schweinegülle (Pig) sowie Biogaseffluent (BGE)) gewachsen sind, untersucht. Die Analysen zeigten die höchste Diversität sowohl innerhalb der bakteriellen (2135±263 operative taxonomische Einheiten, OTUs) als auch eukaryotischen Spezies (792±67 OTUs) in den Algenbiofilm-Proben, die mit kommunalem Abwasser (mWW) kultiviert wurden, gefolgt vom Biogaseffluent (BGE), Rindergülle (CattleM), und Schweinegülle (PigM) (Tabelle 2). Diese hohe Speziesdiversität des mWW-Algenbiofilmes bietet eine enorme Flexibilität zur Anpassung an die vorherrschenden Umweltbedingungen und könnte daher sehr vorteilhaft sein. Die Profile der mikrobiellen Gemeinschaft haben des Weiteren eine verstärkte Dominanz der einheimischen Kulturen gezeigt, sowohl die eingebrachten Spezies des Inokulum I (Algent Teppich aus Jülich) als auch die Mikroorganismen der jeweiligen Abwässer konnten gar nicht oder nur in geringeren Häufigkeiten auf den ATS-Algenbiofilmen detektiert werden. Die meisten Mikroorganismen im Inoculum II (einheimischer Algent Teppich, kultiviert bei den Stadtwerken Lichtenau) konnten in Spuren in den Algenbiofilmen detektiert werden. Die Analyse der eukaryotischen Zusammensetzung der Algenbiofilme zeigte, dass die mit landwirtschaftlichen Abwässern (Schweinegülle (PigM), Rindergülle (CattleM), und Biogaseffluent (BGE)) kultivierten Algenbiofilme hauptsächlich von Grünalgen

(Chlorophyceae) zu 73%, 60% bzw. 40% dominiert waren, wobei die Algenbiofilme in CattleM und BGE hohe Anteile an Diatomeen (Bacillariophyta; Kieselalgen) aufwiesen (Abb. 4). Zusätzlich zeigten alle drei Algenbiofilme einen hohen Anteil an saprophytischen und parasitären Spezies sowie Pilze. Die hohen Anteile an parasitären Organismen könnten für die Unregelmäßigkeiten beim Algenbiofilmaufbau und geringeren Erntemengen ursächlich sein.

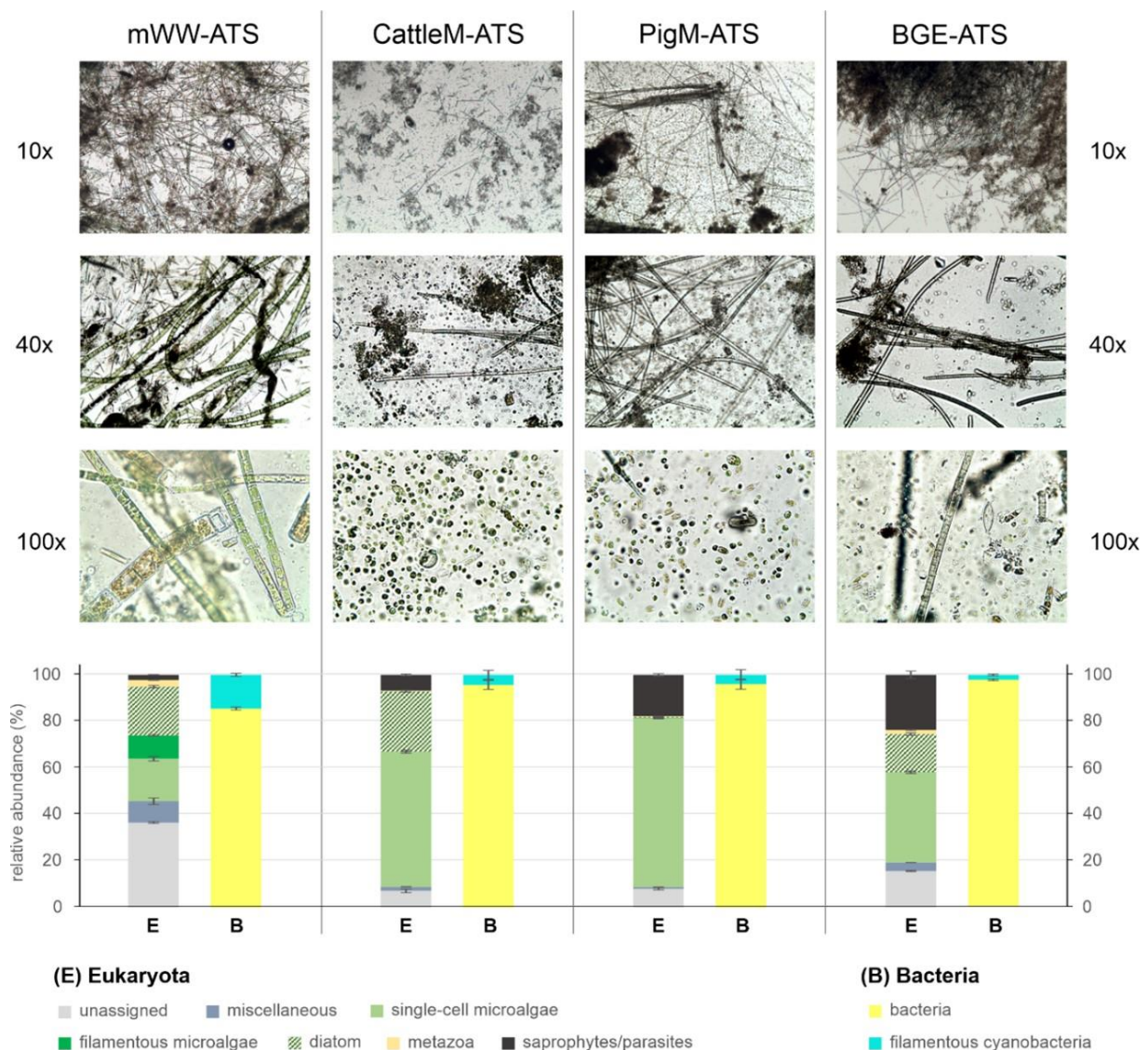


**Abbildung 4:** Kuchendiagramme der detektierten Spezies auf Phylum-Ebene in den Animpfkulturen (Inoculum I und II), der Substrate (wastewater) sowie der jeweiligen Biofilme (ATS-System). Die Analyse erfolgte mittels der Amplicon-Sequenzierung der Markergene 16S rDNA für die bakterielle (B) und ITS rDNA für eukaryotische Spezies (E). (Inoculum I: Vorkulturen der Jülicher ATS-Anlagen, Inoculum II: einheimischer Algen-Teppich, kultiviert bei den Stadtwerken Lichtenau kommunalen Abwasser (mWW), Rindergülle (CattleM), Schweinegülle (PigM) sowie Biogaseffluent (BGE)).

Der mit kommunalen Abwasser (mWW) kultivierte Algenbiofilm zeigte eine hohe Phyla-übergreifende Speziesdiversität und bestand zu 34% aus den Vertretern der Ochrophyta (goldbraunen Algen (Chrysophyceae), gelbgrünen Algen (Xanthophyceae) sowie Diatomeen),

und zu 22% aus Grünalgen (Chlorophyceae), sowie zu 37% aus bisher unbekannten Spezies (Abb. 4).

Die bakteriellen Gemeinschaften der Inokula und der vier resultierenden Algenbiofilme waren weitestgehend von Proteobakterien dominiert, gefolgt von den Vertretern der Bakteroidota, Firmicutes und Cyanobakterien. Die bakterielle Zusammensetzung der jeweiligen Abwässer hatte sich enorm unterschieden. Während das kommunale Abwasser (mWW) eine Vielzahl an verschiedenen Phyla enthielt, waren die landwirtschaftlichen Abwässer überwiegend von dem Phylum Firmicutes dominiert (Abb.4).



**Abbildung 5:** Mikroskopische und Amplicon-Sequenzierung-basierte Analyse der Beschaffenheit (Anteile der filamentösen und einzelligen Spezies) der mikrobiellen Gemeinschaft der jeweiligen Algenbiofilme (ATS-Systeme kultiviert mit kommunalen Abwasser (mWW), Rindergülle (CattleM), Schweinegülle (PigM) sowie Biogaseffluent (BGE)). Gezeigt sind mikroskopische Aufnahmen der Biofilm-Proben bei 10-fachen, 40-fachen und 100-fachen Vergrößerungen sowie evaluierten Analysen der Amplicon-Sequenzierung der Markergene 16S rDNA für die bakterielle (B) und ITS rDNA für eukaryotische Spezies (E).

Ein weiterer interessanter Aspekt der Analysen der mikrobiellen Gemeinschaften lieferten die regelmäßigen mikroskopischen Untersuchungen der vier Algenbiofilme, welche durch die Amplicon-Sequenzierung-basierte Analysen bestätigt wurden (Abb. 5).

Der mit kommunalen Abwasser kultivierte Algenbiofilm (mWW-ATS) wies durchgehend einen stabilen Algenteppich mit hohem Anteil an filamentösen Mikroalgenpezies (Vertreter der grünen, goldbraunen und gelbgrünen Mikroalgen sowie Cyanobakterien und manchen Vertretern der Diatomeen) auf (Abb. 5). Die mit landwirtschaftlichen Abwässern kultivierten Biofilme bestanden zum größten Teil aus einzelligen Grünalgenpezies wie *Chlamydomonas*, *Edaphochlamys* und *Chlorella* bis zu 60% (CattleM-ATS), 73% (PigM-ATS) und 40% (BGE-ATS) und wiesen nur einen geringen Anteil an filamentösen Cyanobakterien auf (Abb. 5). Zusätzlich konnte in diesen Algenbiofilmen ein hoher Anteil an saprophytischen und/oder parasitären Organismen (z.B. Pilze und Mikroalgenfresser (Grazer)) festgestellt werden.

Grundsätzlich konnte während der Saison 2021 festgehalten werden, dass die mit den landwirtschaftlichen Abwässern betriebenen ATS-Systeme insgesamt große prozesstechnische Probleme bereitet hatten (z.B. verstopfte Pumpen) und in Ernten geringeren Biomassen und unzuverlässigen Ernte-Rhythmen resultierten (Abb. 3). Die Biomasse der Algenbiofilme von Rindergülle (CattleM), Schweinegülle (PigM) sowie Biogaseffluent (BGE) Algenbiofilme wies einen hohen organischen Anteil auf (Tabelle 1), was sich unter Umständen negativ auf die Leistung als Düngemittel auswirken könnte, und einen geringen Anteil an filamentösen Mikroalgen, was den Halt der Algen auf den ATS-Systemen erschwerte (Abb. 5). Andererseits lieferte der mit kommunalen Abwasser (mWW) kultivierte Algenbiofilm zuverlässige und hohe Ernten (Fig. 1), wies einen hohen anorganischen Biomasseanteil und ein optimales N:P-Verhältnis (Fig. 2 und Tabelle 1) im Vergleich zum kommerziellen Mineraldünger auf.

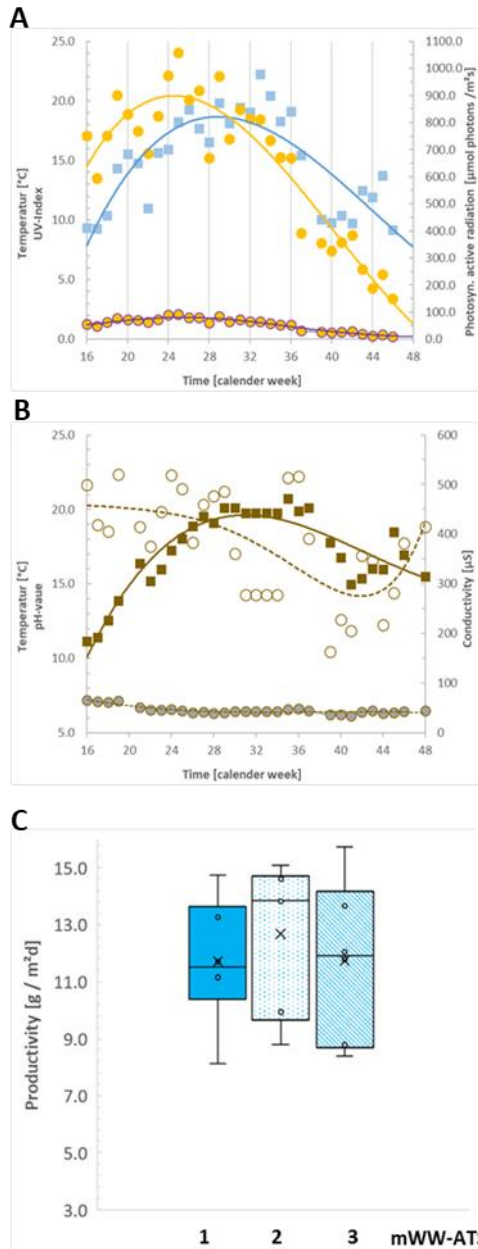
Auf Grund der positiven Ergebnisse mit dem kommunalen Abwasser und prozesstechnischer Probleme mit den landwirtschaftlichen Abwässern, wurden für das Jahr 2022 zwei ATS-Systeme auf das Betriebsgelände der Kläranlage der Stadtwerke Lichtenau überführt. Ein ATS-System ist auf dem Hof Roeren-Wiemers geblieben und wurde zur Reduktion von organischen Schwebstoffen mit separierten Rindergülle-Abwasser kultiviert/betrieben. Allerdings hatte sich innerhalb des Jahres 2022 gezeigt, dass dieses Abwasser zu einem vermindertem Algenwachstum geführt hatte (es konnte insgesamt nur eine einzige Ernte mit diesem System

durchgeführt werden). Nährstoff-Mangel als Ursache konnte in Labor-Kontrollversuchen und Feld-Ergänzungsversuchen mit Zugabe von zusätzlichen Nährstoffen zu dem Abwasser ausgeschlossen werden. Mögliche Gründe für das verminderte Mikroalgenwachstum könnten sein: 1) der hohe Anteil an einzelligen Grünalgen, 2) das Schwebstoff-reduzierte Abwasser

wurde ärmer an organischem Material, was zur Reduktion an saprophytischen Organismen (wie Pilze) führte und die einzelligen Grünalgen keinen Halt auf dem ATS mehr gefunden hatten, 3) ein hoher Anteil an Grazern, welche sich vorwiegend von einzelligen Mikroalgen ernähren.

Daher erfassen die nachfolgenden Daten die Analysen der drei ATS-Systeme, die mit kommunalen Abwasser kultiviert wurden. Der mWW-Algenbiofilm, der ganzjährig stabil war (ohne Nachimpfung und nach Überwinterung seit Mai 2021) diente dabei als Inoculum für alle drei Anlagen. Der Versuchszeitraum für das Jahr 2022 umfasst die KW 16- 48 (20.04.-30.11.). Die Umweltdaten (Abb. 6A) und Kulturparameter der drei ATS-Systeme (Abb. 6B) wurden mittels Online-Sensormessungen erhoben und als wöchentliche Mittel dargestellt.

Optimierung der Datenaufzeichnung und Operationsparameter sowie die Installation von (online) Früh-Warmsystemen (z.B. bei Pumpen-Ausfall) haben dabei enorm beigetragen, die ATS-Systeme optimal zu betreiben. Es konnten im Jahr 2022 reproduzierbar höhere Ernten und damit höhere (182- 197%) Biomasseproduktivitäten unter Standardbedingungen (ATS-1  $11.7 \pm 2.2$ , ATS-2  $12.7 \pm 2.6$ , ATS-3  $11.7 \pm 2.8$  g m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>), im Vergleich zum Vorjahr (Abb. 2, mWW,  $6.4 \pm 2.4$  g m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>; Abb. 6C)



**Abbildung 6:** Kulturbedingungen während des Versuchszeitraums (20.04.-30.11.2022). **A)** Erfasst wurden die Umgebungstemperatur (■), Ultra-violette (UV-Index, ○) und photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, ●). **B)** Im Affluent wurden die Temperatur (■), und Konduktivität (●), sowie der pH-Wert (○) gemessen. **C)** Biomasseproduktivitäten der drei mWW-ATS-Systeme.

erreicht werden. Weitere Amplicon-Sequenzierung-basierte Analysen der mikrobiellen Gemeinschaft legen die Vermutung nahe, dass mikrobiologische Anpassungen der Algenbiofilme für die Produktionssteigerung verantwortlich sind. Dieser Sachverhalt wird zukünftig noch näher untersucht.

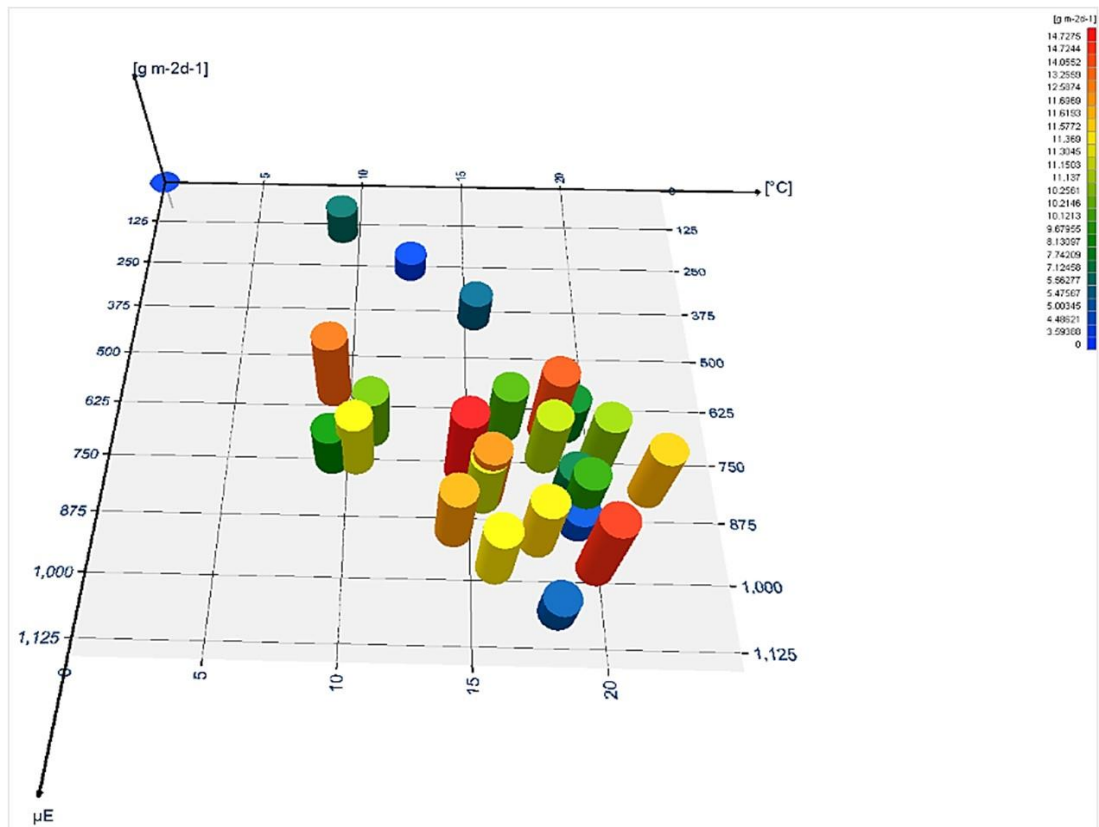
Zusätzlich wurden in diesem Versuchszeitraum verschiedenen Prozessführungen an den drei ATS-Systemen getestet. Dazu gehörten die Supplementierung mit CO<sub>2</sub> (3.3 L min<sup>-1</sup>) sowie die Verringerung der Durchflussrate auf 50% (88s) und 25% (150s). Die CO<sub>2</sub>-Gabe ermöglichte eine Erhöhung der Produktivität um 9.7% (ATS-3, 10.2 ± 2.7 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) gegenüber der Kontrolle (ATS-1, 9.2 ± 3.5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Eine Verringerung der Durchflussrate um 50% (88s) führte zu einer Reduktion der Biomasseproduktivitäten um 47.2% (ATS-3, 6.7 ± 2.7 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) gegenüber der Kontrolle (ATS-1, 9.9 ± 2.2 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Eine weitere Verringerung auf 25% (150s) führte zu einer 46-50%-igen Reduktion der Biomasseproduktivität (ATS-1, 3.1 ± 0.3 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) gegenüber den Kontrollen mit 88s (ATS-2, 5.7 ± 0.2, ATS-3 6.1 ± 0.9 g m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>). Diese Ergebnisse zeigten deutlich, dass die Biomasseproduktivität sowohl durch die CO<sub>2</sub>-Supplementierung als auch durch die Veränderung der Durchflussrate positiv oder negativ moduliert werden kann, jedoch in diesen getesteten (offenen) ATS-Systemen zu geringfügigen Ertragssteigerung geführt haben. Somit sind die angewandten Betriebsparameter für die verwendeten ATS-Systeme als optimal anzusehen.

Die Auswirkungen von technischen und menschlichen Faktoren, sowie von Temperatur und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR, μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) auf die Biomasseproduktivität wurden mittels eines Säulen-Diagramms für die Kontrolle ATS-1 visualisiert (Abb. 7). Erkennbar ist hier die robuste Biomasseproduktion über einen breiten Temperatur- (9.2- 22.2 °C) und PAR-Bereich (600- 1100 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>). Diese Kulturbedingungen waren von April bis September 2022 gegeben und ermöglichten wöchentliche Ernten aller drei ATS-Systeme. Unter verringerter PAR (150- 400 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), von September bis Dezember 2022, war die Biomasseproduktivität stark reduziert (41- 49%) und die Ernten wurden im zwei-wöchigen Rhythmus vorgenommen (Abb. 7).

Zusätzlich zeigt die Biomasseproduktivität eine hohe Varianz innerhalb des Optimums, welche nicht durch die Kulturbedingungen erklärbar ist. Hier sind sowohl technische Ursachen als auch menschliche Faktoren wie zum Beispiel wechselnde Mitarbeiter und daraus resultierende unterschiedliche Anpressdrücke und Zeitpunkte bei der Ernte bestimmend. Um



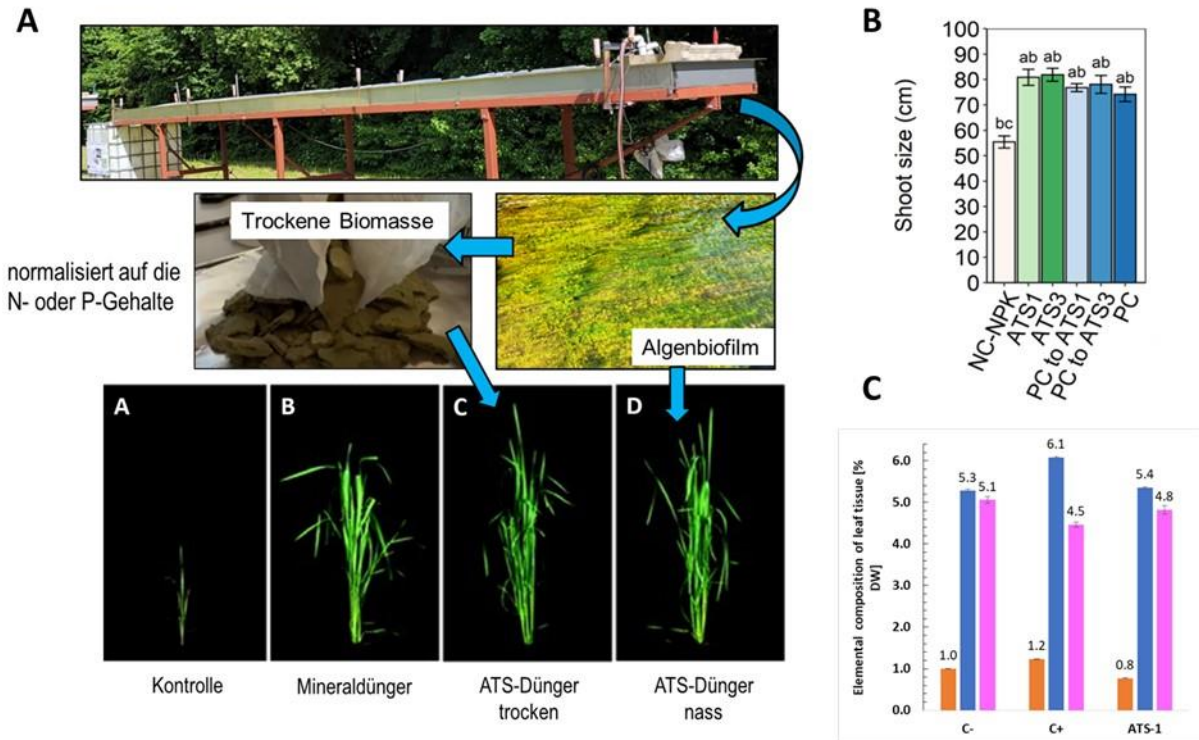
diese Probleme zu vermeiden und noch reproduzierbare Produktivitäten zu erzielen, wäre eine Automatisierung des ATS-Erntesystems naheliegend. In kommerziellen Anwendungen können die Personalkosten dadurch signifikant reduziert werden.



**Abbildung 7:** 3D-Säulengrafik visualisiert den Effekt von Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) und photosynthetisch aktive Strahlung ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) auf die Biomasseproduktivität in der Kontrolle ATS-1.

Ausgewählten Algenbiofilme, die im Verlauf des Projektes mit den vier Abwässern generiert wurden, wurden nach eingehenden Elementar- und Wirtschaftsdüngeranalysen für die Düngeversuche aufgearbeitet (Abb. 8). Hierbei wurden die Gesamtnährstoffgehalte, Belastung mit Schwermetallen (As, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Tl), und mikrobiologische Untersuchungen zu Keimstandards (aerobe Gesamtkeimzahl bei  $37^{\circ}\text{C}$ , fäkal-coliforme Bakterien, *E. coli*, *Enterokokken*, *Salmonellen*) sowie zu antibiotisch wirksamen Substanzen durchgeführt. Die Untersuchungen fanden nur in der Biomasse an der Kläranlage erhöhte Werte an Schwefel (S, 0.67 % TM). Jedoch scheinen die ATS-Systeme Schwefel unabhängig von dem Kulturmedium einzulagern. ATS-1 mit Schweinegülle zeigte ebenfalls erhöhte Schwefelwerte von 1% TM.

Die Düngeversuche wurden mit handelsüblichen Weizen der Sorte *Triticum aestivum* in standardisierten Verfahren unter Gewächshausbedingungen durchgeführt (Abb. 8A). Unter



**Abbildung 8:** Die Düngewirkung von ATS-Biomassen auf Weizenpflanzen war vergleichbar mit kommerziellem Mineraldünger. **A)** Zusammenfassende Darstellung. **A)** Wuchshöhe von Weizenpflanzen nach 150 Tagen Kultivierung. **B)** Die N-, P- und K-Gehalte in den Blättern waren leicht erniedrigt bei der Düngung mit ATS-Biomasse gegenüber dem Standarddünger. Legende: Negative Kontrolle (NC-NPK), ATS-Kontrolle (ATS-1), ATS mit CO<sub>2</sub>- Supplementierung (ATS-3), Positivkontrollen normalisiert zur jeweiligen ATS-Biomasse (PC), kommerzieller Mineraldünger (PC oder C+), Phosphat (■), Nitrat (■), Kalium (■).

anderem wurden die nassen oder getrocknete Biomassen vermahlen, mit Sand vermengt und in 3-L Pflanzgefäße aufgeteilt. Um die Performanz des Algenbiomassedüngers besser vergleichen zu können, wurde die Phosphatkonzentration (PO<sub>4</sub>-P) auf 4,5 g m<sup>-2</sup> normalisiert. Die Testung der gewonnenen Algenbiofilme als organischer Langzeitdünger für Weizenpflanzen (Abb. 8) zeigte wiederholt vergleichbare Düngewirkungen ( $p = 0.005$ ). Versuche mit den verschiedenen Algenbiofilmen normalisiert auf die N- oder P- Gehalte von kommerziellen Mineraldüngern erzielte vergleichbares Pflanzenwachstum (Abb. 8B) und Nährstoffgehalte (Abb. 8C). Abschließende Untersuchungen zur Anzahl von Körner pro Ähre, sowie deren Protein- und Stärkegehalt laufen, und werden disseminiert. Zudem sind weiterführende Untersuchungen des Wurzelverhalten und des Bodenmikrobioms geplant.

#### Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen:

Gemäß dem Wechsel der Leadpartnerschaft kam es zu Veränderungen der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplan (AZA) innerhalb der jeweiligen OG. Zudem wurden viele Abläufe durch die COVID-19-Pandemie erschwert.

Trotz einiger Schwierigkeiten konnte im Rahmen des Projektes ein gutes Gesamtergebnis erzielt werden.

### Projektverlauf:

Trotz einiger Startschwierigkeiten aufgrund des verspäteten Zuwendungsbescheids vom 11.05.2020, gleichzeitiger Belastungen bedingt durch die COVID-19-Pandemie, sowie einem Wechsel der Leadpartnerschaft (Übernahme am 01.07.2021 von der Universität Bielefeld) wurde das Projekt bereits im späten Frühjahr 2020 gestartet.

Die ersten Testanlagen „Schiefe Abflussebene“ und „Schwimmfloßbecken“ (Abb. 9) wurden auf dem Hof Tacken bzw. Hof Gockel errichtet. Anfang Juni 2020 wurden die Anlagen mit Mikroalgen angeimpft und mit Schweine- bzw. Rindergülle als Substrate betrieben. Als



Animpfkulturen (Inocula) für die ersten Testanlagen dienten im Labor gezüchtete Mikroalgen (Spezies wie *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* und *Edaphochlamys*).

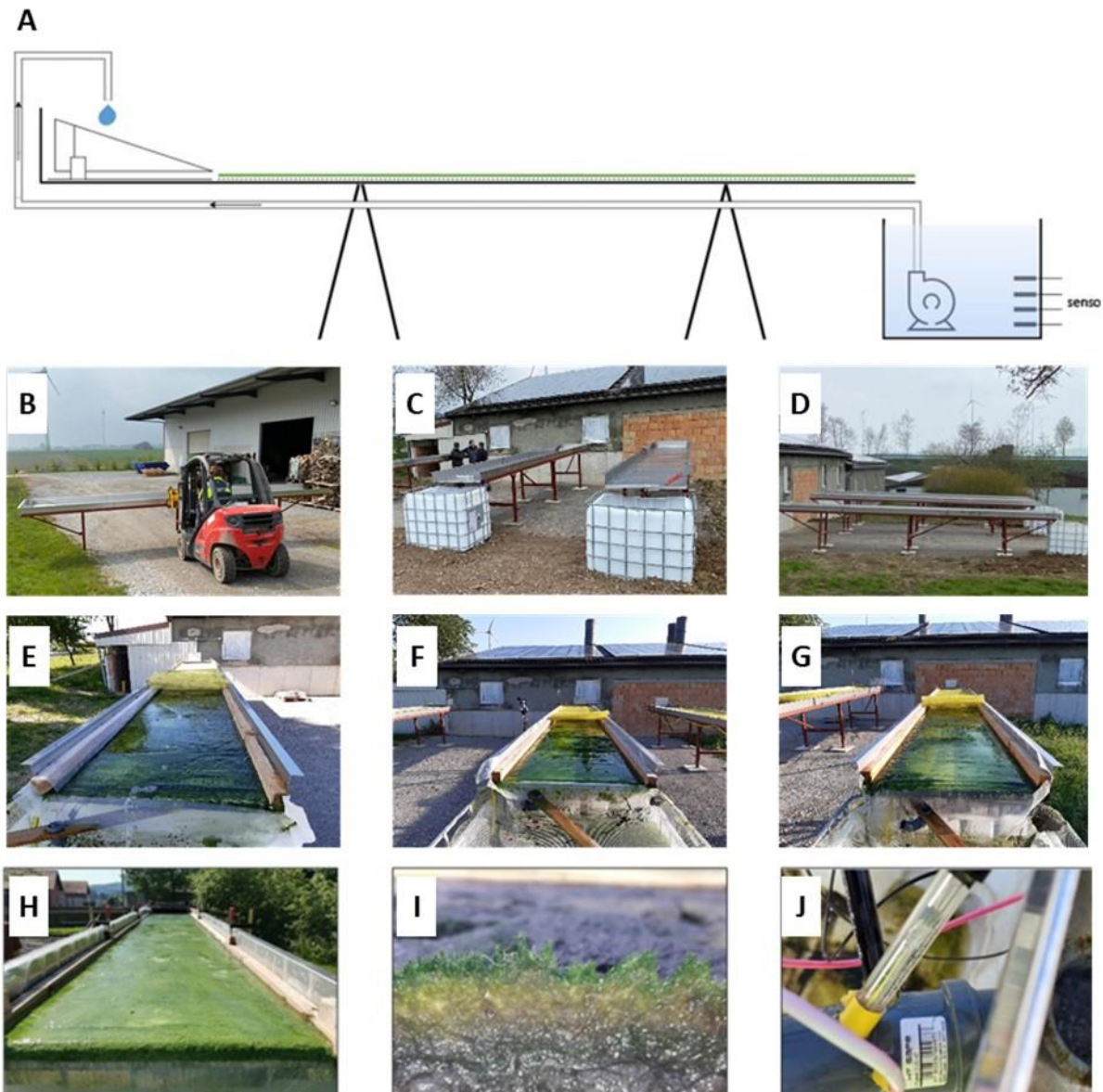
Kurze Zeit nach dem Animpfen konnte auf beiden Anlagen ein sehr starkes Algenwachstum beobachtet werden, das mit der Zeit immer mehr stagnierte.

Nähere Beobachtungen haben gezeigt, dass die Test-Anzuchtanlagen sehr schnell von Grazern überwachsen wurden und die Algenbiomasse sich kaum entwickeln konnte.

Die beschriebenen Systeme wurden im Frühjahr 2021 nicht wieder in Betrieb genommen.

**Abbildung 9:** Praktische Ausführung der ersten Testanlagen zur Kultivierung von Mikroalgen. **A)** Testanlage „Schiefe Abflussebene“ auf dem Hof Tacken. Die Anlage im Umpumpverfahren mit der dünnen Phase von Schweinegülle betrieben. Das Arbeitsvolumen der Anlage betrug ca. 200 L und der Versuchstisch wird periodisch über eine Kippwanne geflutet. Zum Zeitpunkt der Bildaufnahme erfolgte noch kein Algenbesatz. **B)** Testanlage „Schwimmfloßbecken“ auf dem Hof Gockel mit ersten Modifikationen (Rohrleitung mit verschiedenen Querabgängen und Endausfluss) zur Verteilung des Nährstoffwassers. Die Anlage wurde mit Rindergülle betrieben und zeigte anfängliches Algenwachstum auf den Anbauflächen.

Bereits im Herbst 2020 wurde beschlossen auf ein anderes, einheitliches und modifiziertes System (in Anlehnung an die Jülicher ATS-Anlagen (ATS = *Algal-Turf-Scrubbers*)) zu wechseln. Die Planung und Auslegung von vier ATS-Systeme wurde über den Winter durchgeführt, die wichtigen Elemente/Gerätschaften bestellt und aufgebaut (Abb. 10). Bereits im Mai 2021 wurden vier ATS-Anlagen in Betrieb genommen, durchgängig betrieben und in der Vegetationsperiode wöchentlich und ab dem Herbst zweiwöchentlich beprobt und geerntet.



**Abbildung 10:** Auslegung der vier einheitlichen und modifizierten ATS-Systeme. **A)** Schematische Zeichnung der entworfenen und gebauten ATS-Systeme. **B-D)** Aufbau der drei parallel aufgestellten ATS-Anlagen, die **E-G)** mit jeweils Schweine- und Rindergülle bzw. mit Biogaseffluent betrieben wurden. **H)** Bild des Fließweges mit voll etabliertem Algenbiofilm der mit kommunalen Abwasser betriebenen ATS-Anlage. **I)** Nahaufnahme eines Biofilmquerschnitts. Maßstabsbalken 2 cm. **J)** Abbildung der Sensoren für Wassertemperatur und pH-Wert, mit welchen jede Anlage bestückt wurde.

Drei der ATS-Systeme wurden parallel in Lichtenau aufgestellt (siehe Abb. 10 B-G), damit die Anlagen synchron betrieben werden konnten (gleiche Bedingungen, Probenentnahme durch gleiche Personen zu definierten Zeitpunkten), was eine wissenschaftliche Vergleichbarkeit der Produktionseffizienz deutlich erhöhte. Die Anlagen wurden mit drei unterschiedlichen Abwässern betrieben, namentlich Rinder- und Schweinegülle (Cattle, Pig) sowie Schlammüberstand aus einer Biogasanlage (BGE) (Abb. 10 E, F bzw G), welche regelmäßig von den Landwirten zum Standort der Versuchsanlagen geliefert wurden. Ein weiteres ATS-System wurde auf dem Betriebsgelände der Stadtwerke Lichtenau errichtet und vor Ort mit kommunalem/kommunalem Abwasser (tertiäres Abwasser) betrieben (Abb. 10 H).

Die mit kommunalem Abwasser betriebene ATS-Anlage zeigte stets im Verlauf des Jahres 2021 gute Produktivitäten und stabile Arbeitsweise, und wurde daher im Projektverlauf als am



**Abbildung 11:** Umzug und Platzierung der drei ATS-Systeme an der Kläranlage Lichtenau. **A)** Aufbau und **B-D)** Inbetriebnahme ATS-Systeme am Standort der Kläranlage.

vielfersprechendsten eingestuft. Aufgrund der Zwischenevaluierung der Ergebnisse für das Jahr 2021, welche diverse Schwierigkeiten (verstopfte Pumpen, geringe/ausbleibende Ernten) für die mit den landwirtschaftlichen Substraten betriebenen ATS-Anlagen aufzeigte, wurde im Februar 2022 beschlossen zwei der ATS-Systeme (die vorher mit Schweinegülle und BGE betrieben wurden) auf das Betriebsgelände der Kläranlage Lichtenau zu transferieren (Abb. 11). Somit sind drei identische ATS-Anlagen auf dem Betriebsgelände der Kläranlage Lichtenau zur besseren Vergleichbarkeit parallel installiert und mit kommunalen Abwasser betrieben worden.

Zusätzlich konnten mittels dieser Anlagen aussagekräftige Daten zur Modifikation der betrieblichen Parameter (z.B. Supplementierung mit CO<sub>2</sub> sowie die Verringerung der Durchflussraten) erhoben werden. Ein ATS-System wurde bis zum Projektende mit separierten Rindergülle-Abwasser (Reduktion von organischen Schwebstoffen) betrieben, welches ein reibungsloseren Betrieb der Anlage ermöglichen sollte.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der erhobenen Proben, wurden die manuelle Ernte der Algenbiomasse (nach Möglichkeit) durch die jeweiligen Betreiber der Anlagen sowie durch einen Mitarbeiter der Universität Bielefeld immer gleichbleibend durchgeführt. Die so reproduzierbar gewonnenen Proben wurden an der Uni Bielefeld und FZ Jülich auf ihre physikalischen und biochemischen Parameter (Nass- und Trockensubstanz sowie die elementare Zusammensetzung des Biofilms) untersucht. Die Zusammensetzung des Algenkonsortiums sowie deren Änderung wurden mikroskopisch und mittels Amplicon-Sequenzierungsanalysen überwacht.

In Langzeitdüngerversuchen, im Projektverlauf und auch darüber hinaus (manche Experimente dauern noch an), wurde das Potential der Algenbiofilme als Düngemittel für die Kultivierung am Beispiel von handelsüblichem Weizen der Sorte *Triticum aestivum* untersucht. Um die Eignung der ATS-Biomasse (Algenbiofilme) als Wirtschaftsdünger festzustellen und Gefahren für Umwelt und Mensch auszuschließen wurden ausführliche Untersuchungen nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) durchgeführt.

#### Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Zielen:

Der Antrag des Projektes „Biologischer Nährstofftransfer durch Mikroalgen“ wurde unter dem Förderrechtlichen EIP-Ziel „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft“ (EIP-Agrar)

gestellt. Insgesamt adressieren die gewonnenen Ergebnisse die förderpolitischen EIP-Ziele durch Unterstützung der umweltgerechten Entwicklung sowie Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft und Stärkung der Wertschöpfungsketten. Durch den Anbau von Algen zum Zweck des Nährstofftransfers und deren Verwendung als Düngemittel im landwirtschaftlichen Pflanzenbau, können kostengünstige biologische Alternativdüngemittel regional erzeugt und verwendet werden. Die für die Düngemittel produzierten Algenbiofilme sind zudem nicht durch unerwünschte Stoffe wie Giftstoffe und Schwermetalle belastet.

Das Projektergebnis zeigt, dass während der Projektlaufzeit Konzepte zur Weiterentwicklung einer wettbewerbsfähigen Landwirtschaft (in NRW) entwickelt wurden. Das Projektergebnis zeigt weiterhin, dass die Innovationen auch auf andere Betriebe, vor allem Klärwerke übertragbar sind.

#### Nebenergebnisse:

Es hat sich im Verlauf des Projektes klar herausgestellt, dass sich Algenbiofilm-Systeme sehr effizient mit kommunalen Abwasser gezeigt hatten und tragen ein enormes Potential zur Bioremediation des Abwassers bei. Die Nährstoffe (N, P, K) sind im Abwasser von Kläranlagen oft so gering konzentriert, dass diese mittels herkömmlicher Verfahren nicht effektiv abgefangen werden können. Diese Stoffe verlassen ungenutzt und unwiderruflich den menschengemachten Kreislauf und gelangen in natürliche Gewässer, wo sie u.a. zum unerwünschten Algenwachstum beitragen. Ergebnisse dieser Studie zeigen somit auch das ökologische und ökonomische Potential von ATS-Systemen in der Nährstoffrückgewinnung und Abwasserklärung.

Zusätzlich wurde innerhalb dieses Projektes große Datensets bezüglich der mikrobiellen Gemeinschaft der Algenbiofilme erhoben, die potentiell zum Verständnis der komplexen Zusammenarbeit des Mikrobiome beitragen, näher untersucht und werden in Fachzeitschriften publiziert.

#### Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben:

Die ersten Entwürfe der Mikroalgen-Kultivierungsanlagen aus dem Jahr 2020 (siehe auch Fotos in der Beschreibung des Projektverlaufs) waren nicht produktiv und sehr arbeitsintensiv. Daher wurden diese Art der Kultiviersysteme nicht mehr weiterverfolgt und es erfolgte eine Umstellung auf ATS-Systeme nach dem FZ Jülich-Design.

## V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Die erlangten Erkenntnisse haben eindeutig positive Bilanz der kommunalen Abwasser erzeugten Algenbiofilme gezeigt, sowohl während der Kultivierung auf den ATS-Systemen (zuverlässige und hohe Ernten) als auch in der Verwendung als Dünger (hoher anorganischen Biomasseanteil und optimales N:P-Verhältnis). Die mit den landwirtschaftlichen Abwässern (Rindergülle, Schweinegülle sowie Biogaseffluent) betriebenen ATS-Systeme hatten insgesamt große prozesstechnische Probleme bereitet (wie z.B. verstopfte Pumpen, niedrige Ernten) und wiesen einen sehr hohen organischen Anteil auf, was wahrscheinlich auf den hohen Schwebstoffanteil in diesen Abwässern zurückzuführen ist.

Auf Grund der positiven Ergebnisse mit dem kommunalen Abwasser können wir schlussfolgern, dass die im Rahmen dieses Projektes entwickelten ATS-Systeme sich am besten für Abwasser mit geringeren Nährstoffkonzentrationen eignen.

## VI. Verwertung und Nutzung der Ergebnisse

Algenbiofilme, die pflanzenverfügbare Nährstoffe enthalten, können sowohl regional als auch global für die Erzeugung pflanzlicher Produkte eingesetzt werden. Der biologische Transfer von Stickstoff, Kalium und insbesondere Phosphor aus dem Nährstoffwasser in die angebaute Algenbiofilm-Dünger sind von hoher Bedeutung für eine nachhaltige Sicherung der ökologischen landwirtschaftlichen Produktion pflanzlicher Produkte.

Die mit Nährstoffen angereicherten Algenbiofilme stehen als Gründüngung zur Versorgung der Ackerbaupflanzen auf biologischer Basis mit gleichzeitiger Humusverbesserung durch die sich im Zielboden zersetzende Algenbiomasse zur Verfügung. Nach der Projektlaufzeit werden die Ergebnisse weiterhin mit interessierten Gruppen geteilt.

Zudem sind noch weitere Verwertung der im Projektverlauf erzielten Ergebnisse geplant:

1. Wirtschaftliche Nutzung des ATS-Systems im Containerformat zur modularen Abwasserreinigung und Düngerproduktion
2. Nutzung des ATS-Systems für die Abwasserreinigung der 4. Klärstufe in Anlagen von Typ I & II, siehe FZJ-Kläranlage. (Publikation in Vorbereitung)
3. Hochwertige und neue wissenschaftlich Erkenntnisse bezüglich der ATS-Betriebsweise und dem Quorum-Sensing in mesokosmischen Gemeinschaften



## VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Wirtschaftlich ist es notwendig und vor allem zielführend die hier entwickelten Verfahren insbesondere in den weiteren Verfahrensschritten (z.B. eine Automatisierung des ATS-Erntesystems) zu optimieren. Neben Grundlagenforschung zur Erklärung der Prozessabläufe sowie des Zusammenspiels der mikrobiellen Gemeinschaft können auch produktionstechnische Fragen zur Ertragssicherung und Qualitätssicherung unter wissenschaftlichen Bedingungen genauer untersucht werden, um den Landwirten mehr Sicherheit in der Produktion und Nutzung der Algenbiofilme zu geben. Mit den erzeugten Algenbiofilm-Düngern können sowohl regionale als auch globale Märkte für landwirtschaftliche Produktionsmittel beliefert werden.

Ferner sollen aus dem Projekt hinaus Erfahrungen, Ergebnisse und Praxisempfehlungen für Interessierte publiziert und gepflegt werden.

## VIII. Kommunikations- und Disseminationskonzept

Projektbegleitend wurden die Inhalte über diverse Kanäle gestreut und mit den lokalen und regionalen Medien kommuniziert.

Zudem wurde ein Presse-Termin am 23.06.2022 mit WDR-Fernsehen und Radio organisiert:

<https://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/forschung-algen-acker-duenger-100.html>

Parallel dazu wurde mehrere Internetseiten mit Basisinformationen zum Projekt geschaltet:

[https://blogs.unibielefeld.de/blog/pressemitteilungen/entry/wie\\_algen\\_aus\\_abw%C3%A4ssern\\_zu](https://blogs.unibielefeld.de/blog/pressemitteilungen/entry/wie_algen_aus_abw%C3%A4ssern_zu)

<https://aktuell.uni-bielefeld.de/2022/06/24/wie-algen-aus-abwaessern-zu-duenger-werden/>

<https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/teurer-duenger-algen-abwasser-alternative-595798>

[https://www.nw.de/lokal/kreis\\_paderborn/lichtenau/23296239\\_Wie-in-Lichtenau-Abwasser-Algen-zu-Duenger-werden-koennen.html](https://www.nw.de/lokal/kreis_paderborn/lichtenau/23296239_Wie-in-Lichtenau-Abwasser-Algen-zu-Duenger-werden-koennen.html)

<https://www.industr.com/de/wie-kleine-algen-zu-duenger-werden-2656460>

<https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/naehrstoffrecycling-durch-mikroalgen>

<https://fs-journal.de/forschung-und-entwicklung/forschung-algenduenger-aus-abwaessern/>

Das Projektthema und die erzielten Ergebnisse waren Gegenstand in mehreren Artikeln und Berichten aus der regulären Presse wie zum Beispiel Deutschen National Geographics, Süddeutsche Zeitung, Die Zeit und viele weitere Medien (bundesweit über 300)

Nährstoffrückgewinnung aus Algen „Abwasser-Potenziale: Wenn Toilettenwasser zu Bier wird“ dpa-Meldung vom 18.11. anlässlich des „Welt-Toilettentags“ am 19.11.:

<https://www.sueddeutsche.de/wissen/wasser-abwasser-potenziale-wenn-toilettenwasser-zu-bier-wird-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-221118-99-566236>

<https://www.zeit.de/news/2022-11/18/abwasser-potenziale-wenn-toilettenwasser-zu-bier-wird>

[https://public-api.pressrelations.de/dereferer/dereferer?token=eyJhbGciOiJIUzUxMiJ9.eyJwYXlsb2Fkljpw7m5ld3NfaWQlOjMyOTM4MDA0MjcsIm5ld3NyYWRhcl9pZC16MjUzMDYsInBkZl9ib25maWdfaWQlOjEzODksImZvcmlhdfF9vdmVycmlkZSI6bnVsbCwicm91dGVfb3ZlcnJpZGU0Om51bGx9fQ.c5TwtBb\\_CXUeL\\_euUAYQFmKdUib3M9OQOEX6jx489GdAnpH767QWvdoVbCj\\_W5S1WUhbUNwt6jOrLcEaV6pg1A&locale=de](https://public-api.pressrelations.de/dereferer/dereferer?token=eyJhbGciOiJIUzUxMiJ9.eyJwYXlsb2Fkljpw7m5ld3NfaWQlOjMyOTM4MDA0MjcsIm5ld3NyYWRhcl9pZC16MjUzMDYsInBkZl9ib25maWdfaWQlOjEzODksImZvcmlhdfF9vdmVycmlkZSI6bnVsbCwicm91dGVfb3ZlcnJpZGU0Om51bGx9fQ.c5TwtBb_CXUeL_euUAYQFmKdUib3M9OQOEX6jx489GdAnpH767QWvdoVbCj_W5S1WUhbUNwt6jOrLcEaV6pg1A&locale=de)

Zur allgemeinen Öffentlichkeitsarbeit, Ausstellungen und Messeauftritten wurden Poster konzipiert, welche mit fortschreitendem Erkenntniszuwachs stets aktualisiert wurden.

Poster zum 13. Bundesalgenstammtisch, Frankfurt 4.-5.10.2022, SYSTEMATIC CASE-STUDY: NUTRIENT CYCLING FROM WASTEWATER TO CROP VIA THE ALGAL TURF SCRUBBER (ATS)

**Biologischer Nährstofftransfer durch Mikroalgen**  
 O. Biffler-Klassen<sup>1</sup>, D. L. Reinecke<sup>1</sup>, V. Klassen<sup>1</sup>, L. S. Bischoff<sup>1</sup>, H. Suchanek<sup>1</sup>, T. Roeren-Wiemers<sup>1</sup>, O. Kruse<sup>1</sup>

**ATS-Systeme**  
 Die ATS-Systeme (ATS 1-3) wurden auf einem landwirtschaftlichen Gelände in der Nähe von Bielefeld installiert, in dem verschiedene Abwässer und Kultivierungstrategien im Hinblick auf optimales Mikroalgenwachstum getestet werden. Das technische und biologische Know-how des IZ Jülich und der Uni Bielefeld (CeBiTec) wird genutzt, um ein effizientes Verfahren zur Algenzucht im Freiland zu etablieren. Dabei werden die Auswirkungen der Substrathierarchien und saisonalen Veränderungen auf die Algenbiomasseproduktivität und mikrobiologische Zusammensetzung untersucht. Das Projekt zielt darauf ab, die Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Innovationsfelder aus den Forschungsergebnissen zu verbessern.

**Wirtschaftliche Gemeinschaft der ATS-Systeme**  
 Die mikrobielle Gemeinschaft zeigt eine Abhängigkeit zum jeweiligen Substrat. Der höchste Gehalt an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurde in ATS1 beobachtet. Die höchste Diversität an Mikroorganismen (Algen und Bakterien) wurde auch in diesem ATS-System festgestellt.

**Wirkung von ATS Düngemitteln**  
 Ein als Düngemittel aus ATS1 gewinnenes Substrat (ATS1-Substrat) wurde mit einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> (80 m<sup>2</sup>) einer 100-Kopfhühner-Farm (reines, kontrolliertes) Feld der Kulturperiode, einer 1000-L-Mediane und einer Substratdüngung mit einem Nährstoffgehalt von 10 L/m<sup>2</sup> verabreicht. Die Kulturperiode erfolgte auf einer Geländefläche (100 m<sup>2</sup>). Nachweise von 0,3 bis 0,5 mg/kg an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurden an der Ernte beobachtet. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat.

**Biomasseproduktivität der ATS-Systeme**  
 Die ATS-Systeme (ATS 1-3) wurden auf einem landwirtschaftlichen Gelände in der Nähe von Bielefeld installiert, in dem verschiedene Abwässer und Kultivierungstrategien im Hinblick auf optimales Mikroalgenwachstum getestet werden. Das technische und biologische Know-how des IZ Jülich und der Uni Bielefeld (CeBiTec) wird genutzt, um ein effizientes Verfahren zur Algenzucht im Freiland zu etablieren. Dabei werden die Auswirkungen der Substrathierarchien und saisonalen Veränderungen auf die Algenbiomasseproduktivität und mikrobiologische Zusammensetzung untersucht. Das Projekt zielt darauf ab, die Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Innovationsfelder aus den Forschungsergebnissen zu verbessern.

**Effizienz der ATS-basierten Düngemittel**  
 Die ATS-Systeme wurden auf einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> (80 m<sup>2</sup>) einer 100-Kopfhühner-Farm (reines, kontrolliertes) Feld der Kulturperiode, einer 1000-L-Mediane und einer Substratdüngung mit einem Nährstoffgehalt von 10 L/m<sup>2</sup> verabreicht. Die Kulturperiode erfolgte auf einer Geländefläche (100 m<sup>2</sup>). Nachweise von 0,3 bis 0,5 mg/kg an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurden an der Ernte beobachtet. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat.

**Wasserrückgewinnung mit Einzelalgen (SCA) Systemen**  
 Die ATS-Systeme wurden auf einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> (80 m<sup>2</sup>) einer 100-Kopfhühner-Farm (reines, kontrolliertes) Feld der Kulturperiode, einer 1000-L-Mediane und einer Substratdüngung mit einem Nährstoffgehalt von 10 L/m<sup>2</sup> verabreicht. Die Kulturperiode erfolgte auf einer Geländefläche (100 m<sup>2</sup>). Nachweise von 0,3 bis 0,5 mg/kg an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurden an der Ernte beobachtet. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat.

**Research Area 2**  
**Wastewater clearance by microalgae: biomass generation and recycling of N and P**

**Viktor Klassen<sup>1</sup>, Olga Biffler-Klassen<sup>1</sup>, Ana Paula Aguiar Cassuraga<sup>1</sup>, Diana Reinecke-Levi<sup>1</sup> and Olaf Kruse<sup>1</sup>**

**Background, motivation and aims of the study**  
 Over more algae-based remediation technologies are moving into the focus of public attention. They hold a high potential in nutrient recovery especially phosphorus and nitrogen - and biomass production. In 2024, the EU declared phosphorus (P) as an essential resource with significant risk to supply. For resource application and closed remediation practices create a closed loop of phosphorus into the environment. Together with other nutrients, this leads to increasing eutrophication of natural water bodies, deterioration of soils, greenhouse gas emissions, and public health risks. Addressing these problems, nutrient recovery by algae and their subsequent recycling as crop fertilizer were investigated. First, we installed and monitored algal scrubber systems, such as the Algal Turf Scrubber (ATS), which can be efficient and cost effective, due to the higher biomass density and water harvest. Single cell microalgae systems, due to their greater surface area to volume ratio, may be more suitable for more polluted wastewaters, where they could achieve better nutrient uptake performance.

**Results**  
**ATS-SYSTEM-BASED BIOLOGICAL NUTRIENT TRANSFER THROUGH MICROALGAE**  
 The ATS-Systeme (ATS 1-3) wurden auf einem landwirtschaftlichen Gelände in der Nähe von Bielefeld installiert, in dem verschiedene Abwässer und Kultivierungstrategien im Hinblick auf optimales Mikroalgenwachstum getestet werden. Das technische und biologische Know-how des IZ Jülich und der Uni Bielefeld (CeBiTec) wird genutzt, um ein effizientes Verfahren zur Algenzucht im Freiland zu etablieren. Dabei werden die Auswirkungen der Substrathierarchien und saisonalen Veränderungen auf die Algenbiomasseproduktivität und mikrobiologische Zusammensetzung untersucht. Das Projekt zielt darauf ab, die Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Innovationsfelder aus den Forschungsergebnissen zu verbessern.

**BIOMASS PRODUCTIVITY OF THE ATS-SYSTEMS**  
 Die ATS-Systeme (ATS 1-3) wurden auf einem landwirtschaftlichen Gelände in der Nähe von Bielefeld installiert, in dem verschiedene Abwässer und Kultivierungstrategien im Hinblick auf optimales Mikroalgenwachstum getestet werden. Das technische und biologische Know-how des IZ Jülich und der Uni Bielefeld (CeBiTec) wird genutzt, um ein effizientes Verfahren zur Algenzucht im Freiland zu etablieren. Dabei werden die Auswirkungen der Substrathierarchien und saisonalen Veränderungen auf die Algenbiomasseproduktivität und mikrobiologische Zusammensetzung untersucht. Das Projekt zielt darauf ab, die Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Innovationsfelder aus den Forschungsergebnissen zu verbessern.

**EFFICIENCY OF THE ATS-BASED FERTILISERS**  
 Ein als Düngemittel aus ATS1 gewinnenes Substrat (ATS1-Substrat) wurde mit einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> (80 m<sup>2</sup>) einer 100-Kopfhühner-Farm (reines, kontrolliertes) Feld der Kulturperiode, einer 1000-L-Mediane und einer Substratdüngung mit einem Nährstoffgehalt von 10 L/m<sup>2</sup> verabreicht. Die Kulturperiode erfolgte auf einer Geländefläche (100 m<sup>2</sup>). Nachweise von 0,3 bis 0,5 mg/kg an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurden an der Ernte beobachtet. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat.

**WASTEWATER REMEDIATION WITH SINGLE-CELL ALGAE (SCA) SYSTEMS**  
 Die ATS-Systeme wurden auf einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> (80 m<sup>2</sup>) einer 100-Kopfhühner-Farm (reines, kontrolliertes) Feld der Kulturperiode, einer 1000-L-Mediane und einer Substratdüngung mit einem Nährstoffgehalt von 10 L/m<sup>2</sup> verabreicht. Die Kulturperiode erfolgte auf einer Geländefläche (100 m<sup>2</sup>). Nachweise von 0,3 bis 0,5 mg/kg an Nitrogen, Phosphor und Kalium wurden an der Ernte beobachtet. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat. Die Ernteerträge waren höher als bei ATS1-Substrat.

**Outlook**  
 Optimizing the operation of the ATS- and SCA-systems could significantly increase wastewater remediation and algal biomass productivity. The investigation of the microbiological composition revealed a high substrate dependence and will be further investigated at the CeBiTec. The current biomass area-productivities are comparable to specialized algal cultivation plants.

**References**  
 Reinecke D., Bischoff L. S., Klassen V., Biffler-Klassen O., Grimm F., Kruse O., Kruse O., Kruse O. Nutrient recovery from wastewater by algal biofilm for fertilizer production Part I: Case study on the techno-economic aspects at pilot scale. Separation and Purification Technology 2022, 205: 122475.

**Funding**  
 The authors thank the funding organizations for their support: the German Research Foundation (DFG), the Ministry for Agriculture and Rural Development of the State of North Rhine-Westphalia (MFL), and the DAAD.

### Publikationen in Fachzeitschriften

Separation and Purification Technology, Nutrient recovery from wastewaters by algal biofilm for fertilizer production Part 1: Case study on the techno-economical aspects at pilot-scale  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122471>

### Publikationen in Vorbereitung

Pub. 2 (FZJ & BIE) Techno-economic report-Pub. complete overview 2021

Pub. 3 (BIE & FZJ) Population assembly of ATS Systems operated with cattle and swine manure, biogas effluent as well as municipal wastewaters

Pub. 4 (FZJ & BIE & Bruno): Confocal Microscopy & FISH-CARD & mol-gen. analysis of algal-biofilms

Pub. 5 (FZJ & BIE) Techno-economic report-Pub. complete overview 2022

Pub. 6 (FZJ & BIE): Fertiliser Experiments & Soil-conditioner & Nutrient cycles & Mass-balances with algal-biofilms

Pub. 7 (BIE & FZJ) Microorganisms population assembly of ATS systems operated with municipal wastewaters: A comparison of different water loading rates and seasons.

### Grundsätzliche Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes wurden alle geforderten Experimente durchgeführt und alle Substrate (im Rahmen der substrat-spezifischen Anwendungsmöglichkeiten auf dem ATS) getestet sowie begleitende Experimente ausgeführt. Die Auswertung der Daten und die daraus resultierenden Ergebnisse erlauben daher folgenden Rückschlüsse:

- Robustes, kosteneffizientes und modulares ATS-System zur Abwassernutzung
- Regelmäßige und hohe Biomasseproduktivität von durchschnittlich  $\sim 11 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$
- Ganzjähriger Betrieb von ATS-Systemen (mit kommunalen Abwasser) möglich
- Automatisierung der Ernten wird empfohlen
- Sehr zuverlässige Rückgewinnung von Stickstoff (N) und Phosphat (P) aus kommunalen Abwässern mittels Algenbiofilmen sehr zuverlässig

- Hohe Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft (mit hohem Anteil an filamentösen Mikroalgen) und damit stabile Performanz nur mit Abwasser mit geringer Nährstoffkonzentration möglich (z.B. Klärwasser)
- Landwirtschaftliche Abwässer mit hohem Feststoffanteil sind eher ungeeignet und benötigen eventuell ein anderes Algenzucht-System
- Rezyklierung von N und P mittels Algenbiofilmen in Form von organischen Langzeitdüngern möglich
- Algenbiofilme aus kommunalen und landwirtschaftlichen Abwasser erzielten vergleichbare Düngewirkung in Weizen wie Mineraldünger

### Literaturverzeichnis

1. Hejna, M., Kapuścińska, D. & Aksmann, A. Pharmaceuticals in the Aquatic Environment: A Review on Eco-Toxicology and the Remediation Potential of Algae. *International journal of environmental research and public health* **19**; 10.3390/ijerph19137717 (2022).
2. Diana Reinecke, Lena-Sophie Bischoff, Viktor Klassen, Olga Blifernez-Klassen, Philipp Grimm, Olaf Kruse, Holger Klose, Ulrich Schurr. Nutrient recovery from wastewaters by algal biofilm for fertilizer production Part 1: Case study on the techno-economical aspects at pilot-scale. *Separation and Purification Technology* (2022).
3. Christian Hohnholz. *PROJEKT-ABSCHLUSSBERICHT Spirulina* ,
4. Gross, M. & Wen, Z. Yearlong evaluation of performance and durability of a pilot-scale Revolving Algal Biofilm (RAB) cultivation system. *Bioresource technology* **171**, 50–58; 10.1016/j.biortech.2014.08.052 (2014).
5. Gan, X., Klose, H. & Reinecke, D. Optimizing nutrient removal and biomass production of the Algal Turf Scrubber (ATS) under variable cultivation conditions by using Response Surface Methodology. *Frontiers in bioengineering and biotechnology* **10**, 962719; 10.3389/fbioe.2022.962719 (2022).
6. Wicker, R. J., Kwon, E., Khan, E., Kumar, V. & Bhatnagar, A. The potential of mixed species biofilms to address remaining challenges for economically-feasible microalgal biorefineries: A review. *Chemical Engineering Journal* **451**, 138481; 10.1016/j.cej.2022.138481 (2023).