



Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Studiengang Lebensmittel- und Bioprodukttechnologie

SS 2024 und WS 2024/25

# **Planung, Bau und verfahrenstechnische Charakterisierung eines mobilen Röhren- Photobioreaktors im Technikumsmaßstab**

**Masterthesis**

Verfasser: Jonas Hirsemann

Betreuer: Prof. Dr. Michael Sandmann

Prof. Dr. Heralt Schöne

URN: nbn : de : gbv : 519-thesis: 2024-0053-1

Neubrandenburg, der 10.11.2024

## **Abstract**

This work was aimed at providing a mobile tubular PBR on a pilot plant scale. The exact procedure during construction was described and evaluated in terms of its success. In addition, components were analyzed regarding to their quality and handling instructions were provided. It was shown that the complete system fulfills all the requirements for successful microalgal cultivation. The measuring probe system proved to be extremely suitable. Injection valves and electrode holders can be fitted as required either on the access manifold or on the tank wall to enable comprehensive process control and an appropriate gas supply.

For a better understanding of the internal mechanisms and to prepare future cultivation runs, a process engineering characterization of the plant was carried out. Technical data such as the floor area, reactor volume and A/V-ratio [ $38\text{ m}^{-1}$ ], mixing time, Reynolds number and the volumetric mass transfer coefficient ( $kLa$ ) [ $6,04 - 9,64\text{ h}^{-1}$ ] were investigated. During the technical analysis, the system turned out to be very base area-efficient and a further increase is possible. The mixing time was measured optically. This required extensive image processing using Photoshop to evaluate the highly irregular shape of the reactor. A major advantage of the optical method was that the flow velocity and thus the Reynolds number could also be determined from the mixing time video material. Mixing times of 227s to 137s were determined. Furthermore, the liquid velocity and the gassing rate were confirmed to have beneficial effects on mixing.

## **Inhalt**

1 Einleitung	4
2 Stand der Wissenschaft und Technik	6
3 Materialien und Methodik	28
3.1 Planung und Beschaffung	28
3.1.1 Anforderungsprofil	28
3.1.2 Marktrecherche und Bauteilauswahl	29
3.2 Bau des Reaktors	37
3.2.1 Konstruktionsverlauf	37
3.2.2 Fehlerbetrachtung und Anregungen	43
3.2.3 Handhabungshinweise	47
3.3 Verfahrenstechnische Charakterisierung	50
3.3.1 Technische Daten des Reaktor-Systems	50
3.3.2 Bestimmung der Mischzeit sowie Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl	53
3.3.3 Bestimmung des kLa	60
4 Ergebnisse der verfahrenstechnischen Charakterisierung	63
4.1 Mischzeit, Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl	63
4.2 kLa	69
5 Interpretation	72
5.1 Einordnung des konstruierten PBR-Systems	72
5.2 Interpretation der Versuchsergebnisse	74
6 Zusammenfassung	80
Literaturverzeichnis	82
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	87

## Verzeichnis verwendeter Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

ppm	parts per million
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
FAO	Food and Agriculture Organisation
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
IEA	International Energy Agency
CCS	Carbon Capture and Storage
GRAS	Generally Recognized as Safe
n-3 LC-PUFA	n-3 langkettige mehrfach ungesättigte Fettsäuren
EPA und DHA	Eicosapentaensäure und Docosahexaensäure
PBR	Photobioreaktor
A/V-Verhältnis	Oberflächen-Volumen-Verhältnis [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
kLa	volumetrische Stoffübergangskoeffizient [1/h]
DO	gelöster Sauerstoff [%]
ArtNr	Artikelnummer
1/2"	1/2 – Zoll (Anschlussmaß aus der Gewindetechnik)
Bsp.: I, 100 (1)	I: Pumpgeschwindigkeit; 100: Begasungsrate; (1): Triplikatsnummer
vvm	Volumen Luft das pro Minute durch Volumen Reaktor strömt

## 1 Einleitung

Die globale Nutzung von endlichen Ressourcen sowie der Einfluss des Menschen auf den Klimawandel sind zwei zentrale Fragen der heutigen Forschungslage. Die Ansätze, die es dabei zu untersuchen gilt, sind vielfältig und es hat sich gezeigt, dass eine bioökonomische Denkweise sowie die lokale Kombination verschiedener einander unterstützender Technologien zielführend sind. In diese Kerbe schlägt die Nutzung von Mikroalgen, da sie durch ihre beträchtlichen Wachstumsraten, umfanglichen sowie lukrativen Einsatzmöglichkeiten und nachhaltigem Potential einen erheblichen Mehrwert darstellen. Konkret handelt es sich bei der Mikroalge, um eine der effizientesten Nutzkulturen, die es gibt. Ihre Produktivität pro Flächeneinheit übersteigt die herkömmlicher landwirtschaftlicher Pflanzen bei weitem und sie können zudem auf unbrauchbarem Land wie Salzwasserflächen oder in städtischen Gebieten angebaut werden. Diese Variabilität äußert sich auch in der extrem flexiblen Konstruktionsfreiheit von Bioreaktor-Lösungen, sodass eine Inkompatibilität mit konkurrierenden landwirtschaftlichen, aber auch mit urbanen Teilnehmern gering gehalten werden kann. Nicht nur deshalb ist die Mikroalge nun seit einigen Jahrzehnten fester Bestandteil der Wissenschaft. Angesichts des hohen bioökonomischen Potentials nahmen die Bestrebungen sie industriell anzuwenden in den letzten Jahren stark zu.

Der weltweite Markt für Mikroalgenbiomasse beläuft sich auf etwa 20.000 Tonnen pro Jahr, während das Absatzvolumen der Hauptanbaukulturen, wie Getreide-, Öl- oder Gemüsepflanzen, zum Vergleich auf rund 9 Milliarden Tonnen pro Jahr geschätzt wird (Torzillo & Chini Zittelli, 2015; FAO, 2023). Mikroalgen befinden sich also erst zu 0,0002 % in diesem Handelssektor. Um Produkte aus Mikroalgen auf den Märkten präsenter zu machen, ist es zunächst eine wichtige Herausforderung günstige Herstellungsprozesse zu garantieren, denn noch stechen die gängigen Alternativen zumeist mit ihrer unaufgetasteten Wirtschaftlichkeit heraus. Diese resultiert aus den oft kostengünstigen Rohstoffen und Fertigungstechniken, an welchen sich neue Erzeugnisse messen lassen müssen. Für diesen Zweck gibt es eine umfassende Beforschung für Belange der biotechnologischen Kultivierungstechnik, die die Herstellung in Effizienz und Komfortabilität zu optimieren versucht.

Dabei gewannen vier Bauarten immer mehr an Bedeutung. Open Ponds stellen ein offenes System zur Verfügung, dass sich durch die einfache Integration in die Natur sowie durch geringe Betriebskosten auszeichnet. Allerdings sind die Produkte von geringerer Qualität, eine hohe Grundfläche wird benötigt und es existiert Konkurrenz zu landwirtschaftlichen

Alternativen. Dieses System stellt eher eine Option für flächenreiche Gebiete oder für den kleineren Gebrauch dar. Um zu untersuchen, wie das Biomassewachstum optimiert werden kann, bieten sich geschlossene Ausführungen an, die unerwünschte Umwelteinflüsse unterbinden. Diese werden Photobioreaktoren (PBRs) genannt und unterteilen sich in drei weitere maßgebliche Designmöglichkeiten. Bei dem Blasensäulenreaktor handelt es sich um eine vertikale Säule, in der ein Gas in eine Flüssigkeit eingeleitet wird, wodurch Blasen entstehen. Diese Blasen steigen durch die Flüssigkeit auf und sorgen für eine intensive Durchmischung und einen Gasaustausch. Das enthaltene Kulturmedium versorgt die Mikroalgen mit Nährstoffen, wodurch die Biomasse wächst. Ähnlich verhält es sich mit dem Flachplatten-PBR, der statt der zylindrischen eine plattenartige Bauform nutzt. Auch hier werden Gasblasen von unten eingeleitet und das System überzeugt durch eine hohe Verfügbarkeit von Außenfläche pro enthaltenem Reaktorvolumen. Durch die so optimierte Lichtverfügbarkeit kann die Photosynthese-Leistung und damit postwendend die Wachstumsrate erhöht werden. Ein Nachteil dieser Anlage sind die geringen Durchmischungsmöglichkeiten, welche sich auf die Begasung mit Luft begrenzt. Schließlich stellt der Röhren-PBR den vierten maßgeblichen Reaktor dar, der Forschungsrelevanz besitzt. Er verfügt, wie der Flachplatten-PBR, über ein hohes Maß an Außenfläche und negiert zudem die Durchmischungsschwächen des Vorgängers, da das Medium hier im Kreislauf gefördert wird. Dieses Verfahren bietet weiterhin in der Prozesskontrolle sowie der Handhabung mehrere Vorteile, sodass rein technisch eine hohe Attraktivität besteht. Industriell interessant ist der Röhren-PBR aufgrund des erheblichen Materialbedarfs und hohen Betriebskosten, durch z.B. Pumpleistung, allerdings weniger. Um hier einen Fortschritt herbeizuführen, müssen entweder die Betriebskosten reduziert, der Bauteilbedarf oder die Bauteilkosten verringert oder die Produktivität so signifikant erhöht werden, dass die Mehreinnahmen die Kosten kompensieren. Es haben sich viele globale Standorte herausgebildet, die durch ihren Beitrag einen kleinen Teil zu dem wissenschaftlichen Arbeitsfeld des Röhren-PBRs leisten.

Diese Arbeit gründet auf dem Interesse am Standort Neubrandenburg ebenfalls Projekte zu diesem Gebiet durchzuführen. Aus diesem Anlass wurde diese Masterthesis erstellt, deren Inhalt der Bau einer mobilen Röhren-PBR-Anlage im Technikumsmaßstab war. Das konstruierte System wurde anschließend verfahrenstechnisch charakterisiert (A/V-Verhältnis, Mischzeit, Strömungsregime, kLa) und steht der Hochschule Neubrandenburg in Person von Herrn Prof. Dr. Sandmann nun für die Lehre bzw. Forschung sowie für weitere optimierende Maßnahmen zur Verfügung.

## **2 Stand der Wissenschaft und Technik**

Seit Anbeginn der Zeit ist das Erdklima Umbrüchen unterworfen. Die langfristigen Veränderungen in diesen klimatischen Bedingungen, die sich über Jahrzehnte bis Jahrhunderte erstrecken, werden als Klimawandel bezeichnet. Er umfasst sowohl natürliche als auch menschliche Einflüsse und manifestiert sich durch verschiedene Ereignisse wie der Erwärmung der Erde, Veränderungen der Niederschlagsmuster, dem Anstieg des Meeresspiegels durch Schmelzen von Polareis oder der Versauerung der Ozeane. Der Klimawandel ist mehr als nur eine ökologische Herausforderung – er ist ein Phänomen, das tief in der Geschichte unseres Planeten und der Menschheit verwurzelt ist. Über Millionen von Jahren hinweg haben sich das Klima und die Lebensbedingungen auf der Erde ständig verändert. Diese Veränderungen wurden von natürlichen Prozessen wie Schwankungen in der Erdumlaufbahn, vulkanischen Eruptionen oder periodischen Veränderungen in der Sonnenaktivität angetrieben. Solche natürlichen Zyklen führten zu Eiszeiten und wärmeren Perioden. Im Laufe der Erdgeschichte haben sich Zeiten der Erwärmung und Abkühlung aufgrund natürlicher Prozesse wiederholt. (Rahmstorf, 2018)

Ein eindrucksvolles Beispiel sind vulkanische Eruptionen. Wenn ein Vulkan wie der Mount Tambora 1815 ausbricht, schleudert er riesige Mengen Asche und Schwefeldioxid in die Atmosphäre. Diese Partikel blockieren Sonnenlicht, was zu einer kurzfristigen globalen Abkühlung führen kann – dem sogenannten „vulkanischen Winter“. Das Jahr 1816, das als „Jahr ohne Sommer“ in die Geschichte einging, zeigt, wie stark ein einzelner Vulkanausbruch das Klima beeinflussen kann. Ernteausfälle und Hungersnöte waren die Folge. (Sigl et al., 2015) Ein weiterer natürlicher Einfluss auf das Klima sind Schwankungen in der Sonnenaktivität. Ein Beispiel dafür ist das „Maunder-Minimum“ im 17. Jahrhundert – eine Phase besonders geringer Sonnenaktivität. In dieser Zeit erlebte Europa die „Kleine Eiszeit“, eine Periode ungewöhnlich kalten Wetters, in welcher die Menschen auf ihre Anpassungs- und Überlebenskünste angewiesen waren. (Rahmstorf, 2004). Daneben gibt es beispielsweise noch die Milanković-Zyklen, die durch Veränderungen in der Erdumlaufbahn und der Neigung der Erdachse verursacht werden. Diese Zyklen bestimmen, wie viel Sonnenenergie die Erde erhält und beeinflussen damit langfristig das Klima – etwa indem sie Eiszeiten auslösen oder beenden. (Redfern, 2014)

Diese Phänomene zeigen, dass eine Beeinflussung der Umweltbedingungen auf der Erde durch natürliche Vorgänge möglich bzw. existent ist und, auch in der Vergangenheit, für Lebenseinschränkungen teils heftigen Ausmaßes gesorgt hat. Doch während diese natürlichen

Einflüsse meist Prozesse über Tausende von Jahren darstellen, hat die menschliche Einwirkung das Klima innerhalb weniger Jahrhunderte vergleichsweise dramatisch verändert.

Heute steht man vor der Realität, dass der Mensch seit der Industrialisierung begonnen hat, das Klima in einer beispiellosen Dimension zu beeinflussen. Unsere Aktivitäten beschleunigen die globale Erwärmung auf eine Weise, die drastische Folgen für Mensch und Natur nach sich zieht. Beispielsweise haben sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre seit der vorindustriellen Zeit um 50 % erhöht, und 2023 erreichten sie mit 419,3 ppm ihren höchsten Stand seit mindestens 800.000 Jahren, wie Abbildung 1 verdeutlicht. (NOAA, 2024)

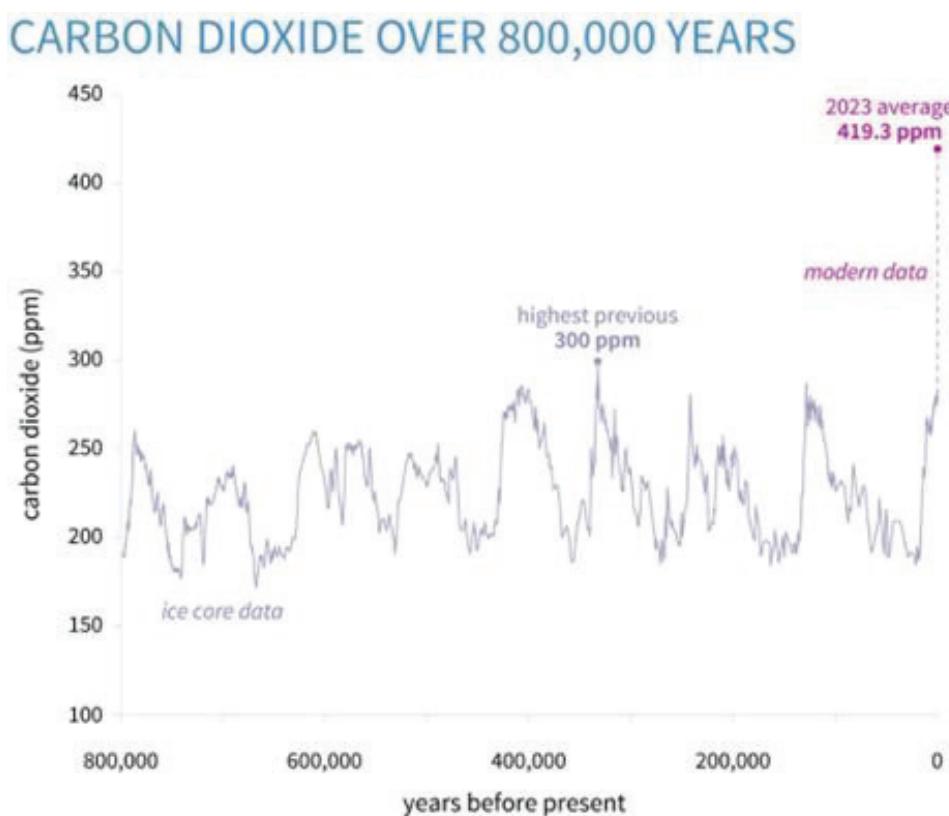


Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Ausstoß der letzten 800.000 Jahren bis heute (NOAA, 2024)

Seit der Industrialisierung hat der Mensch die Erde also auf eine Weise verändert, die die natürlichen Prozesse in den Schatten stellt. Der großflächige Einsatz von fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl und Gas führte zu einem rasanten Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre. Der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch fossile Brennstoffe erreichte 2022 etwa 36,6 Milliarden Tonnen, ein Rekordhoch laut dem Global Carbon Budget – einer Organisation, die mithilfe hochspezialisierter Analysemethoden den globalen Emissionshaushalt quantifiziert. Dieser stetige Anstieg beschleunigt den natürlichen Treibhauseffekt, indem mehr Wärme in der Erdatmosphäre eingefangen und dann wieder an die Erdoberfläche abgegeben wird. Ohne

adäquate Maßnahmen wird sich diese Entwicklung ungehindert fortsetzen und zu weiteren Umweltproblemen führen. (Earth System Science Data, 2023)

Ein ebenfalls bedenklicher Faktor ist die Abholzung von Wäldern. Wälder sind riesige Kohlenstoffspeicher, die durch ihre unzugängliche Art ein Hindernis in Land- und Bauwirtschaft darstellen. Sie entziehen der Atmosphäre CO<sub>2</sub> und binden es in ihren Pflanzen und Böden. Wenn diese Wälder abgeholt werden, gelangt das gespeicherte CO<sub>2</sub> durch Verbrennung, Zersetzung oder Bodenfreisetzung zurück in die Atmosphäre und die Kapazität der Natur, weiteres CO<sub>2</sub> aufzunehmen, wird reduziert. Dieser Effekt ist fatal, da der Erde so die Fähigkeit entzogen wird, Kohlenstoff auf natürliche Weise zu speichern und für bestimmte Zeit zu versiegeln. Im Jahr 2020 belief sich die weltweite Entwaldung auf rund 10 Millionen Hektar, was des Weiteren zu einer jährlichen, atmosphärischen Belastung von etwa 1,1 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> führt. (FAO, 2020)

Auch in Deutschland sind ungewöhnliche Schäden in Wäldern messbar. So berichtet das Thünen-Institut in Ihrer Bundeswaldinventur von 2024, dass zwischen 2017 und 2022 mehr Bäume zerstört worden sind als neue Biomasse hinzukam. Seit 2017 nahm der Kohlenstoffvorrat im Wald demnach durch Stürme, Dürren oder Käferbefall um etwa 41,5 Millionen Tonnen ab. Die Ursachen für diese Beobachtungen sind vielfältig und ein direkter Zusammenhang zum menschengemachten Klimawandel kann nicht wissenschaftlich bestätigt werden, doch lässt sich eine ungewöhnliche Häufigkeit ähnlicher Missstände und Ereignisse in den letzten Jahrzehnten feststellen.

Auch die Landwirtschaft spielt eine zentrale Rolle. Die Viehzucht, insbesondere Rinderhaltung, setzt große Mengen des Treibhausgases Methan frei, dass eine 28-mal potentere Erwärmungswirkung als CO<sub>2</sub> hat. Auch der Anbau von Pflanzen sowie die Nutzung von stickstoffhaltigen Düngemitteln trägt merklich zu einer Emission schädlicher Gase wie Lachgas bei, wodurch laut dem IPCC-Bericht von 2019 insgesamt ein landwirtschaftlicher Anteil an der globalen Treibhausgasemission von 10 – 12 % entsteht. Zudem ist zu erwähnen, dass die Landwirtschaft derzeit etwa 37 % der globalen Landfläche benötigt, was regelmäßig zu Abholzungen, Trockenlegungen und allgemein zum Verlust von Biodiversität führt, was auf die Gesundheit von Ökosystemen stark abträglich wirkt. (IPCC, 2019)

Diese Entwicklungen verdeutlichen die Notwendigkeit, in diesen Bereichen klimafreundlichere Lösungen zu finden, um das Fortschreiten des Klimawandels zu verlangsamen und mögliche Umweltkatastrophen zu vermeiden bzw. abzuschwächen. In diesem Zusammenhang sind auch

die durch die hohe menschliche Population auf der Erde ausgelösten Ressourcenknappheiten zu erwähnen, die eine zusätzliche Herausforderung darstellen und mithilfe der Wissenschaft gelöst werden müssen. Angesichts dieser Bedrohung haben Regierungen und internationale Organisationen begonnen, Maßnahmen zu ergreifen. Eine der bedeutendsten Initiativen ist das Pariser Abkommen von 2015. Hier verpflichteten sich alle teilnehmenden Länder, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen und idealerweise 1,5 °C nicht zu überschreiten. Dieses Ziel erfordert eine drastische Reduzierung der globalen Treibhausgasemissionen: Die IPCC-Berichte zeigen, dass die Emissionen bis 2030 um etwa 45 % gegenüber dem Niveau von 2010 gesenkt werden müssen, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen. Andernfalls könnte die Erwärmung bis Ende des Jahrhunderts auf 3 °C bis 4 °C ansteigen, was zu katastrophalen Auswirkungen führen würde (IPCC, 2018).

Ein entscheidender Teil dieser Maßnahmen ist der Ausbau von erneuerbaren Energien. Wind-, Solar- und Wasserkraft verringern den Bedarf an fossilen Brennstoffen und reduzieren damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen. In Deutschland hat die „Energiewende“ gezeigt, wie ein Land den Einsatz erneuerbarer Energien deutlich steigern kann: Im Jahr 2023 stammten erstmals über 50 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen (BMWK, 2023). In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass 2020 der Anteil aller erneuerbaren Energien am Gesamtstrommix weltweit auf 28,1 % anstieg, was ein positiver Trend ist, jedoch noch beschleunigt werden muss, um die Klimaziele zu erreichen (IEA, 2023).

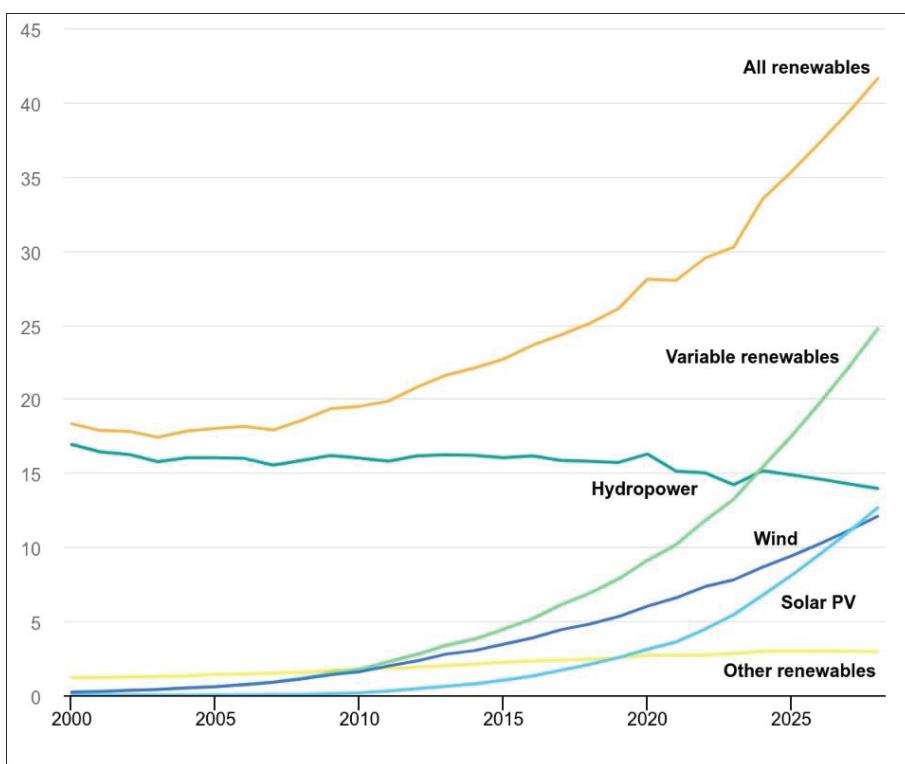


Abbildung 2: Weltweite Anteils-Entwicklungen der Gesamtstrom-Bereitstellung durch erneuerbare Energien (IEA, 2023)

Darüber hinaus erforschen Wissenschaftler Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und - Speicherung (CCS). Hierbei wird CO<sub>2</sub> aus Industrieabgasen abgeschieden und unterirdisch gespeichert, damit es nicht in die Atmosphäre gelangt. Ein Beispiel dafür ist das Projekt „Sleipner“ vor der Küste Norwegens, das seit den 1990er Jahren jährlich Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> speichert. Dennoch reichen die aktuell etwa 26 kommerziellen CCS-Anlagen weltweit, die jährlich 40 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> speichern, bei Weitem nicht aus, denn dies entspricht weniger als 0,1 % der globalen Emissionen. (Global CCS-Institute, 2022) Das Verfahren ist zudem mit hohen Bau-, Überwachungs-, Betriebs- und Wartungskosten verbunden und liefert kein kommerzielles Produkt. Außerdem gibt es ernsthafte Bedenken wegen Leckagen und plötzlicher Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus den Formationen.

Eine weitere interessante Entwicklung sind Projekte wie „Physics for Food“, welche sich unter Anderem zur Aufgabe gemacht haben klimaresistente Nutzpflanzen bereitstellen zu können, welche auf den sich ändernden Bedingungen durch den Klimawandel angepasst sind. Die wissenschaftliche Kooperation arbeitet daran, Sorten zu entwickeln, die besser mit meteorologisch oder parasitär ausgelöstem Stress umgehen können, um die Nahrungsmittelproduktion in Regionen zu sichern, die besonders stark vom Klimawandel betroffen sind.

Angetrieben davon Lösungen für die genannten Problemkomplexe zu erarbeiten, nahm sich die Wissenschaft auch einem uralten Phänomen an, das bereits die ersten Schritte der Erde hin zu einem bewohnbaren Planeten miterlebt und elementar beeinflusst hat – der Mikroalge. Hierbei handelt es sich um einen einfachen, meist einzelligen Organismus, der durch Photosynthese die Ausgangsstoffe Sonnenlicht, Wasser, Nährstoffe und CO<sub>2</sub> in Biomasse und O<sub>2</sub> umwandelt und sich durch Zellteilung fortpflanzt. Ihre erdgeschichtliche Wichtigkeit nimmt Ihren Ursprung vor etwa 2,4 Milliarden Jahren, als sich in den Ozeanen eine hohe Population Cyanobakterien bildete. Diese zu Photosynthese befähigten Bakterien enthalten keinen Zellkern und werden daher nicht direkt den Mikroalgen zugeordnet. Doch durch ihre oxygene Funktionsweise auf Mikroebene lässt sich eine enge Wirkungsverwandtschaft feststellen, weshalb im Verlauf dieser Arbeit beide Arten unter dem Begriff der Mikroalgen zusammengefasst werden. Angeregt durch die hohe Verfügbarkeit an Nährstoffen in den Ozeanen, produzierte diese Population eine große Menge Sauerstoff, der in die Atmosphäre entwich und sich dort über Jahrtausende massiv anreicherte. Dieses Ereignis ist in der Wissenschaft unter der „großen Sauerstoffkatastrophe“ oder dem „great Oxidation Event“ bekannt und sorgte für die Entstehung der UV-schützenden Ozonschicht, ohne welche ein Leben an Land nicht möglich

gewesen wäre. Weitere Bedeutung erlangten Mikroalgen durch ihre wesentliche Beteiligung an der Bildung von fossilen Brennstoffen. Tote Organismen lagerten sich als organischer Rest am Meeresboden ab und wurden fortwährend unter Einwirkungen von hohen Drücken und geologischen Aktivitäten in Erdgas und Erdöl umgewandelt, welche heute als Rohstoff einen Großteil der globalen Energieversorgung ausmachen. Bis heute spielen Mikroalgen zudem eine Schlüsselrolle im Kohlenstoffkreislauf oder der marinen Nahrungskette und können daher, durch ihren universellen Einfluss, als biologisch essenziell bezeichnet werden. (Canfield, 2005)

Um etwaige Nutzungsmöglichkeiten auszuloten, wurden Mikroalgen bereits in den 50er Jahren, aufgrund ihrer hohen Wachstumsraten, einschlägig untersucht. Gegenstand der damaligen Forschung war vor allem der Einsatz als mögliche alternative Proteinquelle. Auch wurde zu dieser Zeit das Potenzial von Mikroalgen zur Kohlenstoffbindung unter anderem durch den Nobelpreisträger Melvin Calvin erkannt. Dies stand allerdings noch nicht im Zentrum der Diskussion. Durch die Ölkrise in den 70ern entstand ein starkes Interesse an neuen Energiequellen und man beschäftigte sich mit der Herstellung von Biokraftstoffen aus Mikroalgen. Schließlich kam in den frühen 90er Jahren die klimapolitische Debatte auf und die Fähigkeit Kohlenstoff zu binden rückte erneut ins engere Blickfeld. (Dau et al., 2019) In diese Zeit kann der Startpunkt der modernen, biotechnologischen Nutzungsbelebung der Mikroalge lokalisiert werden, bei der das multifunktionale Potential mit hohem nachhaltigen Mehrwert im Fokus steht. Man erhofft sich seitdem wirtschaftliche Geschäftsmodelle zu schaffen, bei denen die Biomasseproduktion so erheblich angekurbelt wird, dass genug Kohlenstoff aus dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Biomasse gespeichert und wiederum Sauerstoff in die Atmosphäre abgegeben wird, um einen relevanten dem Klimawandel entgegenwirkenden Effekt auszulösen und dabei gleichzeitig bereits einen Teil des globalen Produktionsbedarfs klimaneutral abzudecken. Zudem wurden im Lauf der Zeit weitere interessante Potentiale observiert, sodass die Forschung derweilen verschiedene Wege geht und es sich viele Nutzungsmöglichkeiten herausgebildet haben, die unterschiedlich wirksam bzw. lukrativ sind. (Spolaore et al., 2006)

Eine Anwendungsoption, die etwas unscheinbar wirkt, hat ihre Ursprünge in den frühen 60er Jahren als Bogan et al. die abwasserklärende Wirkung von Algen untersuchten und einen zuträglichen Effekt bei der Entfernung von Phosphor beobachteten. Organische und anorganische Stoffe, die infolge häuslicher, landwirtschaftlicher und industrieller Wassertätigkeiten in die Umwelt freigesetzt werden, führen zu organischer und anorganischer Verschmutzung. Die üblichen Verfahren der Erst- und Zweitbehandlung dieser Abwässer, um

die leicht absetzbaren Stoffe zu beseitigen und die im Abwasser vorhandenen organischen Stoffe zu oxidieren, hinterlassen ein sekundäres Abwasser, welches immer noch mit anorganischem Stickstoff und Phosphor belastet ist. Diese können eine Eutrophierung, eine unnatürliche Anreicherung von Nährstoffen in ursprünglich nährstoffarmen Gewässern, sowie weitere langfristige Probleme verursachen. (Rosenwinkel et al., 2015) Mikroalgenkulturen stellen einen interessanten Schritt für die Abwasserbehandlung dar, da sie eine tertiäre Biobehandlung in Verbindung mit der Produktion von potenziell wertvoller Biomasse bieten. Sie sind in der Lage anorganischen Stickstoff und Phosphor für ihr Wachstum zu nutzen sowie Schwermetalle und einige toxische organische Verbindungen zu entfernen, sodass es nicht zu einer Sekundärverschmutzung kommt. (Abdel-Raouf, 2012) Dieses Wirkprinzip ist technisch gesehen als relativ uninteressant zu bewerten, da es bereits sehr effiziente Abwasserbehandlungsmethoden gibt, die auch noch nicht an ihr Limit gekommen sind. Trotz der momentan fehlenden Notwendigkeit sollte dieser Effekt, aufgrund des wertsteigernden Potentials durch die Biomassegewinnung, weiterhin eine Möglichkeit darstellen.

Die Produktion von Mikroalgen-Biomasse bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber der konventionellen Biomasseproduktion. Dazu gehören eine höhere Produktivität, die Nutzung ansonsten unpraktikabler Flächen, die Wiederverwendung und Rückgewinnung von Abfallnährstoffen, die Nutzung von salzhaltigem oder brackigem Wasser und die Wiederverwendung von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerksabgasen oder ähnlichen Quellen. Als solche bietet sie Potential zur Vermeidung von Treibhausgasen, indem sie Biokraftstoffe als Ersatz für fossile Brennstoffe liefert. (Brune et al., 2009) Wissenschaftlich besonders populär ist dabei die Verwendung der enthaltenen Lipide zur Herstellung von Biodiesel. Erneuerbare, kohlenstoffneutrale Kraftstoffe sind für die ökologische und wirtschaftliche Entwicklung der Energiebranche notwendig. Biodiesel, der aus Ölpflanzen gewonnen wird, ist eine potenzielle erneuerbare und kohlenstoffneutrale Alternative zu Erdölkraftstoffen. Doch die bisherigen Quellen decken realistischerweise nicht einmal einen kleinen Teil des bestehenden Kraftstoffbedarfs, sodass Mikroalgen die einzige nachhaltige Quelle für erneuerbaren Biodiesel zu sein scheinen und dieses Thema vermehrt Aufmerksamkeit erfährt. (Christi, 2007)

Nicht nur die Bereitstellung kohlenstoffneutraler Kraftstoffe durch Mikroalgen birgt Vorteile, auch die Effizienz der Kohlenstoffabscheidung selbst scheint der von Landpflanzen überlegen zu sein. Durch hohe Wachstumsraten bindet Mikroalgen-Biomasse Kohlenstoff zehnmal effizienter und bildet so den Hauptanteil aquatischer Kohlenstoffspeicherung. (Pires et al., 2012)

Viele Algenarten können die meisten herkömmlichen Pflanzen im Ertrag also übertreffen und bieten darüber hinaus eine vollständige Nährstoffzusammensetzung, wodurch es das wirtschaftliche Interesse gibt die Mikroalge in den Markt zu führen. Konkret beinhalten verschiedene Stämme ein unterschiedliches Gefüge an Kohlenhydraten, Proteinen, Lipiden, Antioxidantien und Vitaminen. Sie sind demnach gehaltvoll und können nach der Biomassegewinnung potenziell mehreren Extraktionsprozessen unterzogen werden, um die jeweiligen Inhaltsstoffe zu ernten und weiterzuverarbeiten. Relevant ist das vor allem für die Nahrungs- und Futtermittelindustrie, welche im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts vor dem Problem stehen wird, die stetig wachsende Weltbevölkerung mit begrenzten natürlichen Ressourcen zu ernähren.

Im Zuge der steigenden Nachfrage nach Fisch und Meeresfrüchten, stieg auch der Bedarf nach Aquakulturen. Fische sind eine der wichtigsten Quellen für langketige, mehrfach ungesättigte Omega-3-Fettsäuren (n-3 LC-PUFA), insbesondere EPA und DHA. Diese Fettsäuren sind wichtig für die menschliche Gesundheit, doch die Menge, die durch Fisch allein zur Verfügung steht, reicht oft nicht aus. In der Aquakultur werden Zuchtfische traditionell mit Fischmehl und Fischöl gefüttert, die reich an diesen Omega-3-Fettsäuren sind. Die stark gewachsene Aquakulturproduktion hat allerdings dazu geführt, dass diese begrenzten und nicht unerschöpflichen Meeresressourcen zunehmend durch alternative, pflanzliche Zutaten ersetzt werden, die jedoch keine n-3 LC-PUFA enthalten. Das hat den Nährwert der gezüchteten Fische verringert, da die Gehalte an EPA und DHA im Endprodukt gesunken sind. In der Fischindustrie wird daher dringend nach neuen Quellen für diese essenziellen Omega-3-Fettsäuren gesucht und Sprague et al. konnten 2017 herausstellen, dass Öle aus Mikroalgen als Futtermittelzusätze einen positiven Einfluss auf den n-3 LC-PUFA-Gehalt hatten.

Das größte und wohl meist beforschte Anwendungsgebiet bezieht sich auf die Lebensmittelbranche. Algen haben in vielen Kulturen eine lange Tradition als Nahrungsmittel und werden schon seit Tausenden von Jahren genutzt. Die frühesten Hinweise auf den Verzehr stammen aus Chile. Archäologische Funde belegen, dass dort bereits vor etwa 14.000 Jahren Algen gegessen wurden (Dillehay et al., 2008). Trotz dieser langen Nutzungsgeschichte hat sich jedoch keine Algenart als bedeutende Nutzpflanze etabliert. Die Gründe dafür liegen vermutlich in verschiedenen Schwierigkeiten bei der Produktion sowie in der fehlenden gesellschaftlichen Akzeptanz. Die neuesten Entwicklungen und technischen Fortschritte allerdings lassen dieses Szenario deutlich realistischer werden. (Torres-Tiji et al., 2020)

Die Nährstoffzusammensetzung zwischen den Algenarten variiert enorm und selbst innerhalb derselben Art kann der Nährstoffgehalt je nach Wachstumsumgebung abweichen. Bedeutsamen Einfluss haben dabei die Mediumslösung, die Temperatur, das Lichtregime sowie die Begasung und Durchmischung des Systems. Protein ist ein entscheidendes Element in der menschlichen Ernährung, da es den größten Teil des Stickstoffs liefert, den der Mensch benötigt. Gleichzeitig gibt es eine Untergruppe von Aminosäuren, die vom menschlichen Körper nicht synthetisiert werden können und die über die Nahrung zugeführt werden müssen (WHO, 2007). Einer der wichtigsten Faktoren für den weltweiten Hunger ist die sogenannte Protein-Energie-Mangelernährung (PEM). Diese besteht aus einer Reihe von pathologischen Zuständen, die durch eine unzureichende Zufuhr essenzieller Aminosäuren und eine unzureichende Gesamtenergiezufuhr verursacht werden (FAO, 2017). Um dieses Problem zu lösen, wird eine neue Quelle für preiswertes und hochwertiges Protein benötigt, die die globale Verfügbarkeit gewährleistet.



Abbildung 3: *Arthrospira platensis* (Spirulina) unter dem Mikroskop (Lausitzer Rundschau, Senftenberg, 2023)

Einige Algenarten sind besonders reich an Proteinen. Bei dem Cyanobakterium *Arthrospira platensis* (Spirulina; dargestellt in Abbildung 3) liegt der Proteingehalt in der Trockenmasse beispielsweise bei bis zu 70 % (Szabo et al., 2013). Andere Mikroalgen, die als „Generally Recognized as Safe“ (GRAS) gelten, haben im Durchschnitt etwa 40 % Proteinanteil. Das ist im Vergleich zu gängigen pflanzlichen Eiweißquellen wie Sojabohnen (38 %), Reis (ca. 10 %), Erbsen (2,8 %) oder tierischen Produkten wie Milch (4 %) oder Eiern (13 %) relativ hoch (Chae et al., 2006). Zusätzlich zu ihrem hohen Proteingehalt bieten Algen ein besonders reichhaltiges Spektrum an essenziellen Aminosäuren, das vielen herkömmlichen Pflanzenproteinen überlegen ist (Matsuda et al., 2011). Im Allgemeinen gelten pflanzliche Proteine als weniger hochwertig im Vergleich zu tierischen Proteinen, da sie weniger essenzielle Aminosäuren in ausreichenden Mengen bereitstellen. Mais etwa fehlt es an Tryptophan und Lysin, Getreide an Lysin und Hülsenfrüchten an Methionin (Gorissen et al., 2018). Im Gegensatz dazu enthalten

fast alle GRAS-Algenarten, mit Ausnahme von *Euglena gracilis*, alle essenziellen Aminosäuren, was sie zu einer vollständigen Proteinquelle macht.

Neben Proteinen sind auch Lipide ein wesentlicher Bestandteil der menschlichen Ernährung, da sie wichtige Bausteine für Zellen liefern und Ausgangsstoffe für viele essenzielle Moleküle sind. Einige Algenarten können Lipide in beeindruckenden Mengen speichern. So kann *Auxenochlorella protothecoides* bis zu 70 % ihrer Trockenmasse als Lipide anreichern (Griffiths & Harrison, 2009). Ebenso wie bei Aminosäuren gibt es auch essenzielle Fettsäuren, wie α-Linolensäure und Linolsäure, die der Körper benötigt. Bestimmte Mikroalgen, wie *Phaeodactylum tricornutum*, können bis zu 30–40 % ihrer Gesamtfettsäuren als EPA speichern, und Arten wie *Schizochytrium* erreichen bei DHA sogar bis zu 50 % der Gesamtfettmenge (Swanson et al., 2012). Diese Algen könnten daher eine alternative Quelle für Omega-3-Fettsäuren darstellen.

Des Weiteren sind Vitamine und Mineralstoffe enthalten, die für eine ausgewogene Ernährung unerlässlich sind. Die Grünalge *Dunaliella tertiolecta* ist etwa eine gute Quelle für Vitamin A, B1, B9 und E. Zudem können Algen Antioxidantien wie Lycopin, β-Carotin und Astaxanthin sowie gesundheitsfördernde Polysaccharide, wie β-Glucane, bereitstellen (Fabregas & Herrero, 1990; Koller et al., 2014). Der Konsum bestimmter Mikroalgen wurde sogar schon mit gesundheitlichen Vorteilen wie einer verbesserten kardiovaskulären Funktion sowie antikarzinogenen Wirkungen oder Anti-Aging-Effekten in Verbindung gebracht (Ejike et al., 2017; Jabeen et al., 2017; Lauritano et al., 2016). Eine weitere Studie zeigte, dass der Verzehr von *Chlamydomonas reinhardtii* positive Effekte auf die Magen-Darm-Gesundheit haben kann und den Gewichtsverlust von Mäusen bei akuter Kolitis verringerte (Fields et al., 2020). Angesichts der enormen Algen-Artenvielfalt könnten zukünftig noch viele weitere der Gesundheit zuträglichen Effekte observiert werden, die den Verzehr von Mikroalgen als gewinnbringende Möglichkeit weiter unterstreichen.

Das wohl größte wirtschaftliche Potential bieten Mikroalgen als Lieferanten von Pigmenten wie β-Carotin und Astaxanthin. β-Carotin wird im Körper zu Vitamin A umgewandelt und ist als natürlicher Lebensmittelfarbstoff gefragt. Ein Teil davon stammt aus der Produktion der Grünalge *Dunaliella salina* (Koller et al., 2014; Spolaore et al., 2006). Astaxanthin, das eine charakteristische rote Farbe hat, wird vor allem in der Tierfütterung genutzt, um Zuchtlachs und Hühnereier einzufärben. Heraus sticht es im Wesentlichen aber durch eine der höchsten je beobachteten antioxidativen Wirkungen aus natürlicher Quelle. Neuesten Erkenntnissen zur

Folge wirkt es 6000-mal mehr gegen freie Radikale als Vitamin C, 550-mal mehr als Vitamin E und etwa 40-mal mehr als  $\beta$ -Carotin und besitzt damit hohes Nutzungspotential in der äußerst lukrativen Nahrungsergänzungsmittelindustrie. Es lässt sich durch die Kultivierung der Mikroalge *Haematococcus pluvialis* gewinnen und wird aufgrund einiger Risiken oder unzureichender Forschung im Hinblick auf den langfristigen Verzehr noch wenig in der Lebensmittelindustrie genutzt. (Nishida et al., 2023; Kumar et al., 2022)

In Abbildung 4 wurde abschließend allen wesentlichen Wirtschaftszweigen ihr jeweiliger Rohstoff aus der Mikroalge zugeteilt, um einen umfassenden Überblick zu bieten.

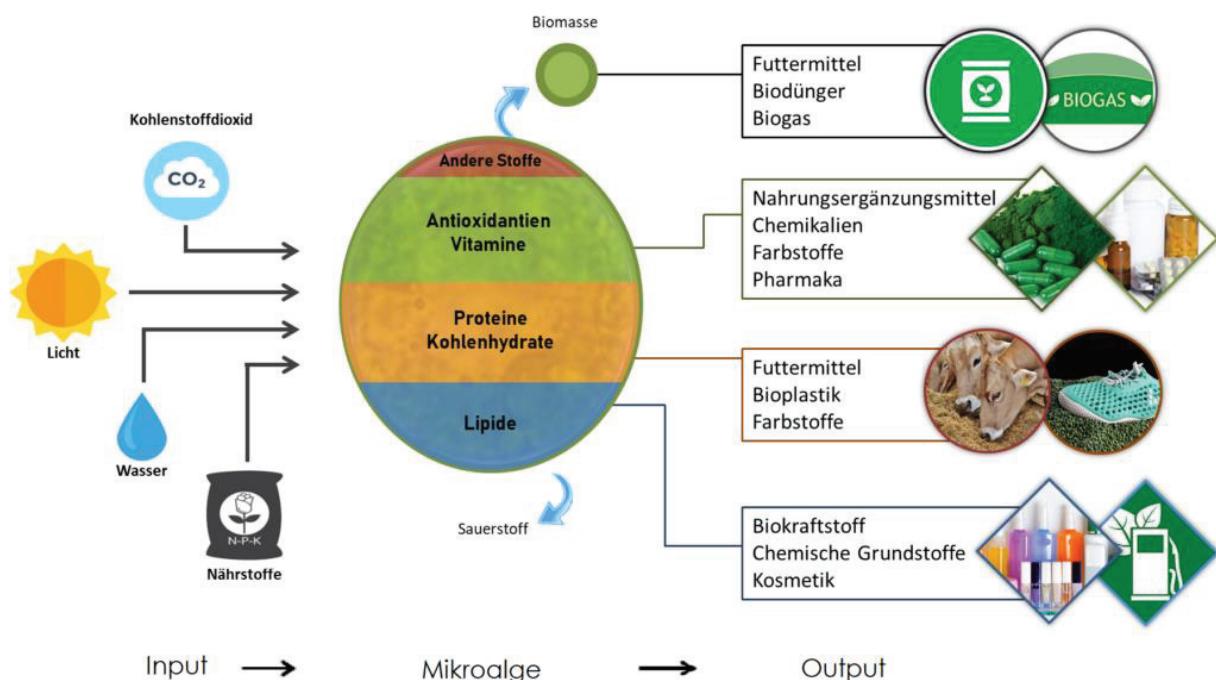


Abbildung 4: Übersicht: Wirtschaftszweige der Mikroalge eingeteilt nach genutzten Rohstoffen (Sea & Sun Organic, 2024)

Wie bereits angerissen, gibt es bestimmte Voraussetzungen für eine komplikationslose Mikroalgen-Kultivierung. Die präzise Abstimmung verschiedenster Prozessparameter machen das Biomassewachstum zu einer technisch anspruchsvollen Herausforderung, wobei die wichtigsten Einflüsse von der Verfügbarkeit und Intensität des Lichts, der Temperatur, der Zusammensetzung des Kulturmediums, der Sauerstoffanreicherung im System, dem Salzgehalt, dem pH-Wert, einer effektiven Durchmischung sowie der vorliegende Kohlenstoffquelle ausgehen. Jeder dieser Faktoren beeinflusst die Wachstumsrate auf eigene Weise, wobei oft komplexe Wechselwirkungen auftreten. (Darvehei et al., 2018)

Licht ist der zentrale Energiegeber für Mikroalgen, da sie sich durch Photosynthese vermehren. Die Art und Intensität der Beleuchtung bestimmen die Effizienz dieses Prozesses. Zu wenig Licht hat eine postwendende Verringerung der Photosynthese-Rate zur Folge, sodass die Zellen stagnieren, während zu viel Licht zu einer sogenannten Photoinhibition führt, wodurch die Algen geschädigt werden und das Wachstum gehemmt wird. Eine kontrollierte Lichtzufuhr ist daher von hoher Bedeutung. (Al-Qasmi et al., 2012)

CO<sub>2</sub> ist die zentrale Kohlenstoffquelle für die Photosynthese und somit für die Biomasseproduktion der Mikroalgen. Eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Kulturmedium kann das Zellwachstum erheblich steigern, da mehr Kohlenstoff für die Synthese organischer Verbindungen zur Verfügung steht. Allerdings können zu hohe Konzentrationen auch den pH-Wert absenken und damit die Zellen stressen. Daher ist eine regulierte Zufuhr, etwa durch intermittierende CO<sub>2</sub>-Einspeisung oder angepasste konstante Gasströme, notwendig, um die Wachstumsbedingungen stabil zu halten. (Qiu et al., 2017)

Algenkulturen sind ebenso sensibel gegenüber Temperaturschwankungen. Die meisten Arten wachsen am besten bei Temperaturen zwischen 20 und 30 °C. Zu niedrige Temperaturen verlangsamen den Stoffwechsel und damit die Zellteilung. Steigt die Temperatur über das optimale Niveau, können Zellmembranen und Proteine geschädigt werden, was zum Zelltod führen kann. Auch die Enzymaktivität, die für die Photosynthese und andere Stoffwechselprozesse nötig ist, wird durch Temperaturveränderungen beeinflusst. Ein konstantes Temperaturregime ist daher essenziell. (Ras et al., 2013; Wu et al., 2013)

Der pH-Wert des Kulturmediums beeinflusst viele biochemische Prozesse in den Zellen. Ein neutraler bis leicht basischer pH-Wert ist für die meisten Mikroalgen optimal. Zu hohe oder niedrige pH-Werte können die Photosynthese-Rate senken, was zu einem verringerten Biomassewachstum führt. Es gilt ein funktionstüchtiges Zusammenspiel aus vorhandenem pH und zugefügtem Puffer abzustimmen, um einen möglichst konstanten pH-Wert aufrecht zu erhalten und so ein stabiles Wachstum zu ermöglichen. Gleichzeitig ist es zu empfehlen, die pH-Anpassung während des Betriebs möglichst hochdosiert zu gestalten, um das Reaktorvolumen nicht maßgeblich künstlich zu erhöhen. (Rai et al., 2015)

Um eine erfolgreiche Kultivierung zu gewährleisten, wird eine ausgewogene Versorgung mit Makro- und Mikronährstoffen benötigt. Stickstoff und Phosphor gehören zu den wichtigsten Makronährstoffen und sind unabdingbar für die Synthese von Proteinen, Nukleinsäuren und Phospholipiden. Ein Mangel an diesen Stoffen führt zu Wachstumsstörungen und

Stressreaktionen der Zellen. Spurenelemente wie Eisen, Magnesium und Mangan sind ebenfalls erforderlich, da sie in Enzymen vorkommen und als Kofaktoren sowie Katalysatoren wirken. Eine Überdosierung hingegen kann toxisch wirken und das Zellwachstum beeinträchtigen. Eine bedarfsgerechte Nährstoffzufuhr, welche durch die Zusammensetzung des vorliegenden Nährmediums bestimmt wird und durch Zugabe von weiteren Komponenten kontinuierlich gesteuert werden kann, ist somit entscheidend. (Klausmeier et al., 2004; Chen et al., 2011)

Der Salzgehalt beeinflusst den osmotischen Druck innerhalb der Algenzellen. Süßwasseralgen und marine Mikroalgen haben jeweils spezifische Toleranzen gegenüber dem Salzgehalt. Ein Anstieg des Salzgehalts über die optimalen Werte hinaus führt zu osmotischem Stress, was die Zellen zwingt, ihren Wasserhaushalt zu regulieren, indem sie Energie aufwenden, die dann nicht mehr für das Wachstum zur Verfügung steht. Ein zu niedriger Salzgehalt bei marinen Arten kann ebenfalls problematisch sein, da die Zellstruktur dadurch destabilisiert werden kann. Die Kontrolle des Salzgehalts ist daher eine durchaus notwendige Maßnahme zur Gewährleistung der Zellintegrität. (Kirst, 1990)

Eine doppelte Rolle im Kulturmedium spielt der Sauerstoffgehalt. Einerseits ist Sauerstoff ein Nebenprodukt der Photosynthese und wird im System daher regelmäßig freigesetzt. Und andererseits kann ein hoher Sauerstoffpartialdruck im Medium zu oxidativem Stress führen, was eine wachstumsemmende Wirkung bedeuten kann. Da Mikroalgen auch Atmung betreiben, benötigen sie nachts Sauerstoff. Die richtige Balance zwischen der Sauerstoffproduktion durch Photosynthese und der Verbrauchsrate in der Dunkelphase ist entscheidend. Erwähnenswert ist zudem das in dieser Dunkelphase naturgemäß eine Stagnation bzw. Abbau der Biomasse stattfindet. Zu erklären ist dies mit der fehlenden Verfügbarkeit von Lichtenergie, welche für die Aufrechterhaltung des Photosynthese-Prozesses Voraussetzung ist. Um zu überleben, nutzt die Mikroalge in dieser Phase die eigenen Rücklagen und „veratmet“ sich selbst bis zur nächsten Helleperiode, in welcher dann der Wachstumsprozess fortgeführt werden kann. Um dieses Phänomen zu umgehen, wird in modernen biotechnologischen Kultivierungsanlagen eine kontinuierliche Beleuchtung verwendet. (Kazbar et al., 2019)

Einen der einflussreichsten Prozessparameter in der Mikroalgenkultivierung stellt die Durchmischung dar, indem sie eine homogene Verteilung von Licht, Nährstoffen, CO<sub>2</sub> und Wärme im Kulturmedium sicherstellt und damit unerwünschten Gradienten vorbeugt. Ohne eine ausreichende Durchmischung können sich in der Kultur Zonen bilden, in denen die

Algenzellen entweder nicht ausreichend mit Licht versorgt werden oder Nährstoffe lokal aufgebraucht sind, was zu einer ungleichmäßigen Wachstumsrate und letztlich zu einem reduzierten Biomasseertrag führt. (Brindley et al., 2004) Zudem fördert sie die effiziente Aufnahme von CO<sub>2</sub> sowie den Abtransport des bei der Photosynthese entstehenden Sauerstoffs. Weiterhin wird verhindert, dass Zellen durch die Schwerkraft absedimentieren und sich zu einem nachteiligen Hindernis an den Reaktorinnenwänden anreichern. Besonders in geschlossenen PBRs ist eine gezielte Durchmischung wichtig, um eine gleichmäßige Verteilung der Gase und eine konstante Versorgung der Algen sicherzustellen. Dies wird, je nach Bauart, häufig durch den Einsatz von Rührern, Pumpen oder Luftblasen erreicht. Allerdings kann eine übermäßige Durchmischung auch negative Auswirkungen haben. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten können, durch das Aufkommen eines zu turbulenten Regimes, mechanischen Stress auf die Algenzellen ausüben, was insbesondere für empfindlichere Arten problematisch ist. Dieser Stress kann den Stoffwechsel der Zellen beeinträchtigen und zu einem höheren Energiebedarf führen. (Wang & Lan, 2018) Es ist daher entscheidend, die Durchmischung so zu regulieren, dass eine gleichmäßige Verteilung der Ressourcen erreicht wird, ohne die Algenzellen mechanisch zu überbelasten. (Muñoz & Gonzalez-Fernandez, 2018)

Insgesamt deuten die Forschungsergebnisse darauf hin, dass Mikroalgen ein enormes nachhaltiges Potenzial bieten. Sie können aktiv zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen beitragen, indem sie CO<sub>2</sub> absorbieren und Biomasse erzeugen, die in bemerkenswert vielfältiger Weise bereichernde Anwendung finden kann. Um den Erfolg der Produktion im industriellen Maßstab sicherzustellen, ist die Wahl des richtigen Kultivierungssystems ein entscheidender Faktor. Hier gibt es zwei Hauptansätze, die sich im Verlauf der biotechnologischen Wissenschaft hervorgetan haben und die Umsetzung elementarer Prozessparameter unterschiedlich realisieren - offene Teichsysteme bzw. „Open Ponds“ und geschlossene PBRs. Offene Teichsysteme sind kostengünstig und komfortabler in der Handhabung. Sie bestehen aus flachen Becken, in denen die Algen wachsen und sind ihren natürlichen Vorkommen im aquatischen Lebensraum nachempfunden. Diese Systeme lassen sich durch ihr einfaches Design leicht skalieren und nutzen die Sonne als natürliche Lichtquelle, was sie besonders attraktiv für großflächige Kultivierungen macht. Open Ponds eignen sich am besten für Mikroalgenarten, die tolerant gegen Temperaturschwankungen, ungünstige Wetterbedingungen bzw. Verunreinigungen sind und werden in drei grundlegenden Ausführungen gebaut. (Chisti, 2007)

Rundbecken sind kreisförmige Becken, in denen das Kulturmedium durch ein zentrales Rührwerk (Abbildung 5, mittig) in Rotation gehalten wird. Diese Rotationsbewegung sorgt für eine gleichmäßige Durchmischung des Mediums, wodurch die Mikroalgen regelmäßig dem Licht ausgesetzt werden und der Austausch von CO<sub>2</sub> sowie Nährstoffen verbessert wird. Die runde Form trägt dazu bei, dass sich Algenzellen nicht am Boden absetzen, sondern gleichmäßig im Becken verteilt bleiben. Im Vergleich zu anderen Bauweisen sind Rundbecken in der Konstruktion relativ einfach, erfordern jedoch eine mechanische Ausstattung, um die Strömung aufrechtzuerhalten. Sie sind besonders geeignet für kleinere bis mittlere Produktionsmengen.

Rennbahnteiche, auch als Raceway Ponds bekannt, sind langgestreckte, flache Kanäle, die in einer ovalen oder rechteckigen Form angelegt sind. Die Durchmischung erfolgt hier durch rotierende Paddelräder (Abbildung 5, links), die das Kulturmedium in einem kontinuierlichen Kreislauf in Bewegung halten. Die Strömung sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Algen im Becken und erleichtert die Lösung von Nährstoffen und CO<sub>2</sub> im Wasser. Durch ihre flache Bauweise kann das Licht gut in die Kulturschicht eindringen. Raceway Ponds eignen sich besonders für die großflächige Algenproduktion und werden häufig für industrielle Anwendungen eingesetzt, da sie relativ große Mengen an Biomasse bei geringen Baukosten erzeugen können. Sie sind ideal für Regionen mit stabilen klimatischen Bedingungen und viel Sonneneinstrahlung, sind jedoch auch anfällig für Verdunstung und Temperaturschwankungen, was die Erträge beeinflussen kann. Sie benötigen zudem eine äußerst hohe Grundfläche und stehen damit in Konkurrenz mit anderen Flächennutzungsoptionen.

Flache Teiche stellen die dritte und einfachste Form der offenen Algenkultivierung dar. Sie bestehen aus großflächigen, niedrigen Wasserbecken oder Gruben, die oft nur wenige Zentimeter tief sind. Diese Becken werden durch die Sonne bestrahlt und ohne herkömmliche Rührmethoden durchmischt. Stattdessen wird sich ausschließlich natürlichen Windbewegungen bedient (Abbildung 5, rechts). Auch hier kann das Licht aufgrund der geringen Tiefe bis in die unteren Schichten des Wassers vordringen, was eine gleichmäßige Versorgung der Algen ermöglicht. Die einfache Konstruktion macht flache Teiche besonders kostengünstig und leicht realisierbar an verschiedenen Standorten, da für die Anlage keine speziellen Materialien oder Technologien erforderlich sind. Sie bieten, analog zu anderen offenen Systemen, jedoch nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Kontrolle von Temperatur oder Nährstoffgehalt und sind stark auf die natürlichen Wetterbedingungen angewiesen. Flache Teiche sind daher vor allem für die großflächige Massenproduktion in Regionen geeignet, in

denen Platz und Wasserressourcen ausreichend vorhanden sind und das Klima relativ stabil ist. Für die industriell wertschaffende Nutzung sind sie eher ungeeignet. (Jorquera et al., 2010)

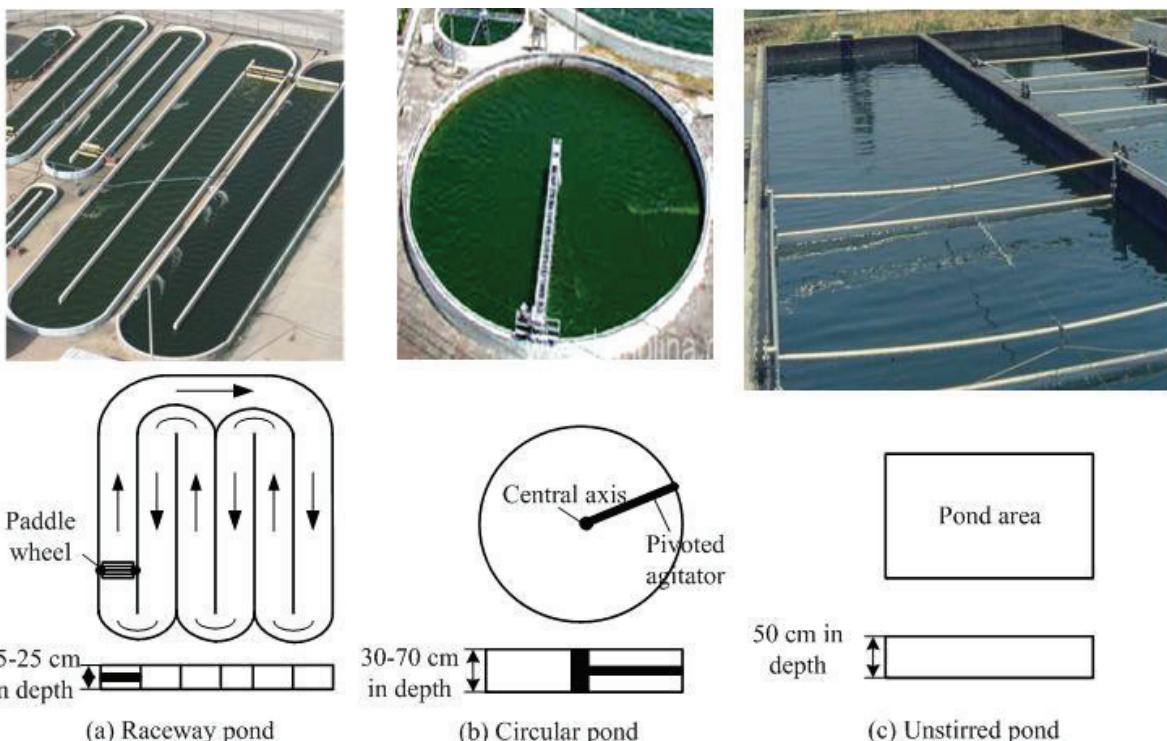


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Drei verschiedenen Open-Pond-Bauarten (Rennbahnteich, Rundbecken, Flacher Teich v.l.n.r.) (Shen et al., 2009)

Im Kontrast dazu bieten geschlossene PBRs eine künstliche, kontrollierbare Umgebung, die optimale Wachstumsbedingungen schafft. Diese Systeme verwerten CO<sub>2</sub> effizienter, können durch die Nutzungsmöglichkeit beliebiger Bauformen an individuelle Standorte angepasst werden und bieten Schutz vor Wasserverlusten und Kontaminationen. Die Umweltbedingungen können, durch eine hohe technische Komplexität, präzise gesteuert werden. Der größte Nachteil besteht in den hohen Kosten, welche der maschinelle sowie bauliche Bedarf mit sich bringt. Eine Beeinträchtigung der wirtschaftlichen Rentabilität ist dadurch möglich, weshalb fein abgewogen werden muss, welches System für die spezifischen Anforderungen am ehesten in Frage kommt. (Muñoz & Gonzalez-Fernandez, 2018) Im Bereich der geschlossenen Kultivierungssysteme haben sich besonders vier verschiedene Bauweisen von PBRs als praktikabel herausgestellt. Diese unterschiedlichen Typen, darunter der Blasensäulen-PBR, Flachplatten-PBR, Ring-PBR und Röhren-PBR, haben jeweils ihre eigenen Besonderheiten, Stärken und Schwächen und eignen sich damit für unterschiedliche Anwendungszwecke. (Ranganathan et al., 2022)

Blasensäulen-PBRs (Abbildung 6, mittig links) etwa bestehen aus vertikal angeordneten, zylindrischen Behältern und werden von unten mit Luft begast. Die so entstehende Strömung

stellt die in diesem System einzige Durchmischungsquelle dar, was den Gesamtenergiebedarf senkt. Die aufsteigenden Gasblasen sorgen für eine gleichmäßige Durchmischung der Zellen und eine verbesserte Verteilung der Gase im Wasser. Eine Herausforderung dieser Bauart ist, dass es bei hohen Zelldichten zu Problemen mit der Lichtdurchdringung kommen kann, da das Licht nicht mehr bis in tiefere Schichten vordringt. In Blasensäulen sind zudem Biofilme ein Thema, die sich an den Innenwänden ablagern und die Effizienz des Reaktors schmälern können. Dieser PBR-Typ wird häufig in Labors für kleine bis mittlere Mengen genutzt und eignet sich vor allem für die platzsparende Züchtung von Vorkulturen, um eine anschließende Kultivierung im industriellen Maßstab vorzubereiten. Für Produktionen größerer Mengen fehlen der Bauweise das nötige Fassungsvermögen sowie einige günstige verfahrenstechnische Eigenschaften wie einer geeigneten internen Fluidodynamik oder belastbarer Lichtaufnahmeeffizienz. (Nauha & Alopaeus, 2013)

Eine zweite Variante ist der Flachplatten-PBR (Abbildung 6, links). Er besteht aus flachen, durchsichtigen Platten, die eine Kammer zwischen sich einschließen, in welcher die Mikroalgen-Kultivierung stattfindet. Die Algensuspension wird durch diese Platten durch den Einsatz von Pumpen zirkulierend in Bewegung gehalten. Die flache Struktur der Platten sorgt dafür, dass das Licht besonders gut auf die Algenkulturen trifft, da es durch die dünne Kulturschicht ungehindert eindringen kann. Dies sorgt für hohe photosynthetische Raten im System. Flachplatten-PBRs sind darüber hinaus platzsparend und daher auch in städtischen Gebieten oder anderen begrenzten Platzverhältnissen eine interessante Option. Sie zeichnen sich durch ein gutes Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis) aus. Allerdings sind sie auch technisch anspruchsvoll und mit hohen Anschaffungskosten verbunden, da die transparenten und stabilen Materialien teuer sind und zu einer Vielzahl benötigt werden. Auch die Reinigung ist aufwendig, da die dünnen Platten schnell von Biofilmen bedeckt werden können. Es lässt sich jedoch zusammenfassen, dass sich Flachplatten-PBRs für eine große Vielfalt verschiedener Mikroalgenstämme eignen und hohe photosynthetische Wirkungsgrade erzielt werden. (Acién et al., 2017)

Eine logische Anpassung des Flachplatten-PBRs stellt der Ring-PBR (Abbildung 6, mittig rechts) dar, welcher die Platten, aus platzstrukturellen Motiven heraus, einmal um eine zentrale vertikale Achse dreht, wodurch eine hohlzylindrische Bauform entsteht, die nun eine praktischere Grundfläche als der Flachplatten-PBR aufweist. Diese Reaktoren bestehen also aus ringförmigen Behältern, durch die die Algensuspension in einem Kreislaufsystem zirkuliert. Dabei kommen Pumpen oder die Schwerkraft zum Einsatz, um die Algenkultur in

Bewegung zu halten. Die ringförmige Anordnung bietet eine kompakte Nutzung des Raums, während das Licht von außen oder vom inneren Hohlraum auf die Algensuspension trifft. Er eignet sich für die individuelle Anwendung, wenn spezielle Gegebenheiten wie fehlender Platz oder besonders aussichtsreiche verfahrenstechnische Möglichkeiten den Einsatz begünstigen. Für die Kultivierung industrieller Mengen allerdings bieten sich der Flachplatten- sowie Röhren-PBR eher an, da dort ein höheres Skalierungs-Potential besteht. (Ranglová et al., 2022)

Röhren-PBRs (Abbildung 6, rechts) bestehen aus einem System durchsichtiger Röhren, häufig aus Glas oder Kunststoff, durch die die Algensuspension kontinuierlich im Kreis gepumpt wird. Diese Röhren können, je nachdem wie viel Platz zur Verfügung steht und welche Lichtverhältnisse gegeben sind, in unterschiedlicher Ausrichtung installiert werden (horizontal, vertikal oder schräg). Durch die ständige Umwälzung der Algensuspension wird eine gleichmäßige Belichtung der Algen erreicht. Allerdings hat dieser Reaktortyp auch Nachteile, denn die kontinuierliche Kreislaufförderung des Mediums erfordert viel Energie, was die Betriebskosten in die Höhe treibt. Zudem neigen die Innenwände der Röhren auch hier dazu, sich mit Biofilmen zu überziehen. Die Herstellung, Reinigung sowie Wartung dieser Röhrensysteme sind kostspielig, was ihren Einsatz oft auf die Kultivierung von Algenarten beschränkt, die einen lukrativen Marktwert haben. (Torzillo & Chini Zittelli, 2015) Trotz dieser Nachteile haben sich großflächige Röhrensysteme zur Kultivierung von Mikroalgen als bewährte Technologie etabliert. Ebenso hervorzuheben ist ihr extrem hohes A/V-Verhältnis, wodurch die Lichtaufnahmeeffizienz und damit die Photosynthese-Rate maximiert wird.

Abbildung 6 zeigt zur Visualisierung alle angeschnittenen PBR-Bauarten, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass in der Praxis oft Kombinationen zweier Arten, auch von offenen und geschlossenen Systemen untereinander, denkbar und sinnvoll sind.

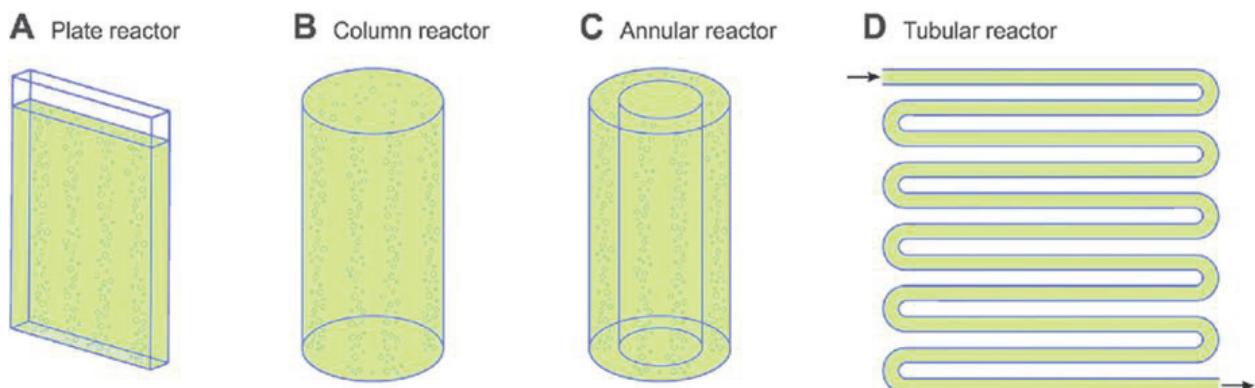


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Vier wesentlichen PBR-Bauarten (Flachplatten-PBR, Blasensäulen-PBR, Ring-PBR und Röhren-PBR v.l.n.r.) (Hallmann, 2015)

In den letzten Jahren hat sich Deutschland als Vorreiter auf dem Gebiet der großflächigen Röhren-PBRs zur Produktion von *Chlorella*- und *Haematococcus*-Biomasse hervorgetan. Produkte dieser PBRs rangieren meist nur in höheren Preisklassen. Für die Massenproduktion von niedrigpreisigen Rohstoffen sind sie ungeeignet, es sei denn, es gelingt, sowohl die Investitionskosten als auch den Energiebedarf für das Mischen der Kulturen erheblich zu senken (Borowitzka & Moheimani, 2013)

Hier setzt diese Arbeit an. Um auch am Standort Neubrandenburg einen Beitrag zur Forschungssituation um den Röhren-PBR leisten zu können, wurde eine entsprechende Anlage im Technikums-Maßstab gebaut, die der Hochschule anschließend für die Lehre sowie eigenen Projekten zur Verfügung steht. Diese Bauform ist wegen seiner verlässlichen Funktionsweise, hohen Langlebigkeit sowie komfortablen Handhabung sehr gut für diesen Zweck geeignet und wurde während dieser Arbeit geplant, umgesetzt sowie verfahrenstechnisch charakterisiert.

Die verfahrenstechnische Analyse eines PBRs ist von entscheidender Bedeutung, um seine Effizienz und seine Eignung für spezifische Anwendungen zu bewerten. Ein zentraler Aspekt dabei ist die Möglichkeit der Vergleichbarkeit dieses Systems mit alternativen PBR-Konzepten. Jede separate Ausführung eines PBRs bringt spezifische Eigenschaften mit sich, welche die internen mechanischen, dynamischen sowie thermischen Wirkweisen in komplexer korrelierender Art beeinflussen können, sodass es wissenschaftlich bedeutsam ist, jedes exklusive Design auf seine verfahrenstechnische sowie biotechnologische Leistungsfähigkeit hin zu untersuchen. Dabei gibt es einige Prozessparameter, welche die Beurteilung eines Systems sowie eine Einordnung in die bestehende Forschungslage ermöglichen. (Yeo et al., 2018)

Das Volumen eines Röhren-PBRs bestimmt direkt, wie viel Biomasse sich maximal im System befinden kann. Ein größeres Volumen bedeutet eine höhere Produktionskapazität und kann durch verschiedene Skalierungs-Maßnahmen, wie der großflächigen Erweiterung, gesteuert werden. Spricht man also von einer guten Skalierbarkeit, ist meist die komplikationsarme Fähigkeit der Produktionsaufstockung einer Bauart gemeint. Je größer die Anlage skaliert wird, desto höher wird in der Regel der erforderliche Betriebsaufwand sowie der nötige verfahrenstechnische Leistungsbedarf, um die ordnungsgemäße Funktion des Systems aufrecht zu erhalten. Diese einhergehenden Auswirkungen sind sorgfältig abzuwägen, damit sich der gewünschte Ertrag und die betrieblichen Ressourcen, wie verfügbare Arbeitskraft bzw. -zeit, finanzielle Mittel oder räumliches Potential, passend ergänzen.

Die Mischzeit, also die Zeit, die benötigt wird, um eine vollständig homogene Verteilung von gelösten Stoffen oder Partikeln zu erreichen, ist ein kritischer Parameter für die vergleichende Leistungseinschätzung von Systemen. Eine kurze Mischzeit verbessert die Wachstumsrate, da sie eine gleichmäßige Verteilung der Lichtintensität und der Nährstoffe sicherstellt sowie die Entstehung von internen Gradienten verhindert. In der Forschung wird für diesen Parameter meist der Zustand anvisiert, bei dem die Konzentration eines experimentellen Maßes im gesamten Reaktor eine Abweichung von maximal  $\pm 5\%$  aufweist. Wegen der zentralen Rolle dieses Themas in industriellen Anwendungen sind zahlreiche Methoden zur Bestimmung der Mischzeit aufgekommen. Dazu gehören unter anderem Experimente mit Leitfähigkeitstracern, pH-Tracer sowie kolorimetrische Messverfahren. Auch optische Alternativen für die Charakterisierung sind publiziert. Diese beruhen auf der subjektiven Beobachtung des Betrachters und schätzen das Erreichen des definierten Zustandes visuell ein. Um Unregelmäßigkeiten durch individuelle Wahrnehmungen vorzubeugen und optische Methoden quantifizierbar zu machen, wurden digitale Messverfahren entwickelt, die eine wissenschaftliche Belastbarkeit bereitstellen können.

Eine solche einfache Bestimmungsmethode ist von Sandmann und Wurm 2021 beschrieben und stützt sich auf die Auswertung von Videodateien, welche durch eine Reihe von digitalen Bearbeitungsschritten in aussagekräftige Messwerte umgewandelt werden können. Dabei wird Farbe in die zu analysierende Anlage injiziert und der Mischungsfortschritt mit einer Kamera aufgenommen. Durch die Injektion der Farbe in das System, mischt sich Diese durch die individuelle Mischfunktion des Systems mit dem enthaltenen Wasser und die Helligkeit aller Reaktorbereiche beginnt sich über einen bestimmten Zeitraum dynamisch zu ändern. Entscheidend bei der Auswertung der Dateien ist die Standardabweichung des Histogramms eines aus der Videodatei extrahierten Bildes. Das Histogramm ist eine grafische Darstellung der Häufigkeiten aller Helligkeitswerte in einem Bild. Die zugehörige Standardabweichung bildet die mittlere Abweichung vom Mittelwert der Helligkeiten aller Pixel eines Bildes ab, was den Grad der Streuung beschreibt. Zu erwarten ist, dass dieser Grad nach der Farbinjektion ansteigt, da sich schlagartig alle Helligkeitswerte der Pixel ändern, dann sinkt, weil sich alle Pixel allmählich desselben Helligkeitswerts annähern und schließlich in einem Bereich einpegelt, da die Helligkeit, aufgrund des vollständigen Mischungszustandes, nun unverändert bleibt. Im Rahmen der Auswertung ist es erforderlich, für jedes der aus der Videodatei extrahierten Bilder die Standardabweichung des Histogramms bestimmen zu lassen, um einen charakteristischen Verlauf zu dokumentieren und final das Bild zu detektieren, ab dem die

Helligkeitsstreuung nachträglich einen Bereich von  $\pm 5\%$  des Endwertes nicht mehr verlässt. Der Zeitpunkt der Aufnahme dieses Bildes gilt nach dieser Methode als die gemessene Mischzeit. Dieses Verfahren wurde in dieser Arbeit zur Systemevaluierung angewendet.

Als weiteres Güte-Maß hat sich das A/V-Verhältnis etabliert. Es stellt einen wichtigen Faktor bei der Konstruktion von PBRs dar, da wesentliche interne Vorgänge, wie der Wärmeaustausch und die Verteilung des Lichts, dadurch begrenzt bzw. gefördert werden. Das A/V-Verhältnis beschreibt, wie viel Gefäß-Außenfläche im Verhältnis zum Volumen des enthaltenen Kulturmediums in einem Reaktor vorhanden ist und bestimmt daher wieviel Oberfläche pro Mediums-Volumeneinheit für die genannten Vorgänge zur Verfügung steht. Vor allem relevant ist es für die Photosynthese-Rate, welche durch ein höheres A/V positiv beeinflusst wird. (Posten, 2009)

Die Fließgeschwindigkeit im Inneren des Reaktors hat eine doppelte Bedeutung. Einerseits beeinflusst sie die mechanische Belastung der Mikroalgen, andererseits wirkt sie sich auf den Stofftransport aus. Bei zu hohen Fließgeschwindigkeiten könnten Scherspannungen entstehen, die empfindliche Zellkulturen schädigen. (Wang & Lan, 2018) Demgegenüber führt eine zu geringe Geschwindigkeit zu einer unzureichenden Durchmischung, wodurch zum einen sich durch Zell-Sedimentation bildende Biofilme auf System-Innenwände legen können, die die Lichtdurchlässigkeit beeinträchtigen. Und zum anderen können interne Toträume entstehen, welche nicht adäquat mit Licht und Nährstoffen versorgt werden. (Yeo et al., 2018)

Direkt aus der Fließgeschwindigkeit, in Verbindung mit dem verwendeten Rohrdurchmesser, kann die Reynoldszahl berechnet werden, welche als Maßstab für die Beurteilung der Strömungsart dient. Während eine niedrige Reynoldszahl auf eine laminarere Strömung hinweist, deutet eine hohe Reynoldszahl (ab  $Re = 2300$ ) auf turbulente Bedingungen hin. Turbulente Strömungen sind vorteilhaft, um den Stoffaustausch zu verbessern und die Durchmischung zu fördern, was bei Röhren-PBRs oft angestrebt wird.

Der volumetrische Stoffübergangskoeffizient ( $kLa$ ) ist ein Parameter, der die Effizienz des Gasaustausches in flüssigen Medien beschreibt und ist in PBRs vor allem aufgrund des  $O_2$ -bzw.  $CO_2$ -Transfers relevant. Anhand des  $kLa$  können Rückschlüsse auf die Begünstigung der spezifischen baulichen Geometrien und Lösungen auf diese wesentlichen Stofftransfers gezogen werden. In biotechnologischen Prozessen ist der Gehalt gelösten  $CO_2$ s (DCO) und  $O_2$ s (DO) für das Biomassewachstum essenziell und es ist daher zuträglich eine konstante Versorgung der Zellen zu gewährleisten. Ein hoher Wert für den  $kLa$  ist demgemäß

anzustreben. Beeinflusst wird er maßgeblich durch die Intensität der Durchmischung, der Geometrie des Reaktors, den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Mediums sowie durch die Begasungsrate. (Aroniada et al., 2020)

Abschließend bleibt zu sagen, dass die Planung und Konstruktion eines PBRs einer sehr taktvollen Koordination sowie Kalkulation aller prägenden Design- und Skalier-Möglichkeiten unterliegt, die die genannten wesentlichen Prozessparameter maßgeblich beeinflussen. Verwendete Bauteil- und Geometrie-Lösungen sollten sich dabei stets dem jeweiligen Nutzungsbedarf fügen und darüber hinaus möglichst energieeffizient konzipiert werden, um zugleich einen wirtschaftlichen sowie funktionstüchtigen Betrieb der Anlage zu gewährleisten.

Für diese Arbeit war keine gewisse finanzielle Eingrenzung vorhanden, doch wurde großen Wert auf möglichst preiswerte Komponenten gelegt. Aufgabenstellung war es dabei, einen geschlossenen, mobilen Röhren-PBR im Technikumsmaßstab zu planen und umzusetzen, welcher auf dem Gestell-Baukasten der Firma „MiniTec“ basiert, ein Röhren- sowie Pumpensystem aufweist und die Möglichkeit einer umfangreichen Prozesskontrolle bietet. Um eine ordnungsgemäße Arbeit des Systems sicherzustellen, wurde für die Realisierung relevanter Elemente auf eigene Verantwortung hin freie Hand gelassen. Dabei wurden regelmäßig informative Meetings mit dem betreuenden Professor Herrn Dr. Sandmann (University of Applied Sciences Neubrandenburg) abgehalten, um konzipierte Pläne vorzustellen und anschließend zu besprechen.

## 3 Materialien und Methodik

### 3.1 Planung und Beschaffung

#### 3.1.1 Anforderungsprofil

Um ein definiertes Anforderungsprofil zu erstellen, lohnt es sich zunächst eine Nutzungsbeschreibung des Reaktors zu verfassen. Der zu erstellende Röhren-PBR soll an der Hochschule Neubrandenburg für die studentische Lehre sowie für wissenschaftliche Projekte im Rahmen der Hochschule verwendet werden. Dementsprechend ist es hierbei nicht von hauptsächlicher Bedeutung einen wirtschaftlichen Betrieb darzustellen, da der Forschungscharakter im Fokus steht. Stattdessen ist es von großem Wert eine gewisse Reproduzierbarkeit von Versuchskonfigurationen zu gewährleisten, um ein wissenschaftliches Arbeiten an der Anlage zu ermöglichen. Ein sehr kontrollierbarer und stabiler Betrieb wird dem vorausgesetzt, sodass besonderes Augenmerk auf die systemische Geschlossenheit, konstante Arbeitsweise und einfache Bedienbarkeit der Anlage gelegt wurde. Um die wesentlichen bzw. weitere nützliche Funktionen zu erfüllen, muss der Röhren-PBR einige bauliche Komponenten aufweisen.

Dabei handelt es sich allgemein um Folgende: geeignete Belichtung mit Intensitätssteuerung, Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Zufuhr durch Gaseinspeisung, Entgasung zur internen Druckprävention, praktikables Pumpensystem zur Kreislaufförderung sowie weitere zuträgliche Maßnahmen für eine möglichst effektive Durchmischung, stabiles Gestell-System mit der Möglichkeit der Röhreninstallation, durchsichtiges Röhren-System mit der Option des komfortablen Auf- und Abbaus, einfache Erntemöglichkeit der Biomasse am untersten Ende der Anlage, umfangreiche Prozesskontrolle in Form von Sensorzugängen unter der Berücksichtigung der Kompatibilität mit den hochschuleigenen Messsonden, Probenahme-Möglichkeit, stabiler Vorlaufbehälter in geeigneter Größe, eine Rollen-Installation zur Mobilitätsgewährleistung sowie die Möglichkeit der Zudosierung für den kurzfristigen Eingriffsbedarf (Schaumbildung, pH-Anpassungen). Die ersten Recherchen mündeten in dem folgenden ersten groben Anlagenplan (Abbildung 7).

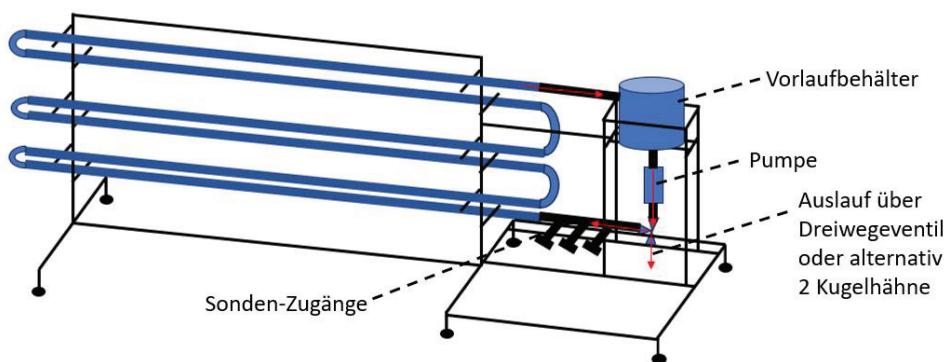


Abbildung 7: Initialer Anlagenplan (Eigene Skizze)

### **3.1.2 Marktrecherche und Bauteilauswahl**

Für die Realisierung dieser Komponenten, wurde eine umfangreiche Recherche eingeleitet und kontinuierlich geführt, die verschiedene Lösungen nach den wesentlichen Gesichtspunkten Funktionstüchtigkeit, Bedienbarkeit und Kosteneffizienz gegeneinander evaluierte. Dabei ist zu erwähnen, dass eine Anpassung bestimmter Ursprungspläne, aufgrund von konstruktiven Entwicklungen, regelmäßig von Nöten war. Zurückzuführen ist dies auf die erforderliche Einarbeitungszeit, die unverzichtbar war, um die Marktlage zu bestimmten Komponenten gesamtheitlich zu überblicken, wodurch eine fundierte Kaufentscheidung erst nach einer bestimmten Zeit getroffen werden konnte. Im Folgenden werden die endgültig genutzten Lösungen für notwendige Komponenten vorgestellt und ihre jeweiligen Vorteile erörtert, welche den Entscheidungen zu Grunde liegen.

Das Nutzung des Gestell-Systems der Firma „MiniTec“ war vorgegeben bzw. empfohlen und es bedurfte daher keinerlei Marktrecherche. Lediglich innerhalb des verfügbaren Katalogs gab es verschiedene Ansätze, die es abzuwegen galt, um bestimmte Herausforderungen zu lösen. Das Gerüst stellt die System-Basis dar und gewährleistet die Stabilität und Robustheit während des laufenden Kultivierungsprozesses. Aufgrund der zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen durch die Pumpe bzw. Begasung oder dem mobilen Transport der gesamten Anlage, muss es so konzipiert sein, dass die fixierte Position eines jeden Bauteils, welches auf ihm installiert ist, erhalten bleibt.

Das standardisierte Baukasten-System der Firma ermöglicht eine individuelle Konstruktion, die je nach Bedarf umgesetzt werden kann. Wesentliche Bestandteile des Baukastens sind lange Metall-Streben aus einer resistenten Aluminiumlegierung, welche mit einem ausgeklügelten Profilmechanismus (Abbildung 8, links) ausgestattet sind. Dieses Profil ist so entworfen, dass Schrauben eines bestimmten Durchmessers sowie Länge verschiedene Bauteile an diesen Streben befestigen können. Dabei können zwei maßgebliche Schrauben-Arten verwendet werden – Zylinder- und Hammerschrauben, deren jeweiliges Montageprinzip in Abbildung 8 (mittig und rechts) dargestellt ist. Hammerschrauben bieten die Möglichkeit Bauteile zu montieren, auch wenn eine Strebe bereits verbaut ist und damit die für die Einführung der Zylinderschraube notwendige Öffnung am Profil der Strebe nicht mehr erreichbar ist. Dies ermöglicht die Umsetzung beliebiger Komplexbauten. Des Weiteren wurden Montagewinkel für die Verbindung zweier Streben, Verspannelemente sowie Traversen als Querstreben für die zusätzliche Stabilisierung und Auflageprofile für die Abfederung und Fixierung des Röhren-Systems verwendet.

Tabelle 1 zeigt die für die Konstruktion des Gestells verwendeten Artikel der Firma „MiniTec“. Spezifische Kompatibilitäten sind mit Rechtsbündigkeiten unter dem jeweiligen Profil gekennzeichnet.

Für den weiteren Bedarf, wie eventueller Erweiterungen der Anlage oder Neubauten, ist es nützlich zu wissen, dass bei der Bestellung der Montagewinkel bereits passende Verbindungselemente wie Gleitmuttern und Schrauben inklusiv mitgeliefert werden. Die Artikelnummern Dieser sind für Ersatzteilzwecke dennoch aufgeführt.

*Tabelle 1: Verwendete Gestell-Bauteile der Firma "MiniTec" mit Artikelnummern*

Bauteilbeschreibung	Artikelnummer
Profil 30x30	20.1068/0
Montagewinkel 30 GD-Z	21.0905/0
Zylinderschraube M06x12	21.1143/0
Gleitmutter M06x13 verzinkt	21.1330/0
Abdeckkappe 30x30 Z grau	22.1146/1
Profil 45x45	20.1006/0
Verspannelement 45	21.1761/0
Traverse 90	21.1783/0
Montagewinkel 45 GD-Z	21.1349/0
Zylinderschraube M08x18	21.1268/0
Hammerschraube	21.1370/0
Gleitmutter M08x13 verzinkt	21.1351/0
Abdeckkappe 45x45 Z grau	22.1004/1
Auflageprofil 45 NBR, schwarz	22.1098/0



*Abbildung 8: Profilsystem der Streben; Montageprinzip von Zylinderschrauben; Montageprinzip von Hammerschrauben (v.l.n.r.) (mittig: Eigene Aufnahme; links und rechts: minitec.de)*

Für die feste Fixierung des verwendeten Röhren-Systems am Gestell, wurden 6 cm lange M08-Schrauben (ArtNr.: 6399984) sowie M08-Sechskantmuttern (ArtNr.: 6387724) der Baumarkt-Handelskette „OBI GmbH & Co. Deutschland KG“ und 40 x 33 x 30 - M08-Gummi-Puffer (ArtNr.: 60330-0570-040-030-57) der Firma „seimatec“ verwendet. Ebenfalls von „OBI“ stammten die verbauten Transport-Lenkrollen mit Feststeller (ArtNr.: 4184099), welche unter das Gestell montiert wurden, um die Mobilität zu gewährleisten. Der genutzte Artikel hob sich durch seine Montagefreundlichkeit und hohen Robustheit von anderen Lösungen ab.

Der nächstgrößte, verbaute Materialbestand stellte das Röhren-Gefüge dar. Verwendet wurde das Röhren-PBR-Baukasten-System der Firma „Schott AG“. Es wurde explizit für die Kultivierung phototropher Organismen konzipiert und besteht im Kern aus langen Röhren sowie U-Stücken aus chemisch beständigem Borosilikat-Glas und zugehörigen Kupplungen, die eine Verbindung der Bauteile ermöglichen. Die Kupplungen setzen sich aus einer unteren Schicht von beidseitig breiten Gummi-Stulpen und zwei Hartplastik-Ringen zusammen. Die komfortable Handhabung des Montageprozesses (Abbildung 9) ist in hohem Maße attraktiv für diese Arbeit, da so eine schnelle und verlässliche Installation bewerkstelligt werden kann. Weiterhin ist ein einfacher Abbau der Röhren möglich, wodurch bei Bedarf individuelle Anpassungen oder Untersuchungen am Reaktor durchgeführt werden können. Dies stellt eine erhebliche Aufwertung der Eignung dieser Lösung dar, sodass, unter Berücksichtigung weiterer begünstigender Faktoren wie der bekanntermaßen sehr hohen Qualität der Firma „Schott“, hohen Beständigkeit und Langlebigkeit des Materials sowie Bestellmöglichkeit von vergleichsweise kleinen Packungsgrößen, ein entsprechender Auftrag zeitnah in die Wege geleitet wurde. Tabelle 2 listet die integrierten Bauteile dieses Systems mit ihren Größen und Artikelnummern auf. Für die Installation wurden zwei Rohr-Hakenschlüssel aus dem Bestand des Technikums der Hochschule Neubrandenburg verwendet.

*Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Röhren-PBR-Bauteile mit Artikelnummern*

Bauteilbeschreibung	Länge	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Artikelnummer
Röhren	1,4 m	65 mm	60,6 mm	1500383
U-Stücke	0,55 m	65 mm	59,4 mm	1436672
Kupplungen	—	85 mm	65 mm	1463260



Abbildung 9: Glasröhren der Firma „Schott AG“ mit Kupplung als Verbindungselement (schott.com)

Ein sehr wichtiges Element des PBRs verkörpert der Vorlaufbehälter, da an ihm für den Betrieb wesentliche Bauteile, wie die Pumpe, die Entgasung und das Röhren-System, installiert sind. Er stellt zudem eine Pufferzone für die Kreislaufförderung sowie die einzige kurzfristige Interventionsmöglichkeit während des laufenden Betriebs dar. Genutzt wurde eine Lösung des Online-Katalogs der Firma „Tanks Direkt GmbH“ (ArtNr.: 25TN-NA-6-UD-VE). Es handelt sich um einen drei Kilogramm schweren 25-Liter-Tank mit 15 cm großer Öffnung an der Oberseite. Dieser zeichnet sich durch seine äußerst dicke Außenwand und geeigneten Quaderform sowie passigen Abmessungen aus, wodurch an den glatten Oberflächen komplikationslos Tankdurchführungen angebracht werden können. Außerdem bietet er durch einen integrierten Auslass mit Gewindemuffe am unteren Ende einer Wand die Option der Probenahmeventil-Installation sowie durch einen Deckel mit Belüftungs-Rückschlagventil zum einen die Möglichkeit der vollständigen Schließung des Systems und zum anderen die des automatischen Druckausgleichs nach Probenahme. All diese Details sorgen, im Vergleich zu vorhandenen Marktaalternativen, für eine außergewöhnliche Zugänglichkeit und hohen Nutzungsauglichkeit. Tabelle 3 enthält die technischen Daten des Tanks.

Tabelle 3: Technische Daten des verwendeten Vorlaufbehälters mit Artikelnummer

<b>Produktbeschreibung nach Hersteller</b>	<b>25 Liter Wassertank hochkant 15 cm Deckel und 3/4" Gewindemuffe</b>
Abmessungen (LxBxH)	34x26x37 cm
Wandstärke	0,45 cm
Deckeldurchmesser	15 cm
Auslass-Gewindemuffe-Größe	3/4"
Volumen	25 l
Gewicht	3 kg
Material	MDPE
Artikelnummer	25TN-NA-6-UD-VE

Als Probenahme-Möglichkeit wurde ein Kugelauslaufventil aus verchromten Messing der Firma „OBI GmbH & Co. Deutschland KG“ (ArtNr.: 1739085) mithilfe von abdichtendem Teflon-Band an die integrierte Gewindemuffe des Tanks geschraubt. Der im Hahn enthaltene Perlator wurde dabei manuell entfernt, um eine repräsentative Probenahme, bei der auch feste Biomasse ungehindert aufgenommen wird, sicherzustellen.

Bei dem verbauten Pumpensystem handelt es sich um die Heizungs-Umwälzpumpe „Lowara ecocirc L+ 32-8/180“ der Firma „Xylem Water Solutions Deutschland GmbH“ (ArtNr.: 60B0L1041). Vorteilhaft ist diese Pumpe aufgrund der einfachen Steuerbarkeit über den Einstellknopf sowie hinsichtlich der Möglichkeit der schnellen Demontage im verbauten Zustand für Instandhaltungs-Zwecke (Abbildung 10). Die umwälzende Funktionsweise ist von hoher Bedeutung für die milde „Mediums-Bearbeitung“, welche von Nöten ist, um möglichst wenig mechanischen Stress auf die Mikroalgen auszuüben. Der Einfluss der Schereinwirkung durch die Pumpe auf das Biomasse-Wachstum ist in Folgeprojekten experimentell zu bestimmen. Insgesamt drei verschiedene Pumpgeschwindigkeiten können manuell eingestellt werden, die einen jeweils sehr konstanten Volumenstrom erzeugen, was zwingend erforderlich für die angestrebte Reproduzierbarkeit von bestimmten Parameterkonfigurationen ist. Der genutzte „ecocirc“-Pumpentyp von „xylem“ wurde ausdrücklich für die energieeffiziente Zirkulation von Heizmedien konzipiert und findet vor allem in der Haustechnik Anwendung. Aufgrund der vorhandenen Expertise der Firma auf diesem Gebiet sowie der Anschlusskompatibilität der Pumpe, wurde letztendlich diese Kaufentscheidung gewählt. Tabelle 4 listet die technischen Daten der Pumpe auf.

*Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Pumpe mit Artikelnummer*

<b>Produktbeschreibung nach Hersteller</b>	<b>Xylem Lowara ecocirc L+ 32-8/180</b>
Abmessungen (LxBxT)	18x9x13,2 cm
Stromaufnahme	Max. 60 W
Max. Förderhöhe	8 m
Anschluss	2"
Förderkörper-Material	Grauguss
Artikelnummer	60B0L1041

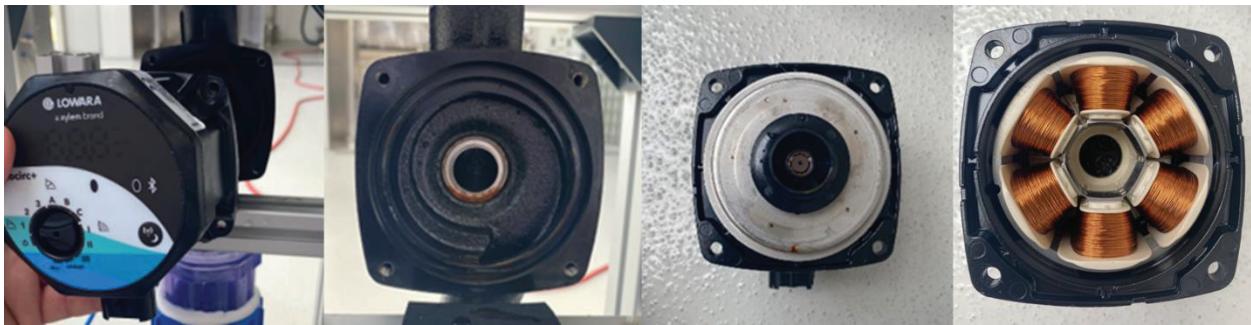


Abbildung 10: Pumpen-Demontage für Wartungszwecke durch Entfernen der vier Sechskant-Schrauben (Eigene Aufnahmen)

Um die Pumpe und den Vorlaufbehälter mit dem Rohrsystem zu kombinieren, war ein Verbindungselement-Baukastensystem nötig, das sich durch eine hohe individuelle Freiheit und Flexibilität auszeichnet. Dabei stand nur begrenzt Raum zur Verfügung und erforderliche Bauteile mussten sich möglichst problemlos der vorhandenen Gestell-Struktur fügen können. Das hierfür genutzte System stammt von der Firma „HT CONNECT GmbH & Co. KG“ und entsprechende Käufe wurden online über die zugehörige Webpräsenz „pvc-welt.de“ abgewickelt. Das Sortiment besteht aus einer breiten Masse unterschiedlich großer Kunststoff-Elemente verschiedenster Art, wie Rohre, Krümmer oder anderen Fittings, welche durch Klebemuffen miteinander untrennbar verbunden werden können. Es bietet dadurch die Option des beliebigen Eigenbaus und ist daher angesichts unzählbarer Kombinationsmöglichkeiten perfekt für diese Arbeit geeignet. Bauteile dieses Systems bestanden aus durchsichtigem PVC und wurden mithilfe einer Metallsäge nach Bedarf angepasst und verbaut. Durch die Lichtdurchlässigkeit wurde der Reaktor um weitere photosynthetische Fläche erweitert, sodass das Biomassewachstum begünstigt wird. Zudem kann während des Betriebs, aufgrund der guten Einsehbarkeit, eine optische Begutachtung des Volumenstroms im PBR vorgenommen werden. Verwendete Bauteile sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Verwendete Rohrleitungs-Bauteile der Firma „HT CONNECT“ mit Artikelnummern

Bauteilbeschreibung	ArtNr.
PVC-U Rohr transparent 63 x 4,0mm - PN 14	AT0063
PVC-U Gewindemuffe Transparent, Klebemuffe x Innengewinde 63 x 2"	AT0102.063.063
PVC-U Winkel 90° Transparent, 2fach Klebemuffe 63mm	AT0403.000.063
PVC-U T-Stück 90° Transparent, 3fach Klebemuffe 63mm	AT0502.000.063
PVC-U Tankdurchführung Klebemuffe x Klebemuffe/Aussengewinde	AF0820
PVC-U Tankdurchführung Klebemuffe/-stutzen x Klebemuffe/Aussengewinde	AF0821
PVC-U Kugelhahn ohne Überwurf 2fach Klebemuffe 63mm	AK0900.000.063

PVC-Welt.de PVC-U Kleber	AZ0HTC.KLE
PVC-U Elektrodenhalter transparent 2fach Klebemuffe 63mm	AK0310.000.063
Tankdurchführung Aussengewinde x Winkelschlauchtülle	PF0825
Impfventil 1/2" x für Schlauch 12mm	AK0310.020.010
Elektrodenhalter Aussengewinde 1/2" x 12mm	AK0310.020.012
Endkappe Aussengewinde PP Schwarz 1/2"	PF0817.000.020

Für die Realisierung der Rohrstrecken-Zusammensetzung, wurde ein ähnlicher Rohrdurchmesser (63 mm) wie der des „Schott-Systems“ (65 mm) gewählt, damit es eine nur minimale Diskrepanz abzudichten gilt. Genutzt wurden dafür der Kupplungsmechanismus von „Schott“, welcher sich aufgrund seiner Handlichkeit und Erprobtheit während der Bauplanung anbot und eine etwa einen Millimeter dicke Ummantelungs-Schicht Gaffer Tape, um die verbleibende Distanz zu überbrücken. Der einzugliedernde Tank sowie die Pumpe wurden mithilfe von mit Klebemuffen ausgestatteten Tankdurchführungen (ArtNr.: AF0820 und AF0821) und Gewindenüssen (ArtNr.: AT0102.063.063) an das Rohrsystem gekoppelt, sodass eine geschlossene Strecke eines Kreislaufes entsteht. Alle vorhandenen Klebemuffen wurden mithilfe des empfohlenen PVC-U Klebers (ArtNr.: AZ0HTC.KLE) mit den zugesägten Rohrstücken (ArtNr.: AT0063) verklebt.

Integriert wurde desweiteren eine Elektrodenstation (ArtNr.: AK0310.000.063), die für die Installation von Messsonden zur System-Überwachung sowie für die Einspeisung von Medien, wie Gasen oder Nährstofflösungen, genutzt werden kann. Die umfangreiche Prozesskontroll-Möglichkeit ist eine der wesentlichen Bestandteile der zu erstellenden Anlage, da sie das wissenschaftliche Arbeiten an ihr ermöglicht. Daher war eine lokale Position von Nöten, an der Sonden möglichst homogene Stoffströme erfassen können, ohne dabei durch eventuelle Turbulenzen oder Eingasungen beeinträchtigt zu werden. Die Position unmittelbar nach der Pumpenleistung und vor dem unteren Glasröhren-Eingang stellt einen strategisch wichtigen Punkt dar, da hier einerseits eine hohe Homogenität besteht und andererseits ein äußerst günstiger Punkt für die Gas-Einspeisung vorliegt. Denn hier kann sich vom Volumenstrom mitgerissen Gas den gesamten Weg hoch durch die Röhren bahnen und so für eine intensive CO<sub>2</sub>-Versorgung der Biomasse sorgen. Wichtig zu beachten ist dabei, dass die Begasung immer am Linken der drei Elektrodenstations-Zugänge durchgeführt wird, um Messsonden, welche rechts davon installiert werden, nicht durch Blasenablagerungen zu irritieren.

Großer Vorteil der Messstation ist ihre beliebige Bestückungs-Fähigkeit. Die drei Zugänge können je nach Bedarf mit jeglicher Art Ventilen, Elektrodenhaltern oder anderen Bauteilen

eingerichtet werden, welche einen 1/2"-Außengewinde-Anschluss aufweisen. Denkbar sind daher vielerlei Prozess-Konfigurationen. Entsprechende Anschlüsse wurden in Form von Impfventilen (ArtNr.: AK0310.020.010) und Elektrodenhaltern (ArtNr.: AK0310.020.012) sowie Endkappen (ArtNr.: PF0817.000.020) bereitgestellt. Über das Impfventil kann ein Gummischlauch befestigt werden, der beliebige Medien in das System transportiert. Durch ein integriertes Rückschlagventil, kann dabei kein Reaktorvolumen durch den Zugang austreten, was zwingend erforderlich ist, um die Geschlossenheit der Anlage zu wahren. Die Elektrodenhalter stellen Zugangsadapter für Messsonden dar. Sollten bestimmte Zugänge ggf. nicht benötigt werden, können optional die Endkappen auf betreffende Einlässe geschraubt werden. Um eine möglichst vollumfängliche Messwertdokumentation möglich zu machen, wurden an der vorderen Tankseite zwei weitere Zugänge für Elektrodenhalter gesetzt, die nach Bedarf genutzt werden können. Verwendet wurden hierfür 1/2"-Regentonnendurchführungen aus Messing der Firma „KDM Dynamics“ (ArtNr.: B0862DPXSF), welche unter dem Markennamen „Shyne Premium“ geführt und über das Handelsportal „Amazon“ bestellt werden konnten. Die simple Montiermethodik machte dieses Bauteil zu einer geeigneten Lösung. Die Ernte gewachsener Biomasse kann über einen verbauten Kugelhahn von „HT CONNECT“ (ArtNr.: AK0900.000.063) am untersten Ende des Reaktors bewerkstelligt werden.

Um den Aufbau eines internen Systemdrucks zu verhindern und sich im Vorlaufbehälter ansammelndes Gas zu entfernen, wurde eine zweifache Entgasung am Tankdach verbaut. Bei der ersten Methode handelt es sich um eine einfache Wasserfalle, welche das Gas über eine Tankdurchführung mit angeschlossenem Schlauch (ArtNr.: PF0825) sofort in ein Wassergefäß leitet, wo es anschließend ausgasen kann. So bleibt das System von der Außenumgebung abgeschottet und eine andauernde Kontamination mit Raumluft wird verhindert. Die zweite Option basiert auf einem Überdruckventil der Firma „contorion GmbH“ (ArtNr.: 95668414), welches bei 0,2 bar auslöst und so überschüssige Luft aus dem Reaktor entlässt. Dies stellt eine zusätzliche Alternative der Entgasung dar und ist vor allem dann von Relevanz, sollte das erste Verfahren nicht funktionieren oder anderweitig genutzt werden.

Die letzte bauliche Einrichtung stellt die Lichtzufuhr dar. Diese wurde vom betreuenden Professor Herrn Dr. Sandmann zur Verfügung gestellt und beruht auf der Nutzung von LED-Leisten sowie einer Intensitäts-Steuereinheit. Die Installation erfolgte im Anschluss an diese Arbeit.

## 3.2 Bau des Reaktors

### 3.2.1 Konstruktionsverlauf

Der Bau startete mit der Konstruktion des „MiniTec“-Gestells. Für die Verknüpfung der Verbindungselemente, wie Montagewinkel, Traversen oder Verspannelemente, wurden zwei unterschiedlich große Schrauben verwendet. Wie Tabelle 1 zu entnehmen, werden für Streben des 30x30-Profiles M06-Schrauben und für das 45x45-Profil M08-Schrauben genutzt. Es ist notwendig diese Kompatibilität zu beachten, da der Einbau in umgekehrte Reihenfolge nicht möglich ist. Für die sichere Verschraubung wurde für M06 ein 40er- und für M08 ein 50er-Inbusschlüssel verwendet. Abbildung 11 zeigt die ersten Schritte zu Beginn der Konstruktionsphase.



Abbildung 11: Erste Schritte der Gestell-Konstruktion (Eigene Aufnahmen)

Um eine geeignete Stabilität zu gewährleisten, wurden die unteren langen Streben oberhalb der kreuzenden Querträger angebracht. Die später aufmontierte Gewichtslast wirkt so nicht zwischen den Querträgern und belastet somit die tragenden Traversen erheblich, sondern wirkt auf die Querstreben drauf, was die Traglast gleichmäßiger auf die fünf unverbauten Rollen umlagert (ersichtlich in Abbildung 11, rechts).

Für die Röhrenauflageflächen wurden je acht kurze MiniTec-Profile mit Montagewinkeln an eine Außenstrebe und eine in den Rahmen verbaute Mittelstrebe angebracht. Die aufgelegten Gummierungen dämpfen die später installierten Glasröhren und stellen so einen Bruchschutz dar. Im nächsten Schritt wurden je zwei zusammengehörige Auflageflächen mithilfe einer Wasserwaage passend ausgerichtet (Abbildung 12, links und mittig links). Dabei war ein geeigneter Abstand zwischen den Auflagen zu wählen, damit das Röhrensystem letzten Endes die gesamte verfügbare Rahmenfläche in der Höhe ausnutzt und die letzte obere Glasröhre geeignet in den Vorlaufbehälter eingeführt werden kann (Abbildung 12, rechts). Die blaue Kupplung des Schott-Röhrensystems wurde zur Montage zunächst über das Ende einer Röhre bis zum Anschlag durch Drehbewegungen übergestülpt. Danach wurde ein U-Stück in die andere Öffnung der Kupplung in gleicher Weise eingeführt und beide Hartplastik-Ringe

anschließend mit der Hand leicht angezogen. Die innere Profil-Form der blauen Hartplastik-Ringe ist so gestaltet, dass sie durch die untere Gummischicht nur in eine Richtung drehbar sind. Werden beide Ringe in die jeweilige Richtung gedreht, wird ansteigend Druck auf die Gummischicht ausgeübt, sodass eine dichte Verbindung entsteht. Wichtig ist die Einführung der Röhren bis zum maximalen Anschlag (Abbildung 13).



Abbildung 12: Vorbereitung und Installation des Glasröhren-Systems auf dem Gestell (Eigene Aufnahmen)



Abbildung 13: Vollständig eingeführte Röhre und Drehrichtung zum Festziehen der blauen Schott-Kupplungen (Eigene Aufnahme)

Um die Röhren auf dem Gestell fest zu fixieren, bedurfte es einer Blockierung, damit sich die Röhren bei Erschütterungen sowie im Betrieb nicht bewegen. Das genutzte Gummi-Puffer-System wurde mithilfe des integrierten Gewindes vollständig auf längere Schrauben gedreht und dann jeweils bis zum Röhrenkontakt auf die kurzen MiniTec-Profile montiert (Abbildung 14, links).

Desweiteren wurde die Versiegelung des Tankzugangs für die Probenahme-Möglichkeit mithilfe eines Bohrers geöffnet und mit Schleifpapier anschließend weitgehend ausgeschliffen. Dies wäre im verbauten Zustand nur schwer gefahrlos möglich gewesen (Abbildung 14, mittig und rechts).



Abbildung 14: Installierte Röhrenfixierung mithilfe der Gummi-Puffer; Öffnung der Zugangs-Versiegelung am Tank und angebrachter Probenahme-Hahn (v.l.n.r.) (Eigene Aufnahmen)

Für die funktionstüchtige Eingliederung des Tanks in das PBR-System mussten einige Änderungen vorgenommen werden. Nachdem ein haltgebendes, genau angepasstes Gerüst aus MiniTec-Bauteilen geschaffen wurde (Abbildung 15, links), konnten zwei Zugänge für den Röhrenanschluss gebohrt werden. Durchgeführt wurde dies mit einer Lochsägen-Bohrkrone der Firma „ITOOLFIRM“ (ArtNr.: REDHS-75MM-HZXY) mit einem Durchmesser von 75 mm. Die verwendeten Tankdurchführungen sind so konzipiert, dass man eine Überwurfmutter vom Gewinde abschraubt, dann die Durchführung durch das Loch steckt und anschließend eine Gummidichtung sowie die Überwurfmutter wieder von der anderen Seite auf das Außengewinde schraubt. Durch die zwei so aneinander gepressten, breiten Gummiringe entsteht ein dichter Durchgang und beide Seiten sind nun, wie in Abbildung 15 (mittig links und mittig rechts) ersichtlich, über eine Klebemuffe erreichbar, sodass dort das entsprechende PVC-Röhrensystem angebracht werden kann. Am Tankdach sowie an der Tankwand wurden weitere Installationen vorgenommen. Die Tankwand wurde mit zwei Messsonden-Zugängen ausgestattet (Abbildung 16). Für die Bohrung genutzt wurde hier ein Schlangenbohrer der Firma „Inrodius Solutions GmbH“ (ArtNr.: 62978) mit einem Durchmesser von 25 mm. Da für den Zugang ein Loch der Größe von 26,44 mm benötigt wurde, mussten anschließend noch erweiternde Schleifarbeiten durchgeführt werden.

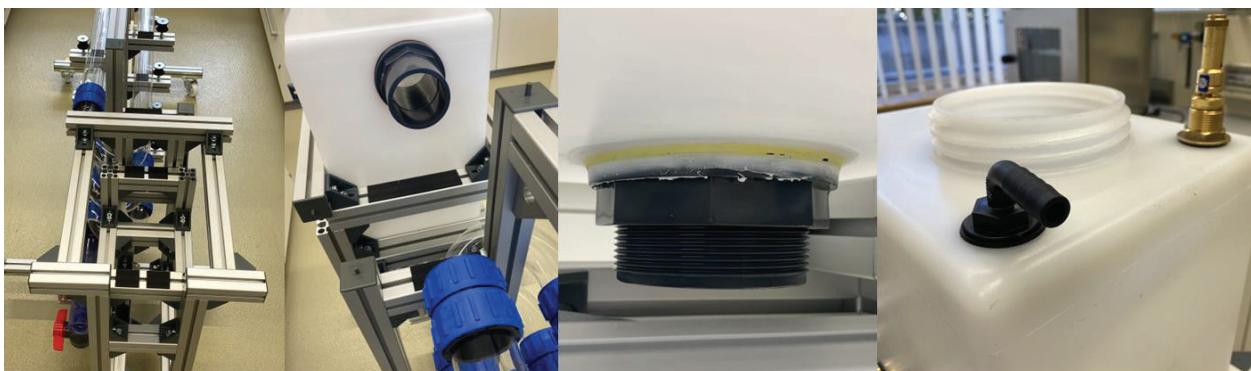


Abbildung 15: Anpassung des Gestells und angebrachte Installationen am Vorlaufbehälter (Eigene Aufnahmen)



Abbildung 16: Installations-Reihenfolge der Tankdurchführungen für Messsonden und Überdruckventil (Eigene Aufnahmen)

Die gezeigten kleinen Tankdurchführungen sind kompatibel mit jedem Bauteil, welches ein 1/2"-Außengewinde besitzt. Hierfür zur Verfügung bereitgestellt wurden Impfventile, Elektrodenhalter sowie Endkappen. Für eine dichte Verschraubung ist ein beiliegender Gummi-Dichtungsring essenziell.

Am Tankdach wurden die Systeme für die Entgasung installiert (Abbildung 15, rechts). Hierfür eingesetzt wurde die in Abbildung 16 gezeigte Anbringungstechnik. Zu erwähnen ist, dass für die Einschraubung des Überdruckventils die Nutzung von Teflon-Band wegweisend ist. Ohne diese extra abdichtende Schicht, kann es zu Durchlässigkeiten kommen, wodurch das Bauteil seine Funktion verliert.

Um den nun eingegliederten Vorlaufbehälter an die restliche Struktur anzuschließen, wurden mehrere PVC-U-Rohrstrecken mithilfe des Rohr-Baukastens von „HT CONNECT“ konstruiert, die optimal an die geforderten Maße angepasst sind. Das System basiert auf einem Klebemuffen-Mechanismus, mit welchem Rohre in Form von Stiften in Verbindungselementen geklebt werden. Für diesen Zweck war es notwendig sämtliche Rohrstücke und andere Bauteile, wie beispielhaft in Abbildung 18 gezeigt, mit einer Metallsäge auf Länge zu sägen und anschließend mittels Doppelschleifer konisch zuzuschleifen (Abbildung 17).

PVC-Strecken mussten sowohl vom oberen Glasröhren-Ausgang zum oberen Vorlaufbehälter-Eingang, vom unteren Vorlaufbehälter-Ausgang zum oberen 2"-Pumpanschluss sowie vom unteren 2"-Pumpanschluss über die Messstation zum unteren Glasröhren-Eingang konstruiert werden.



Abbildung 17: Stift-Herstellungsprozess für die Röhrenstrecken-Konstruktion (Eigene Aufnahmen)



Abbildung 18: Bauteil-Anpassungen, um platz einschränkenden Gegebenheiten gerecht zu werden (Eigene Aufnahmen)

Durch die konische Anschrägung gleitet das Bauteil weiter in die Muffe und verdichtet den Spezialkleber am Ende zu einer undurchdringlichen Schicht. Dadurch entsteht eine feste Verbindung, durch die Medien mit hohen Drücken gepumpt werden können, ohne dass es Bedenken bezüglich der Systemsicherheit gibt. In Abbildung 19 ist der Verklebungsprozess beispielhaft veranschaulicht. Zunächst wird der zurecht gesägte und geschliffene Stift trocken gesäubert, um eine glatte Klebefläche bereitzustellen. Dann wird mithilfe des im Klebergefäß enthaltenen Pinsels eine großzügige Menge Kleber auf der relevanten Fläche, mitsamt der Anschrägung, verteilt. Anschließend wird der Stift gezielt und mit Bedacht in die Klebemuffe des jeweiligen Elements gepresst, wobei für mehrere Minuten ein konstant hoher Druck erzeugt werden muss. Nachdem das Bauteil für eine Stunde an der Luft getrocknet ist, kann es weiterverarbeitet werden.



Abbildung 19: Prozess der Stift-Verklebung mit einer Klebemuffe (Eigene Aufnahmen)

Da es eine 2mm-Diskrepanz zwischen dem Glas-Röhrensystem und den PVC-Rohren zu verdichten galt, wurde Gaffer Tape verwendet. Wie in Abbildung 20 verdeutlicht, wurde ein dafür verwandelter Stift nur auf einer Seite mittels Doppelschleifer angeschrägt und auf der anderen mit Gaffer Tape acht mal straff umwickelt, sodass eine glatte Fläche entsteht. Durch die so erzeugte Verdickung des Rohrdurchmessers, passt ein solches Stiftende nun ideal in eine Kupplung des Glas-Röhrensystems und kann mithilfe eines Hakenschlüssels festgezogen werden. Das andere angeschrägte Ende stellt einen Klebemuffen-Zugang dar, der den Rohrdurchmesser von 65 auf 63 mm verjüngt (Abbildung 20, rechts).

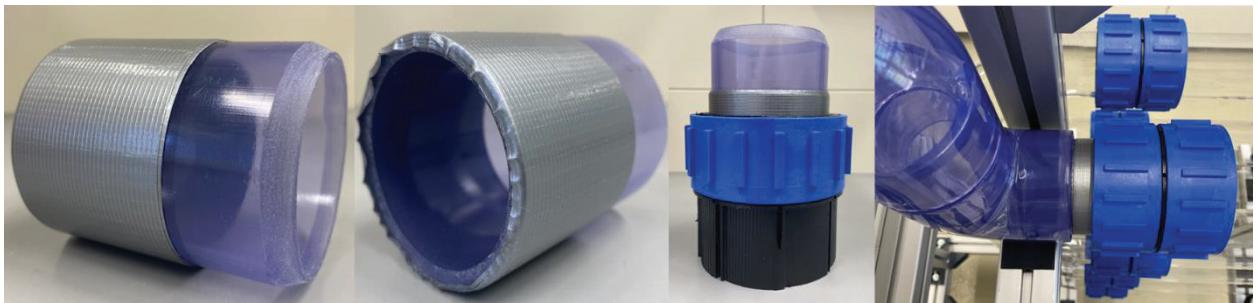


Abbildung 20: Verdickung des Rohrdurchmessers mit Gaffer Tape (Eigene Aufnahmen)

Auf diese Weise hergestellte Bauteile (Abbildung 20, mittig rechts) wurden in vierfacher Ausführung in der Anlage verbaut. Von Bedarf waren Diese jeweils immer dann, wenn die blauen Schott-Kupplungen ( $\varnothing = 65 \text{ mm}$ ) in das PVC-Rohrsystem ( $\varnothing = 63 \text{ mm}$ ) eingegliedert werden sollten. Dies war je einmal an den Glasrohrenden und je einmal an beiden Pumpanschlüssen der Fall. Die Pumpe kann durch den Einbau zweier Kupplungen wahlweise ausgebaut werden, um eine komfortable Wartung zu ermöglichen (Abbildung 21, rechts).

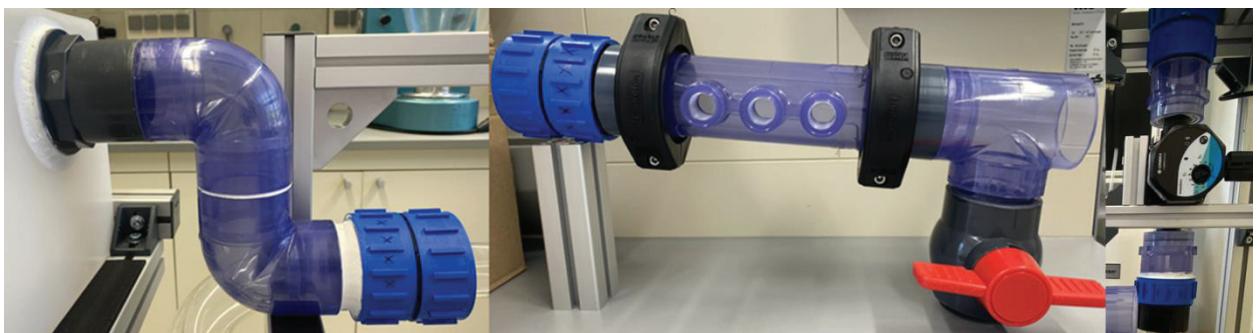


Abbildung 21: Eingebaute Rohrdurchmesser-Verjüngungen mithilfe der Schott-Kupplungen (Eigene Aufnahmen)

Abbildung 21 zeigt links die Kombination zweier 90-Grad-Stücke. Durch den so erhaltenen künstlichen Anstieg wurde eine zusätzliche Wassersäule integriert, welche bei Reaktorbefüllung zunächst überwunden werden muss. So wird erreicht, dass sich die Glasröhren erst vollständig füllen müssen, damit der Kreislauf fortgesetzt wird und der Rohrquerschnitt gänzlich ausgenutzt. Das mittlere Bauteil in Abbildung 21 stellt die Messstation dar, an welchem linken Ende der untere Eingang in das Glasröhrensystem erfolgt und rechten Ende sich das Ernteventil befindet.



Abbildung 22: Anschlussoptionen für die Messstation bzw. Zugangs-Batterie (Eigene Aufnahmen)

Die verschiedenen Anschlussmöglichkeiten der Zugangs-Batterie sind in Abbildung 22 beispielhaft veranschaulicht. Zahlreiche Kombinationen sind denkbar. Durch die Montage der Messstation, der Pumpstrecke sowie der Tankschlüsse, gab es eine nur noch kleine offene Strecke, welche es zu verbinden galt. In Abbildung 23 wird die endgültige Schließung des Systems gezeigt. Genutzte Bauteile wurden in Reihe nacheinander verklebt, sodass der Kreislauf des Systems vollständig ist.



Abbildung 23: Vollständige Schließung des Kreislaufes (Eigene Aufnahme)

Der nun einsatzbereite Reaktor wurde in der Folge eingehend auf seine Funktionstüchtigkeit hin untersucht (Abbildung 24).

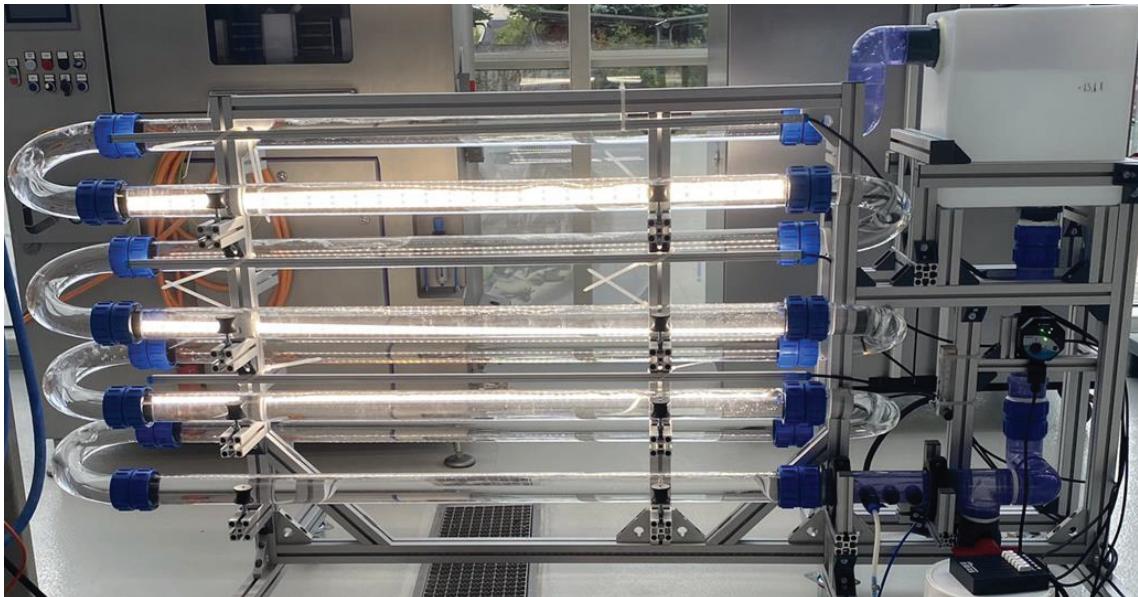


Abbildung 24: Vollständige Anlage nach Fertigstellung aller baulichen Maßnahmen (Eigene Aufnahme)

### 3.2.2 Fehlerbetrachtung und Anregungen

Generell kann gesagt werden, dass es möglich war ein funktionstüchtiges System zu konstruieren. Während des Baus gab es mehrere Auffälligkeiten, die entweder ein besonderes Gelingen verdeutlichten oder andererseits in optimierungswürdigen Ideen mündeten. Um einen Überblick zu bieten, werden im Folgenden erfolgreiche Anwendungen sowie

Verbesserungsansätze bzw. potenzielle Fehlerquellen in Bezug auf genutzte Bauteil-Lösungen und Konstruktionsverfahren evaluierend dargelegt.

Besonders hervorzuheben ist die regelmäßige Video-Dokumentation, die während der Arbeit am Reaktor angewendet wurde. Aufgrund der zeitaufwendigen Planungs- und Konstruktionsphasen konnten genutzte Verfahrensschritte im Nachgang genau nachempfunden bzw. analysiert werden. Konstruktionsfehler oder andere Unstimmigkeiten waren eindeutig detektier- und identifizierbar, was einen elementaren Mehrwert darstellt. Auch eine genaue methodische Beschreibung wurde so ermöglicht, was sich positiv auf die Reproduzierbarkeit bestimmter Verfahren auswirkt, sodass der Video-Dokumentation allgemein eine Verbesserung des wissenschaftlichen Arbeitens attestiert werden kann.

Ebenfalls weitgehend vorteilhaft sind die drei genutzten Baukasten-Systeme der Firmen „Schott“ (Glas-Röhrensystem), „MiniTec“ (Gestellsystem) und „HT CONNECT“ (PVC-Röhrensystem), welche sich alle durch eine außergewöhnliche Zugänglichkeit und Leistungsfähigkeit auszeichneten. Die Systeme waren für den Zweck und die Skalierung dieser Arbeit in höchstem Maße geeignet und werden daher für den weiteren Gebrauch in Form von Folgeprojekten oder Ähnlichem grundsätzlich weiterempfohlen. Optimierungspotential besteht bei der sicheren, dichten Verbindung der zwei unterschiedlichen Rohrdurchmesser des „Schott“- sowie PVC-Systems. Hier könnte im Zuge einer umfangreichen Recherche unter Umständen eine geeigneter Verknüpfungs-Lösung gefunden werden. Der derzeitige Ansatz basiert auf der Nutzung von „Schott“-Kupplungen und der PVC-Rohrdurchmesser-Verdickung durch Gaffer Tape.

In besonderer Weise hilfreich war das breite, in sich kompatible Sortiment von „HT CONNECT“, welches vielfältige Lösungen für diverse Probleme bot. Hierfür kann die Messstation beispielhaft herausgestellt werden, die in dieser Arbeit als Sonden-Batterie und als Gaszugang dient. Es lohnt sich daher bei kleinerem Bauteilbedarf zunächst auf der Webpräsenz „pvc-welt.de“ zu recherchieren. Ein weiterer Hinweis betrifft das Zusägen der Rohre und Bauteile des Herstellers. In dieser Arbeit wurde mit einer Metallsäge für das Zuschneiden gearbeitet. Im Verfahren musste ein hohes Maß an Kraft aufgewendet werden, um einen sauberen Schnitt umzusetzen. Deutlich mehr würde sich für diesen Zweck eine Tischkreissäge anbieten, die einen höherwertigen Vorgang mit präziserem Endergebnis bietet.

Der eingesetzte Vorlaufbehälter der Firma „Tanks Direkt“ sticht durch seine glatten Seiten und hohen Wandstärke heraus, wodurch sehr stabile Durchführungen gelegt werden konnten. Er

weist desweiteren die Möglichkeit der Hahnmontage auf und kann über den Deckel mit Entlüftung vollständig geschlossen werden. Die Variabilität der in dem Online-Katalog verfügbaren Tankkonfigurationen sowie die gute Bearbeitungsfähigkeit des Materials ohne Stabilitätsverlust machten diese Lösung einzigartig auf dem Markt dieser Preisklasse. Auch die angebrachten Tankdurchführungen sind aufgrund der einfachen Anbringungstechnik

Die verbaute Pumpe ist in Größe und Leistungsfähigkeit passend skaliert und weist zudem die Möglichkeit der Wireless-Steuerung über Bluetooth auf. Technische Daten des Systems wurden unter 3.3.1 experimentell bestimmt. Der 2"-Außengewinde-Anschluss der Pumpe war durch die Verwendung des Innengewinde/Klebemuffe-Bauteils von „pvc-welt.de“ (ArtNr.: AT0102.063.063) komfortabel an das PVC-Rohrsystem anzuschließen. Zwingend dafür erforderlich ist auch hier die Nutzung von abdichtendem Teflon-Band für das Einschrauben des Pumpen-Außengewindes. Ohne das großzügige Aufbinden entsteht eine durchlässige Verbindung und der Reaktor droht an dieser vakanten Stelle Volumen zu verlieren.

Während der Konstruktionsphase offenbarte die kontinuierliche Recherche einige Marktalternativen, welche den Eindruck eines besseren Kosten-Nutzen-Verhältnisses im Vergleich zu genutzten Bauteilen suggerierten. Zu nennen sind hier die Röhrenauflagen und Röhrenfixierungen. Für die Auflageflächen der Glasröhren wurden jeweils kurze „MiniTec“-Profile sowie Montagewinkel mit zugehörigen Verbindungselementen und Auflagegummierungen verwendet. Dies stellt einen erheblichen Materialaufwand dar und könnte möglicherweise mithilfe der Nutzung von Schraub-Rohrschellen mit Gummieinlagen (Bsp.: ArtNr.: EZ0002.060.064 von „pvc-welt.de“) gewinnbringend optimiert werden. Auch die Aufgabe der Rohrfixierung würde durch die Verwendung von Rohrschellen übernommen werden, was eine weitere Einsparung von Materialien bedeuten würde. Eine Umrüstung des Systems ist aufgrund der Möglichkeit des vollständigen Abbaus genutzter Glasröhren sowie „MiniTec“-Auflageprofile problemlos möglich. Es bleibt abzuwegen, ob eine ausreichende Stabilität mit dieser Marktalternative gewährleistet werden kann. Für diesen Fall zu berücksichtigen wären das Röhren-Eigengewicht, das Gewicht des strömenden Mediums, mögliche Erschütterungen durch den Transport oder hoher Begasung sowie die personelle Kraftaufwendung bei der Demontage oder Montage jeweiliger Glasröhren.

Ein kurzer Hinweis betrifft die Verwendung von Sanitärsilikon für die Füllung kritischer Fugen. Dem Anschein nach war die Nutzung nicht zwingend notwendig, da relevante Bauteile bereits dicht genug waren und es keiner zusätzlichen Dichtungsschicht bedurfte. Zudem wurde

beobachtet, dass sich das Silikon im Verlauf der Arbeit am Reaktor an den meisten Stellen löste, wodurch die Eignung weiterhin entwertet wurde.

Eine weitere kritische Konstruktionsauffälligkeit bezieht sich auf die untere Tankdurchführung am Vorlaufbehälter (ArtNr.: AF0820 von „pvc-welt.de“). Durch die sich am Behälterboden befindliche, große Bauteilmutter wird ein geringfügiger Totraum im Tank erzeugt, da der kreislaufwirksame Durchgang so künstlich in die Höhe geschoben wird. Bei vollständiger Entleerung des Systems bleibt demnach ein restlicher Füllstand im Behälterboden zurück, der einerseits für die Ernte nicht erreichbar ist und andererseits während des Betriebs nicht von der Pumpe adäquat erfasst werden kann, wodurch die Gefahr einer unzureichenden Durchmischung besteht. Eine Variante mit flachem Auslauf würde dieses Problem lösen, ist aber auf dem Materialmarkt derzeit nicht mit einseitiger Klebemuffe verfügbar. Ein weiterer Ansatz wäre es, die Höhe der Bauteilmutter mithilfe eines kleineren Exzenterschleifers zu reduzieren.

Des Weiteren kann auf die Option verwiesen werden, dass der Reaktor um mindestens zwei Glaskörpern erweitert werden kann, was sein Füllvolumen erhöht. Begrenzende Faktoren sind der zur Verfügung stehende Platz für Anpassungen und die Stabilität des Systems.

Bei der durchgeföhrten mehr tägigen Wasserfahrt wurde eine Leckage am unteren Glaskörper-Eingang observiert. Bei dem betroffenen Bauteil handelt es sich um das Verbindungselement von Kupplung zu Messstation. Die Komponente wurde speziell für den Zweck der Durchmesser-Verjüngung hergestellt und kann in Abbildung 20 (mittig rechts) begutachtet werden. Die verantwortlichen Gründe konnten im Verlauf der Arbeit nicht endgültig erfasst werden. Vermutlich steht die Undichtigkeit in Zusammenhang mit einem vorhandenen Riss in der Glaskörper oder einer Durchlässigkeit im Klebemuffen-Bereich. Die Anlage kann, analog zu Abbildung 25, bis zu dem relevanten Bauteil demontiert werden, um weitere Untersuchungen zu unternehmen. Es wurde weiterhin beobachtet, dass nach längerem Betrieb des Reaktors eine Verringerung der verlorenen Volumenmenge auftritt. Dies würde darauf hinweisen, dass sich mögliche verursachende Risse mit der Zeit mit Partikeln zusetzen und so geschlossen werden. Weitere Nachforschungen sollten hier eine Erklärung liefern können.

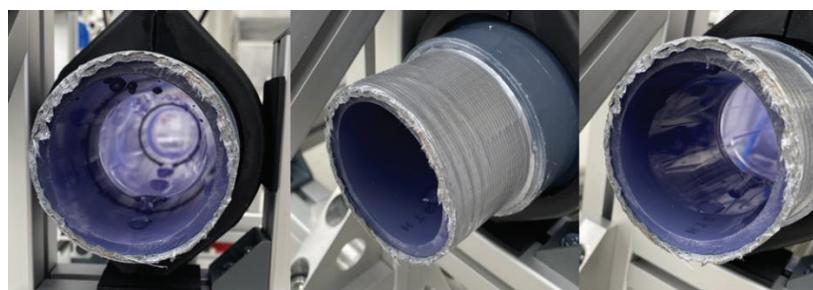


Abbildung 25: Abbau der Glaskörper bis zum für die Undichtigkeit verantwortlichen Bauteil (Eigene Aufnahmen)

### 3.2.3 Handhabungshinweise

Ein größeres Problem bei der Konstruktion des „MiniTec“-Gestells stellte die begrenzte Materialhärte der Schrauben dar. Wurde zu sehr angezogen, verformte sich der Innensechskant und die Schraube war nicht mehr brauchbar. Solche Schrauben mussten mithilfe eines Metallbohrers aufgebohrt werden, um sie zu ersetzen. Dem kann vorgebeugt werden, indem auf einen zu langen Inbushebel oder ein Werkzeug mit Ratsche verzichtet wird. Ein fingerlanger Inbus reicht für die Installation des Gestells aus und es ist weiterhin ratsam die Schrauben erst so spät wie möglich endgültig festzuziehen, um nach Bedarf ggf. Anpassungen vornehmen zu können. In der Regel reicht das vorläufige handfeste Festziehen der Schrauben aus, um eine ausreichende Konstruktionssicherheit zu gewährleisten.

Bei der Montage der Winkel für das Gestellsystem, ist es von Bedeutung die Schraube so weit oben wie möglich zu platzieren. Der Montagewinkel liegt somit so eng wie möglich an einer jeweiligen Profilstrebe an und bietet die maximale Sicherheit. Wird die Schraube im Installationsbereich zu weit unten angesetzt, steht der Winkel nach endgültigem Festziehen oben etwas von der Strebe ab und es wird nicht die maximal mögliche Stabilität erzeugt.

Sollen zwei Glaskörper miteinander verknüpft werden, müssen zunächst beide Gummi-Öffnungen einer Kupplung bis zum Anschlag über die jeweiligen Rohrenden gestülpt werden. (Abbildung 26). Durch das Einspritzen und Verteilen von Wasser, kann für diesen Zweck eine gleitende Oberfläche erzeugt werden, wodurch das Glasrohrende besser in die Kupplung rutscht. Danach werden beide blauen Hartplastik-Ringe, mithilfe zweier passender Hakenschlüssel, in entgegengesetzter Richtung handfest angezogen. Die richtige Festzieh-Richtung einer Kupplung kann Abbildung 13 entnommen werden. Das Anziehen ist mit äußerster Vorsicht durchzuführen, um keine zu große Scherkraft auf die Röhren auszuüben. Trotz einer ausdrücklich handfesten Befestigung ist der Kupplungsmechanismus ausreichend aktiv, um eine undurchlässige Verbindung herzustellen.



Abbildung 26: Überstülpen des Kupplungs-Gummis für die Verbindung zweier Glaskörper (schott.com, 2024)

Um eine Demontage des Systems durchzuführen, muss eine spezielle Reihenfolge beachtet werden. Zunächst wird die Kupplung an einem Glas-U-Stück nach Bedarf, mithilfe zweier Hakenschlüssel, vorsichtig gelöst. Nachdem die auf der anderen Seite befindliche Kupplung nach gleichem Prinzip lose gedreht wurde, kann das U-Stück samt Kupplungen langsam von den angedockten Glasröhren gezogen werden. Dabei ist es zu empfehlen, eine sehr leichte und gefühlvolle vertikale „Ruckel-Bewegung“ auszuüben. Danach besteht Zugriff auf die gewünschte Glasröhre. Soll ein umfänglicher Abbau des Systems mitsamt des Vorlaufbehälters und der Pumpe vollzogen werden, werden zunächst alle Glasröhren nach oben genanntem Verfahren entfernt. Dabei ist ein spiralenförmiger Abbau von oben nach unten zu empfehlen. Der nun an der Oberseite freiliegende Vorlaufbehälter, ist nun nur noch mit der oberen Pumpkupplung befestigt. Nachdem der untere Hartplastik-Ring der oberhalb der Pumpe befindlichen Kupplung mit einem Hakenschlüssel gelöst wurde, kann der gesamte Vorlaufbehälter mitsamt seinen Anschlüssen aus dem Gestell gehoben werden. Auch hier ist eine leichte „Ruckel-Bewegung“ von Vorteil und es bietet sich an, diesen Vorgang mit einer weiteren Person durchzuführen, die die Pumpe, während des Anhebens des Vorlaufbehälters, stabilisiert und etwas nach unten drückt. Der Vorlaufbehälter kann zur Ablage auf seine einzige unbebaute Tankwand gelegt werden. Für die längere Lagerung sollte die konstruierte PVC-Rohrstrecke mit einem geeignete haltgebenden Träger stabilisiert werden. Die Pumpe ist desweiteren durch das Lösen des unteren Hartplastik-Rings der unterhalb der Pumpe befindlichen Kupplung ebenfalls ausbaubar. Schließlich kann auch die letzte übrig gebliebene PVC-Rohrstrecke mit der Messstation und dem Ernteventil, bei Bedarf, durch das Lösen der stützenden 30x30-MiniTec-Profil-Haltern aus dem System entfernt werden, wodurch nun alle Bauteile demontiert sind.

Im Verlauf der Pump-Testphase, wurde festgestellt, dass eine manuelle Steuerung, bei aktiver Bluetooth-Verbindung, nicht mehr funktioniert. Für dieses Problem musste ein spezieller Code eingegeben werden, durch welchen die Bluetooth-Verbindung getrennt wird. Der Drehknopf muss dafür zunächst bis zum Anschlag nach links, dann nach rechts und wieder nach links gedreht werden, während durchgängig die Verbindungstaste gedrückt gehalten wird.

Damit eine Reproduzierbarkeit der Reaktorversuche gewährleistet ist, muss die Befüllung des Systems möglichst gleich durchgeführt werden. Eine für diesen Zweck verlässliche Methode ist es, den Vorlaufbehälter fast vollständig zu füllen, dann die Pumpe für etwa drei Sekunden auf voller Stärke zu aktivieren und anschließend langsam auf die gewünschte Volumenmarke am Tank aufzufüllen. Das Wasser hat nun etwa eine Minute Zeit in sich zusammenzusacken,

indem noch unbelegte System-Lufträume allmählich geschlossen werden. Durch die feine Nachsteuerung am Probenahme- oder Ernteventil, kann der Füllstand schließlich endgültig angepasst werden.

Die Nutzung des Ernteventil bedarf besonderer Aufmerksamkeit. Das Öffnen (Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn) sollte immer mit beiden Händen durchgeführt werden, um eine gleichmäßige, nicht ruckartige, Drehbewegung anzuwenden. Durch eventuelle Ablagerungen an der Ventilinnenseite nach längerer Nicht-Nutzung, kann es zu einer situativen Verkantung des Drehhebels kommen. Dem muss mit einer äußerst gefühlvollen Kraftaufwendung begegnet werden, um das Ventil zu öffnen. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der konstruierten Strecke (Abbildung 23) um eine verklebte PVC-Verbindung handelt, welche übermäßigen Belastungen nur schwer standhält. Des Weiteren sollte der erwartbare Volumenstrom bei Betätigen des Ventils beachtet und eine geeignete Auffangmethodik vorbereitet werden.

Ein weiterer Hinweis betrifft die Anbringung der Messsonden sowie Gas-Zugänge. Wie in Abbildung 27 links gezeigt, müssen bei der Installation von Endkappen, Elektrodenhaltern und Impfventilen zwingend die schwarzen Gummidichtungen auf die Außengewinden gesteckt werden, damit eine dichte Verbindung entsteht. Mittig ist die adäquate Montierung einer Elektrode an einem Halter veranschaulicht. Die blaue Kappe wird von dem Bauteil abgeschraubt und auf die Elektrode gesteckt. Ein kleiner im dadurch geöffneten Bauteilgehäuse befindlicher Gummiring muss nun auf die Elektrode aufgezogen werden, wonach sie durch die Öffnung des Bauteils geschoben werden kann. Durch die Verschraubung des blauen Gewindes mit dem schwarzen Bauteil wird der Zugang verdichtet und der Elektrodenhalter kann in einen beliebigen Messsonden-Zugang installiert werden. Für die Nutzung der oberen Tankwandzugänge wird empfohlen, die Sonden geeignet zu stabilisieren, da eine eventuelle Hebelwirkung der langen Elektroden die Tankwand strapazieren und für eine Undichtigkeit der Tankdurchführungen sorgen könnten. Die Impfventile sind mit flexiblen Schläuchen kompatibel, die einen passenden Durchmesser aufweisen. Für die Installation wird die blaue Kappe abgeschraubt und der Schlauch auf die Tülle gesteckt. Die zuvor auf den Schlauch gezogene Kappe kann nun mit dem Gewinde verschraubt werden und das Impfventil in einen beliebigen Zugang eingefügt werden (Abbildung 27, rechts).



Abbildung 27: Installationshinweise zu den Endkappen, Elektrodenhaltern und Impfventilen (Eigene Aufnahmen)

### 3.3 Verfahrenstechnische Charakterisierung

#### 3.3.1 Technische Daten des Reaktor-Systems

Für die initiale Leistungsaufnahme des einsatzbereiten PBRs, wurde eine verfahrenstechnische Charakterisierung durchgeführt. Bestandteil Dieser waren die Erfassung wesentlicher Parameter, wie Anlagenabmessungen, Grundfläche, Reaktorvolumen, Rohrstreckenlänge, A/V-Verhältnis sowie Pumpencharakteristik.

Um die Dichtigkeit des Systems zu testen, wurde zunächst eine 12-tägige Wasserfahrt initiiert, an welchem Ende das Reaktorvolumen ausgelitert wurde. Dabei konnte ein Volumen von 63,6 l festgestellt werden. Eine Steigerung auf 70 l ist durch die vollständige Nutzung der Tankkapazität denkbar. Zur Bestimmung der Rohrstreckenlänge wurden die Längen aller verbauten Streckenbauteile addiert. Dabei handelt es sich um acht 1,4m-Glasröhren, sieben 0,55m-U-Stücke sowie einem etwa 0,8m langen PVC-Abschnitt. Insgesamt besitzt der PBR demnach eine Rohrlänge von 15,85 m. Für die Berechnung des A/V-Verhältnisses wurde die photosynthetische Reaktorfläche gedanklich in Einzelteile zerlegt. Relevant sind hierfür die Glasröhren sowie U-Stücke, wobei für die Röhren die Zylinder-Mantelfläche und für die U-Stücke die U-Mantelfläche ermittelt wurde. Die U-Mantelfläche beschreibt die Summe der Mantelflächen beider gerader Zylinderteile und der des gekrümmten Teils, der mathematisch einen Halbtorus darstellt und in Abbildung 28 geometrisch veranschaulicht wurde. Formel (1) wurde für die Berechnung der Gesamt-Außenfläche eines U-Stückes verwendet. Für die benötigten Maße wurden die Werte  $R = 0,1225 \text{ m}$ ,  $h = 0,045 \text{ m}$  und  $r = 0,0325 \text{ m}$  gemessen.

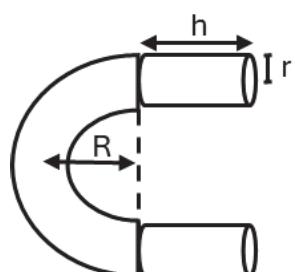


Abbildung 28: Relevante Maße zur Berechnung der Mantelfläche eines U-Stückes (Eigene Grafik)

Formel für die Mantelfläche eines U-Stückes (Halbtorus-Teils + zwei Zylinderteile):

$$A_{U-Stück} = (\pi^2 \cdot r \cdot R) + (2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h)) \quad (1)$$

Formel für die Mantelfläche aller zylindrischen Komponenten:

$$A_{Glasrohr} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (2)$$

Formel für die Gesamt-Außenfläche aller ausschlaggebenden Bauteile:

$$A = (8 \cdot A_{Glasrohr}) + (7 \cdot A_{U-Stück}) \quad (3)$$

$$A = (8 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,0325 \cdot 1,4)) + (7 \cdot ((\pi^2 \cdot 0,0325 \cdot 0,1225) + (4 \cdot \pi \cdot 0,0325 \cdot 0,045)))$$

$$A = 2,69m^2$$

Die errechnete Reaktor-Außenfläche (3), über welche aktiv Photosynthese betrieben werden kann, beträgt  $2,69 m^2$ . Ist der Reaktor mit 70 Litern ( $0,07 m^3$ ) gefüllt, resultiert daraus ein A/V-Verhältnis von  $38,42 m^2/m^3$ . Nach Posten 2009, kann dieser Wert in einen unteren, aber effektiven Bereich der Mikroalgen-Kultivierung eingeordnet werden. Übliche large-scale-size Röhren-PBRs erreichen demnach Werte von bis zu  $80 - 100 m^2/m^3$ . Eine Erhöhung des A/V-Verhältnisses kann also durch die Erweiterung von mehr Glasröhren erreicht werden. Berücksichtigt muss dabei allerdings werden, dass es sich bei dieser Arbeit um einen PBR in Technikums-Maßstab handelt, sodass der Wert im Verhältnis zur extrem kleinen Grundfläche betrachtet werden sollte. Für die Bestimmung der Grundfläche wurden alle Abmessungen der Anlage aufgenommen. Aus der Breite von  $0,8 m$  und der Länge von  $2,3 m$  ergibt sich die Grundfläche  $A = 1,84 m^2$ . Das Verhältnis aus dem A/V-Verhältnis und der Grundfläche beschreibt, wieviel Reaktor-Außenfläche pro Volumeneinheit auf einem  $m^2$  zur Verfügung steht. Der zugehörige Wert für die Anlage dieser Arbeit beträgt  $20,88 \frac{m^2/m^3}{m^2}$ . Um den konstruierten Reaktor in Hinblick auf dieses Maß mit einem der populärsten Systemen Deutschlands, dem Röhren-PBR in Klötze (Sachsen-Anhalt), zu vergleichen, wurde eine überschlägige Hochrechnung durchgeführt, die eine grobe Einordnung ermöglicht. Wie Acién et al. 2017 berichten, erstreckt sich das Röhrensystem dieser Anlage über eine Länge von  $500 km$  und ist auf einer Grundfläche von  $1,2 ha$ , also  $12000 m^2$ , verbaut. Das enthaltene Volumen kann dazu einen Wert von  $600 m^3$  erreichen. Für diese Hochrechnung wird angenommen, dass sich der Rohrquerschnitt, genau wie bei dem Reaktor dieser Arbeit, auf  $65 mm$  beläuft sowie dass die U-Stücke bereits in die Rohrstreckenlänge von  $500 km$  verrechnet sind.

Aus diesen Parametern ergibt sich ein Wert für die Außenfläche, nach (2), von 102101,76 m<sup>2</sup> und ein resultierendes A/V-Verhältnis von 170,17 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Um abschließend den Vergleichswert zu errechnen, muss nun noch durch die Grundfläche dividiert werden, wodurch ein Wert von  $0,014 \frac{m^2/m^3}{m^2}$  die Folge ist. Auffällig sind die grundsätzlich unterschiedlichen Skalierungen der beiden Maße (20,88 vs. 0,014), was auf die erhebliche Grundfläche sowie das signifikant höhere Reaktorvolumen des PBRs in Klötze zurückzuführen ist. Ob sich die von Acién et al. angeführte Bebauungsfläche tatsächlich auf die reine Reaktor-Grundfläche oder auf die gesamte Grundstücksfläche beziehen, ist nicht ersichtlich. Des Weiteren ist nicht gesichert, dass bei der Rohrstrecke von 500 km schon die U-Stücke mit inkludiert sind sowie dass es sich bei dem genutzten Rohrdurchmesser tatsächlich um 65 mm handelt, wodurch die Authentizität dieser Gegenüberstellung deutlich verringert wird. Durch den aber eindeutigen Dimensionsunterschied kann konstatiert werden, dass das in dieser Arbeit gebaute PBR-System die photosynthetische Fläche deutlich komprimierter zur Verfügung stellt als die Anlage in Klötze. Ein Gütemaß stellt das Verhältnis von A/V-Verhältnis zur Grundfläche nicht dar und dient lediglich der dimensionalen Einordnung zweier Systeme. Um weitere Leistungsvergleiche in Bezug auf die Grundfläche umzusetzen, ist eine Aufnahme des Biomasseertrags pro m<sup>2</sup> ratsam.

Um die vom Hersteller ausgewiesene Pumpcharakteristik zu untersuchen, wurde die Pumpe, unter Nutzung eines experimentellen Aufbaus (Abbildung 29), untersucht. Die Repräsentativität der während des laufenden Prozesses auf der Pumpen-Anzeige dargestellten Verfahrensparameter konnte gesamtheitlich bestätigt werden, darunter die erbrachte Leistung, der Durchsatz und die Temperatur. Zudem wurde beobachtet, dass diese Parameter, bei der Einstellung unterschiedlicher Pumpprogramme, jeweils durchgängig stabil blieben. Die zugehörige Leistungsaufnahme ist in Tabelle 6 aufgeführt.



Abbildung 29: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Pumpcharakteristiken (Eigene Aufnahme)

Tabelle 6: Technische Daten des konstruierten Röhren-PBR-Systems

Technische Maße	Röhren-PBR in Technikums-Maßstab
Abmessungen (LxBxH)	2,3x0,8x1,2 m
Grundfläche	1,84 m <sup>2</sup>
Optimales Reaktorvolumen	60 – 70 l
Rohrstreckenlänge	15,85 m
Glasrohrstrecken-Außenfläche	2,69 m <sup>2</sup>
A/V-Verhältnis (bei 70 l Befüllung)	38,42 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Pump-Leistungsaufnahme</b>	
Pumpgeschwindigkeit I	
Leistung / Durchsatz	24 W / 2,61 m <sup>3</sup> /h
Pumpgeschwindigkeit II	
Leistung / Durchsatz	38 W / 3,08 m <sup>3</sup> /h
Pumpgeschwindigkeit III	
Leistung / Durchsatz	57,5 W / 3,60 m <sup>3</sup> /h

### 3.3.2 Bestimmung der Mischzeit sowie Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl

Für die Bestimmung der Mischzeit wurde das eingängig erklärte, optische Verfahren von Wurm und Sandmann (2021) genutzt. Es wurden einige Anpassungen im Vergleich zur beschriebenen Durchführung getätigt, sodass der Prozess folgend abgeändert erläutert wird.

Die Versuche wurden im Technikums-Bereich der Hochschule Neubrandenburg (Haus 3) durchgeführt und fanden jeweils in Zeiträumen von 08:00 bis 16:00 statt, um eine gleichmäßige Belichtungsbedingung zu schaffen. Diese ist von hoher Bedeutung, da eine bedeutend geringere Umgebungshelligkeit zu Unterschieden in den genutzten Werten für die Histogramms-Standardabweichung führt. Für die Raumbeleuchtung wurden jeweils zwei Reihen der Technikums-Beleuchtung mit je acht Leuchtstoffröhren eingeschaltet. Der Reaktor wurde in eine bestimmte Position gebracht, die sich über einem langen Abfluss befand. Für den identischen Ablauf der Folgeversuche wurde diese Position genau markiert. Um einen gleichmäßigen Hintergrund zu bieten, der die Auswertung der Pixel-Helligkeit nicht durch unregelmäßige Farbeinflüsse behindert, wurde eine weiße, wasserfeste Tischdecke als Plane hinter den Reaktor gehängt. Für die Aufzeichnung des immer selben Bildausschnittes wurde ein Stativ verwendet, dessen Position ebenfalls durch Abklebungen markiert wurde. Bei der Aufnahmetechnik handelt es sich um ein „iPhone 11“, der iOS-Version 16.1.1 mit der

Modellnummer „MHDA3ZD/A“ und die erzeugten Aufnahmen wurden mit 30 Bildern pro Sekunde und einer Bitrate von 20 mbit/s erfasst.

Für die Umsetzung der Mischzeitbestimmung, wurde die Lichtzufuhr vom Reaktor entfernt, damit das Volumen gut sichtbar analysiert werden kann. Für die Farbeinspritzung über die eingebaute Sonden-Batterie, wurde ein Impfventil mit kurzem, angeschlossenem Schlauchende, über welches eine 60ml-Laborspritze eingeführt werden konnte, genutzt. Die vorher in die Spritze gefüllte Farbe, wurde anschließend zügig in den Reaktor überführt, wodurch ein Versuch startete. Der hierfür genutzte Farbstoff war „Patentblau V“ (E131) und stammte von der „Caesar & Lorentz GmbH“ (ArtNr.: 4495-25G). Da für alle Versuche ein Reaktorvolumen von 60 l verwendet wurde, ergab sich eine nach Anleitung (5 ml für 10 l) zuzugebende Farbmenge von 30 ml pro Durchgang. An jedem Morgen eines Versuchstages, wurden 500 ml Farbstoffmischung mit einer Konzentration von 15 g/l angesetzt, die über den Tag hinweg verbraucht werden konnte.

Untersucht wurden die Mischzeiteinflüsse verschiedener Konfigurationen aus Pumpgeschwindigkeit und Begasungsraten, wie Tabelle 7 zeigt. Es wurde erwartet, dass beide dieser Einflüsse einen verschnellernden Einfluss auf die Mischzeit haben. Unterschiedliche Pumpgeschwindigkeiten wurden dabei mit I, II und III, unterschiedliche Begasungsraten mit 0, 100 und 200 l/h und unterschiedliche Triplikats-Nummern mit (1), (2) oder (3) deklariert. Das Gas wurde am unteren Ende des Glasröhren-Eingangs über ein in die Sonden-Batterie installiertes Impfventil eingespeist. Über einen zwischengeschalteten Durchflussmesser konnte die zu untersuchende Begasungsrate fein eingestellt werden und eine entsprechende Luftversorgung erfolgte von einem Druckluftprovider des Technikums.

*Tabelle 7: Versuchsplan Mischzeitbestimmung mit jeweiligen Durchgangsbezeichnungen*

	Pumpgeschwindigkeit I			Pumpgeschwindigkeit II			Pumpgeschwindigkeit III		
<b>0 l/h</b>	I, 0 (1)	I, 0 (2)	I, 0 (3)	II, 0 (1)	II, 0 (2)	II, 0 (3)	III, 0 (1)	III, 0 (2)	III, 0 (3)
<b>100 l/h</b>	I, 100 (1)	I, 100 (2)	I, 100 (3)	II, 100 (1)	II, 100 (2)	II, 100 (3)	III, 100 (1)	III, 100 (2)	III, 100 (3)
<b>200 l/h</b>	I, 200 (1)	I, 200 (2)	I, 200 (3)	II, 200 (1)	II, 200 (2)	II, 200 (3)	III, 200 (1)	III, 200 (2)	III, 200 (3)

Versuchsdurchgänge erfolgten nach gleichen Abläufen. Zunächst wurde die Aufnahme gestartet. Dann wurden die zu untersuchenden Parameter eingestellt und für die spätere eindeutige Versuchs-Identifizierung bei der Auswertung eine Karte mit relevanten Daten vorgehalten. Nun konnte die Farbinjektion ausgeführt werden, womit der Versuch startete. Nach etwa neun Minuten wurde die Aufnahme beendet, um eine möglichst vollumfängliche

Dokumentation der Helligkeitsänderung sicherzustellen. Produzierte Videodateien wurden über die „iCloud“ von „Apple Inc.“ vom Aufnahmegerät auf einen PC übertragen und anschließend ausgewertet.

Dafür wurde zunächst eine Zuschneidung der Dateien über die Trimmen-Funktion der „Windows-Fotoanzeige“ der Firma Microsoft Corporation mit der Version 2024.11100.16009.0 durchgeführt, um alle nicht gebrauchten Szenen zu entfernen. Durch die reduzierte Datenmenge entstanden standardisierte Videolängen von 05:30. Jede Datei beginnt dabei unmittelbar mit dem Eintritt der Farbe in das Bild (Abbildung 30).

Um einen Verlauf der Helligkeits-Änderung aufzuzeichnen, müssen in gleichmäßigem Abstand Bilder aus der jeweiligen Videodatei extrahiert werden. Für diesen Zweck wurde die Szenenfilter-Funktion des „VLC media player“ der Firma VideoLAN/ VLC Team mit der Version 3.0.17.4 verwendet. Aus den 30 aufgenommenen Bildern pro Sekunde wurde eins gewonnen, sodass pro Versuch insgesamt 329 Szenen dokumentiert sind. Diese Szenen werden vom VLC-Player nach ihrer zeitlichen Reihenfolge benannt und sind daher genau identifizierbar.



Abbildung 30: 1. extrahierte Bild eines Durchgangs; 2. extrahierte Bild eines Durchgangs (v.l.n.r.) (Eigene Aufnahmen)

Nachdem nun eine Reihe von extrahierten Bildern verfügbar war, ging es anschließend darum die für die Untersuchung relevante Reaktor-Fläche auszuschneiden. Dabei ging es um diejenigen Bereiche, die ungehindert einsehbar und nicht von unerwünschten Einflüssen, wie Spiegelungen, Gestellteilen oder Hintergrundobjekten, berührt sind. Die Helligkeits-Änderung durch die Farbeinspritzung darf nicht durch störende Faktoren verfälscht werden, damit das Versuchsergebnis repräsentativ bleibt. Hierfür wird laut dem ursprünglichen Verfahren das Programm „IrfanView“ zum groben Zuschneiden des Bildes und das Webtool „Kaleido removebg“ für die Entfernung des Hintergrundes genutzt. Eine entsprechende Anwendung war aufgrund der erheblich unregelmäßigen Bauform des Reaktors sowie des Bedarfs der

zusätzlichen Entfernung von Vordergrundbereichen nicht möglich, was in Abbildung 31 verdeutlicht ist.



Abbildung 31: Von „Kaleido Removebg“ prozessierte Bilder (Eigene Aufnahmen)

Wie gezeigt wird, erkennt das System leere, durchsichtige Reaktorbereiche nicht als Vordergrund und schneidet Diese fälschlicherweise mit aus und entfernt darüber hinaus das Gestell nicht, da es nicht als Hintergrund des Bildes gilt. Eine Entfernung des Gestells ist zwingend erforderlich, um nur die für Helligkeitsänderung relevanten Pixel des Bildes zu analysieren. Daher wurde in dieser Arbeit das Programm „Photoshop“ der Firma „Adobe Inc.“ mit der Version v.26.0 genutzt, welches ein manuelles Erstellen von Masken für einen ausschlaggebenden Bereich ermöglicht. Diese Maske kann anschließend auf eine gewählte Bildmenge angewendet werden, wie im Folgenden schrittweise veranschaulicht ist.

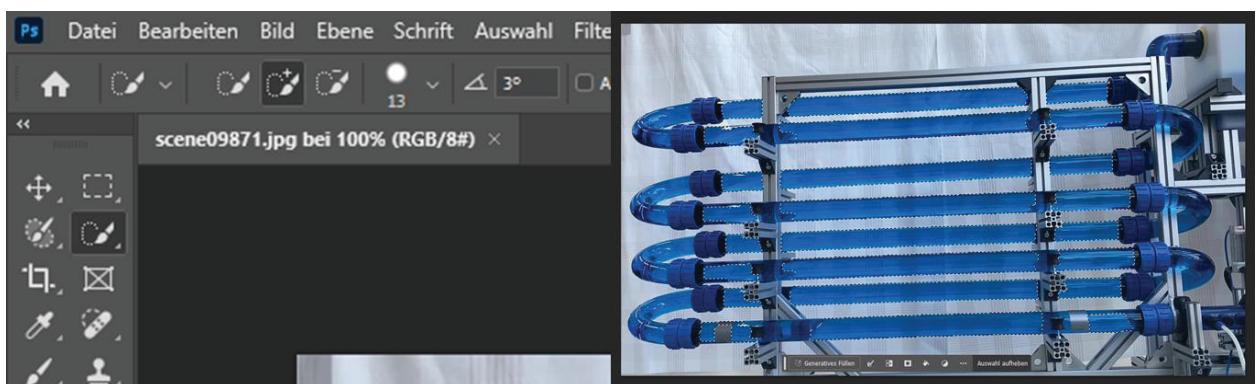


Abbildung 32: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 1) (Eigene Aufnahmen)

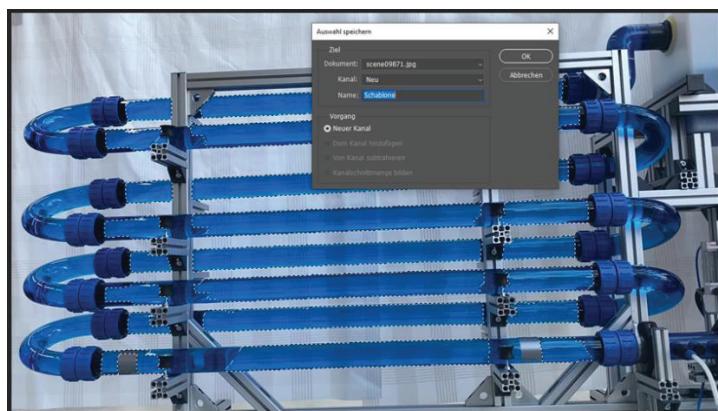


Abbildung 33: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 2) (Eigene Aufnahmen)

Abbildung 32 zeigt den manuellen Ausschneideprozess eines Bereichs mithilfe des „Schnellauswahl-Werkzeugs“. Es bietet sich dafür an das letzte extrahierte Bild zu wählen, da es bereits den vollen Mischungszustand erreicht hat und das Programm, aufgrund der klar erkennbaren Kanten zwischen Hintergrund und nun blauen Röhren, die angestrebte Auswahl besser nachvollziehen kann. Nachdem alle gewünschten Zonen ausgewählt wurden, kann die Markierung, über den oberen Reiter „Auswahl“, gespeichert werden (Abbildung 33). Essenziell ist es weiterführend die Arbeitsfläche mit dieser Auswahl durchgehend offen zu lassen und niemals zu schließen.

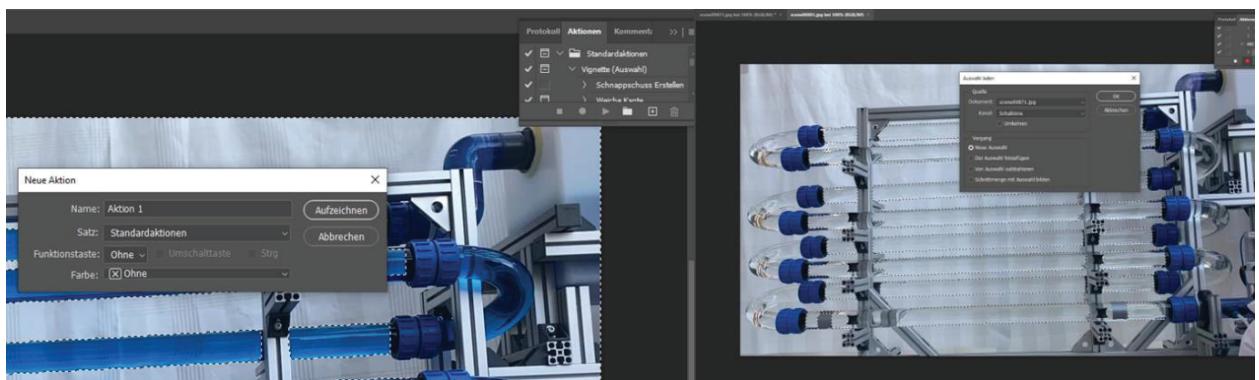


Abbildung 34: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 3) (Eigene Aufnahmen)

Anschließend kann das erste extrahierte Bild eines Versuchsdurchgangs geöffnet werden. Dieses öffnet sich bei Aufrufung in eine zweite Arbeitsfläche neben der mit der vorigen Auswahl. Über den Reiter „Fenster“ kann nun der „Aktions“-Manager angezeigt werden. Dieser öffnet sich rechts oben an der Arbeitsfläche, wie Abbildung 34 zeigt. Es muss nun eine Aktion aufgenommen werden, die mehrere Schrittreihenfolgen speichert und später auf alle Bilder eines ausgewählten Ordners anwendbar ist. Dazu wird das kleine Plus-Symbol angewählt. Die neue Aktion kann beliebig benannt werden. Nach dem Start der Aufnahme erscheint im „Aktions“-Manager ein roter Punkt zur Bestätigung. Zuerst wird über den Reiter „Auswahl“ „Auswahl laden“ ausgeführt (Abbildung 34, rechts).



Abbildung 35: Symbol für die Maskenerstellung (Eigene Aufnahme)

Die so geladene Auswahl kann, über Anwahl des in Abbildung 35 markierten Symbols maskiert werden, wodurch der Hintergrund vollständig ausgeschnitten wird und nur der gewünschte Bereich übrig bleibt. Die entstandene Maske kann über den Reiter „Datei“ in einen beliebigen Ordner abgespeichert werden. Abschließend kann die zweite Arbeitsfläche über das Kreuz

geschlossen werden und die aufgenommene Aktion gestoppt werden, wodurch sie wie in Abbildung 36 aussehen sollte.



Abbildung 36: Empfehlung für eine funktionstüchtige „Aktion“ (Eigene Aufnahme)

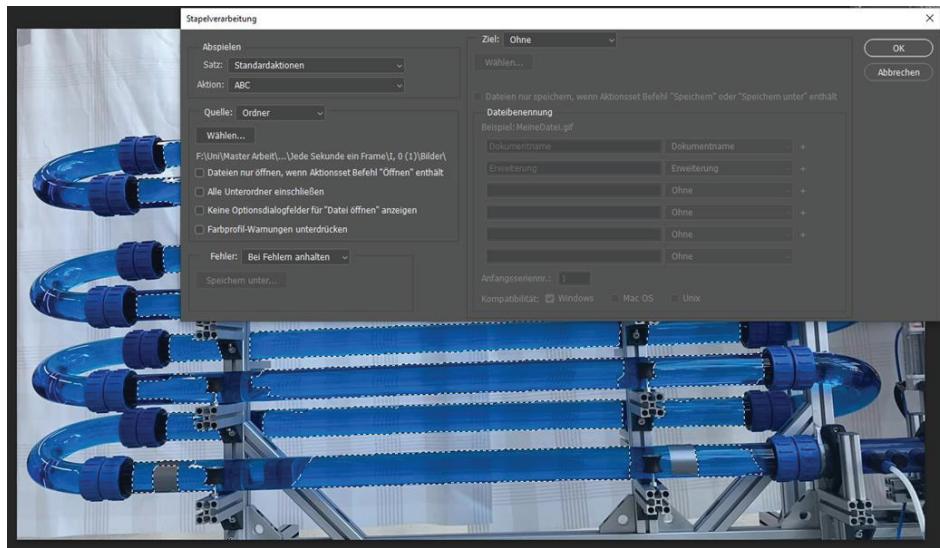


Abbildung 37: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 4) (Eigene Aufnahme)

Um die Schrittabfolge der gespeicherten Aktion auf alle extrahierten Bilder eines Versuchsdurchgangs anzuwenden kann schließlich über den Reiter „Datei“ und dem Unterpunkt „Automatisieren“ die „Stapelverarbeitung“ abgerufen werden. Nun öffnet sich das in Abbildung 37 dargestellte Fenster und die vorgesehene Aktion kann ausgewählt und auf einen gewünschten Ordner, der alle extrahierten Bilder eines bestimmten Versuches enthält, angewendet werden. Bei Betätigen der OK-Taste startet das Programm den Prozess, verarbeitet alle Bilder und speichert sie in den in der Aktion angegebenen Ordner, wodurch das Zuschneide-Verfahren abgeschlossen ist (Abbildung 38).

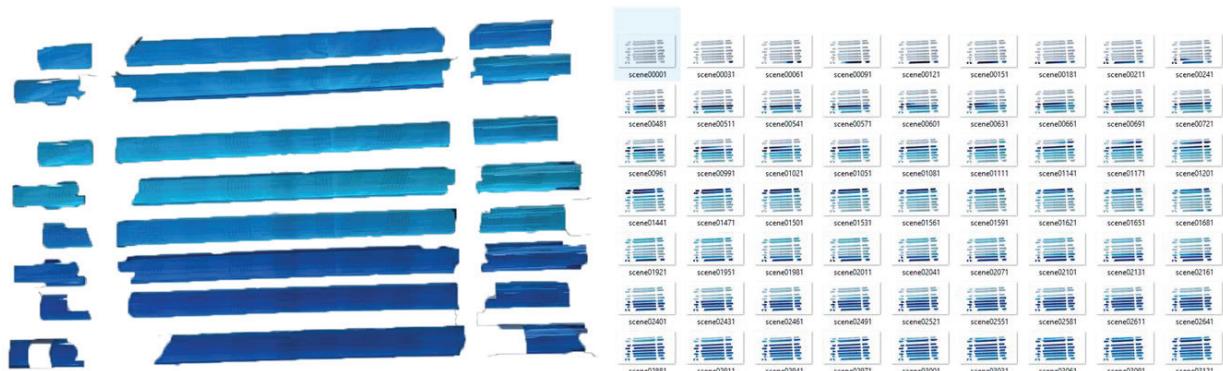


Abbildung 38: Endprodukt des Photoshop-Verfahrens (Eigene Aufnahmen)

Die U-Stücke wurden für dieses Verfahren bewusst ausgelassen, da sie als eine Fehlerquelle für irritierende Helligkeitswerte identifiziert wurden. Für das optische Bestimmungsverfahren muss sichergestellt werden, dass es keine potenziellen Störfaktoren in den zu analysierenden extrahierten Bildern gibt, sodass diese Anpassung nötig war.

Die erhaltenen, prozessierten Bilder wurden anschließend mit dem Programm „GNU Image Manipulation Program“ mit der Version 2.10.38 ausgewertet. Das dafür notwendige Tool war das Histogramm, wie in Abbildung 39 gezeigt. Die Standardabweichung dieser Grafik, in der Abbildung rot markiert, stellt den Grad der Streuung der Helligkeitswerte um den Mittelwert dar und ist somit ein Maß für den Mischungszustand im Reaktor.

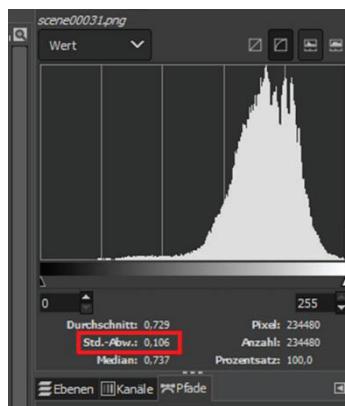


Abbildung 39: Standardabweichung des Histogramms als Maß für die Auswertung über Gimp (Eigene Aufnahme)

Um eine erste grobe Einordnung zu erlangen, wurden die Videodateien der Versuche zunächst visuell untersucht und die ungefähre Mischzeit nach Gefühl detektiert. Dies ermöglicht eine Abschätzung einer Zeitspanne, in die der gesuchte Wert fallen muss. Ein großzügiger Bereich extrahierter Bilder, wurde, um die ungefähr detektierte Mischzeit herum, in GIMP geöffnet, um sie so auf deren Histogramms-Standardabweichung hin zu untersuchen. Nach der Literatur gilt ein Versuch dabei als „durchmischt“, wenn ein Messwert von  $\pm 5\%$  vom Endwert erreicht und nicht mehr verlassen wird. Da sich die Werte sinuskurvenartig äußern, kann die stringente Nutzung des Endwertes für dieses Verfahren zu Ungenauigkeiten in der Auswertung führen. Daher wurden die letzten 30 Werte je Versuch vorab gemittelt und anhand dieses Mittelwertes eine 5%-Spanne errechnet. Wird diese Spanne durch einen Messwert erreicht und später nicht wieder verlassen, handelt es sich bei dem Zeitpunkt dieses Wertes um die Mischzeit. Die Triplikate der Versuche aus Tabelle 7 wurden jeweils gemittelt und die Standardabweichung berechnet. Das Endergebnis wurde in entsprechende Diagramme überführt.

Für die Messung der Fließgeschwindigkeit wurde eine ein Meter lange Strecke an der untersten Röhre des Reaktors abgeklebt. Die während der Videodateien injizierte Farbe wurde als Schwebekörper entlang der Meterstrecke verfolgt und die Zeit zwischen Überschreiten des

ersten Klebebandes und Erreichen des zweiten Klebebandes gestoppt. Die Fließgeschwindigkeit ergibt sich durch den Quotienten aus einem Meter und der gestoppten Zeit. Auch hier wurden die Triplikate gemäß des Versuchsplans von Tabelle 7 gemittelt und es wurde erwartet, dass die Fließgeschwindigkeit mit steigender Pumpgeschwindigkeit ansteigt.

Aus der Fließgeschwindigkeit, dem Rohrinnendurchmesser, der dynamischen Viskosität des Fluids und der Dichte des Fluids kann weiterhin die Reynoldszahl, nach (4), bestimmt werden, die das Maß für das Strömungsregime darstellt. Es wurden Berechnungen für die Mittelwerte der Fließgeschwindigkeiten durchgeführt.

$$Re = \frac{\rho \cdot \vartheta \cdot d}{\eta} \quad (4)$$

$$\rho = 997 \frac{kg}{m^3} \quad d = 0,0606 m \quad \eta = 0,001001 Pa \cdot s$$

### 3.3.3 Bestimmung des kLa

Für den experimentellen Aufbau wurde ein Messsystem der Firma „Hamilton Bonadaz AG“ verwendet, welches eine Sonde für die Sauerstoffsättigung (Visiferm DO Arc 120 HO) enthält. Dieser Sensor wurde über ein Elektrodenhalter-Zugang an der eingebauten Sonden-Batterie installiert und anschließend mit einer Verteilerbox (Arc Distributor Box 4) verbunden. Die empfangenen Daten werden an einen Bluetooth-Empfänger-Stick (Wireless Converter BT) weitergeleitet, der die Daten auf einem Laptop in einer dafür vorgesehenen Software der Firma „Hamilton“ dokumentiert. Nach Abschluss eines Messdurchgangs konnten aufgenommene Daten in Form einer csv.-Datei in Excel (Microsoft 365, Version 2410) überführt und dort weiterverarbeitet sowie ausgewertet werden. Der Versuchsaufbau kann in Abbildung 40 nachvollzogen werden.



Abbildung 40: Experimenteller Aufbau für die Bestimmung des kLa (Eigene Aufnahme)

Die Bestimmung richtet sich nach einem Versuchsablauf für die Charakterisierung von Bioreaktoren von Meusel et al. aus dem Jahr 2016. Für das „gassing-out“ wurde, bei höchster

Pumpgeschwindigkeit, Stickstoff mit einer hohen Begasungsrate von 1000 l/h aus einem Anschluss der Hochschul-Laboreinrichtung verwendet. Dafür musste an dem Druckregler der Bereitstellung ein Druck von 1,5 bar justiert werden. Nach etwa 10 min. wurde eine Sauerstoffkonzentration von unter 1% erreicht. Ein Versuch wurde mit der Einstellung der zu untersuchenden Pumpgeschwindigkeit und dem Einschalten der Wert-Dokumentation über die Software vorbereitet. Eine kurze Restzeit des „gassing-outs“ wurde mit aufgenommen, wonach Dieses beendet und die zu untersuchende Begasungsrate, aus einem Druckluftanschluss der Laboreinrichtung, mittels Durchflussmesser eingestellt wurde. So kann die Sauerstoffkonzentration im Anschluss, während der Excel-Datenverarbeitung, an genau dem Wert beschnitten werden, an welchem der exakte Start für den DO-Anstieg stattfindet. Ein so initierter Versuchsdurchgang wurde beim Erreichen eines Wertes von 90% gestoppt, wobei alle drei Sekunden ein Messwert entnommen wurde, und anschließend die csv.-Datei exportiert sowie auf einem persönlichen Datenträger abgespeichert. In Tabelle 8 ist der untersuchte Versuchsplan dargestellt. Die Bezeichnungen sind analog zur Versuchsplanung aus Tabelle 7 zu verstehen. Eine Analyse der Begasungsrate von 0 l/h entfällt, da dort kein Einfluss auf den kLa existent ist. Zu erwarten ist, dass sich der kLa, also die Effizienz des Gasaustausches, mit steigender Pumpgeschwindigkeit sowie Begasungsrate erhöht.

*Tabelle 8: Versuchsplan kLa-Bestimmung mit jeweiligen Durchgangsbezeichnungen*

	I			II			III		
<b>100 l/h</b>	I, 100 (1)	I, 100 (2)	I, 100 (3)	II, 100 (1)	II, 100 (2)	II, 100 (3)	III, 100 (1)	III, 100 (2)	III, 100 (3)
<b>200 l/h</b>	I, 200 (1)	I, 200 (2)	I, 200 (3)	II, 200 (1)	II, 200 (2)	II, 200 (3)	III, 200 (1)	III, 200 (2)	III, 200 (3)

Die in der csv.-Datei enthaltenen Werte für die Zeit und die zugehörigen DO-Werte [%] wurden in eine Excel-Tabelle übertragen und anschließend nach folgender Prozessierung verarbeitet. Zunächst wurden die Werte einer Datenreihe, nach (5), zwischen dem jeweilig gemessenen Minimalwert und möglichen Maximalwert (100%) skaliert.

$$DO(t)_{calc} = \frac{(DO(t)_{exp} - DO_{min})}{(DO_{100} - DO_{min})} \cdot 100 \quad (5)$$

$DO(t)_{exp}$ : Gemessener Wert der Datenreihe       $DO_{min}$ : Minimalwert der Datenreihe

$DO_{100}$ : Maximal erreichbarer Wert (100%)

Anschließend erfolgt eine erneute Berechnung der aus (5) resultierenden Werte, nach (6).

$$\ln(100 - DO(t)_{calc}) \quad (6)$$

Die aus (6) erhaltenen Werte wurden auf ein Diagramm übertragen. Der entsprechende Anstieg wird als kLa-Wert betrachtet. Für die Vergleichbarkeit dieses Wertes mit anderer Literatur, wurde eine anpassende Umrechnung angeschlossen. Hierfür war eine Darstellung der Ergebnisse als positiver Wert sowie eine Umrechnung auf pro Stunde nötig. Da eine Messung im Drei-Sekunden-Zyklus durchgeführt wurde, erfolgte die Umrechnung auf pro Stunde durch die Multiplikation mit dem Faktor 1200.

## 4 Ergebnisse der verfahrenstechnischen Charakterisierung

### 4.1 Mischzeit, Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl

Der Versuchsplan der Mischzeit-Analyse, aus Tabelle 7, sah neun verschiedene Konfigurationen mit je einer dreifachen Bestimmung vor. Tabelle 9 stellt die Ergebnisse der Versuche für die erste Pumpgeschwindigkeit (I) dar.

Tabelle 9: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit I

	I, 0 (1)	I, 0 (2)	I, 0 (3)	I, 100 (1)	I, 100 (2)	I, 100 (3)	I, 200 (1)	I, 200 (2)	I, 200 (3)
Ø Letzten 30 Werte	0,099	0,098	0,100	0,100	0,098	0,099	0,100	0,099	0,102
95%	<b>0,094</b>	<b>0,093</b>	<b>0,095</b>	<b>0,095</b>	<b>0,093</b>	<b>0,094</b>	<b>0,095</b>	<b>0,094</b>	<b>0,097</b>
105%	<b>0,104</b>	<b>0,103</b>	<b>0,105</b>	<b>0,105</b>	<b>0,103</b>	<b>0,104</b>	<b>0,105</b>	<b>0,104</b>	<b>0,107</b>
visuell									
Identifizierte scene	7171	7141	7201	6631	6601	6751	6601	6631	6781
Mischzeit in s	<b>239,03</b>	<b>238,03</b>	<b>240,03</b>	<b>221,03</b>	<b>220,03</b>	<b>225,03</b>	<b>220,03</b>	<b>221,03</b>	<b>226,03</b>
Mischzeit in [m]:ss	<b>03:59</b>	<b>03:58</b>	<b>04:00</b>	<b>03:41</b>	<b>03:40</b>	<b>03:45</b>	<b>03:40</b>	<b>03:41</b>	<b>03:46</b>
Mittelwert in [m]:ss	<b>03:59</b>			<b>03:42</b>			<b>03:42</b>		
Letzte scene vor Mischung nach Histogramm	6811	6811	6811	6421	4741	4711	4651	4591	4591
Mischzeit nach Histogramm in s	<b>227,03</b>	<b>227,03</b>	<b>227,03</b>	<b>214,03</b>	<b>158,03</b>	<b>157,03</b>	<b>155,03</b>	<b>153,03</b>	<b>153,03</b>
Mischzeit nach Histogramm in [m]:ss	<b>03:47</b>	<b>03:47</b>	<b>03:47</b>	<b>03:34</b>	<b>02:38</b>	<b>02:37</b>	<b>02:35</b>	<b>02:33</b>	<b>02:33</b>
Mittelwert in s	<b>227,03</b>			<b>157,53</b>			<b>153,70</b>		
Mittelwert in [m]:ss	<b>03:47</b>			<b>02:38</b>			<b>02:34</b>		
StAbw.	0,000			0,500			0,943		

Tabelle 9 ist in drei Segmente unterteilt. Im oberen Teil wurde die benötigte  $\pm 5\%$ -Spanne berechnet, die für das Detektieren der Mischzeit maßgeblich ist. Dafür wurde in die erste Zeile der Durchschnitt der letzten 30 Werte für die Histogramms-Standardabweichung einer Datenreihe eingetragen. Das zweite Segment bezieht sich auf die visuell identifizierte Mischzeit, die aus dem persönlichen Empfinden bei der Betrachtung der 329 zur Verfügung stehenden Szenen resultierte. Dieser Ansatz bietet zum einen eine grobe Lokalisierung der Mischzeit sowie zum anderen die Möglichkeit des validierenden Vergleichs. Die rötlich hinterlegten Zellen spiegeln die Ergebnisse dieses optischen Maßes wider. Im restlichen Teil sind die Ergebniswerte der Auswertung gemäß Wurm und Sandmann präsentiert. Die grün markierten Zellen stellen den Mittelwert der Triplikate einer untersuchten Parameter-Konfiguration dar. Bei den beiden letzten Abschnitten wird auf „Szenen“ Bezug genommen. Dabei handelt es sich um die von dem „VLC-Player“ nach zeitlicher Reihenfolge benannten, aus der Videodatei extrahierten Bilder. Die deklarierten Szenen aus der Tabelle verkörpern das extrahierte Bild, dessen Histogramms-Standardabweichung sich unmittelbar vor dem Eintritt in die  $\pm 5\%$ -Spanne befindet, ohne das die Spanne später nochmal verlassen wird. Da aus 30

Bildern pro Sekunde je Eines entnommen wurde, musste der Szenenwert durch 30 dividiert werden, um den Zeitpunkt in Sekunden zu errechnen. Der angegebene Wert für die Standardabweichung in der untersten Zeile, wurde aus den „Mischzeiten nach Histogramm in s“ berechnet und ist daher in Sekunden angegeben.

Der Blick auf die Ergebnisse verdeutlicht einen sichtbaren Einfluss der Gaszufuhr. Sowohl die visuelle als auch die wertgebundene Auswertung zeigen, dass die Mischzeit mit steigenden Begasungsraten sinkt. Auffällig ist dabei der deutliche Unterschied zwischen den Versuchen ohne Begasung (03:47) und den Versuchen mit Begasung (02:38 und 02:34), was die zuträgliche Wirkung unterstreicht. Generell drücken die Triplikate der Datenreihen eine hohe Authentizität aus, was die niedrigen Standardabweichungen belegen. I, 100 (1) fällt durch seinen äußerst abweichenden Wert auf. Dieser hätte einen verfälschenden Effekt auf die Auswertung gehabt und wurde daher nicht mit einbezogen (in Tabelle 9 gelb gekennzeichnet). Die Gründe für diese Abnormalität können höchstwahrscheinlich auf die sehr feinfühlige Skala der Histogramms-Standardabweichungen zurückgeführt werden. Abbildung 41 stellt beispielhaft den Verlauf der letzten 120 Werte für die Histogramms-Standardabweichung von I, 100 (1) dar. Es fällt auf, dass sich die Werte in sinusartigen Kurven äußern. Die roten Linien markieren den Bereich der  $\pm 5\%$ -Spanne. Die Abbildung verdeutlicht, wie bereits winzige Änderungen der Helligkeits-Streuung (0,003) einen signifikanten Effekt auf die detektierte Mischzeit haben können. In diesem Versuch war die Mischzeit bereits vermeintlich in einem früheren Abschnitt verortet worden, doch in den letzten 120 Werten verließen einige Werte den  $\pm 5\%$ -Bereich noch einmal und die Mischzeit musste, nach Definition, nach hinten verlegt werden. Durch die sinusartigen Kurven musste dabei die gesamte Strecke einer Schwingungsdauer zurückgelegt werden, wodurch die erhebliche Mischzeit-Diskrepanz zustande kommt. Dieses Phänomen tritt in regelmäßiger Abstand auf.

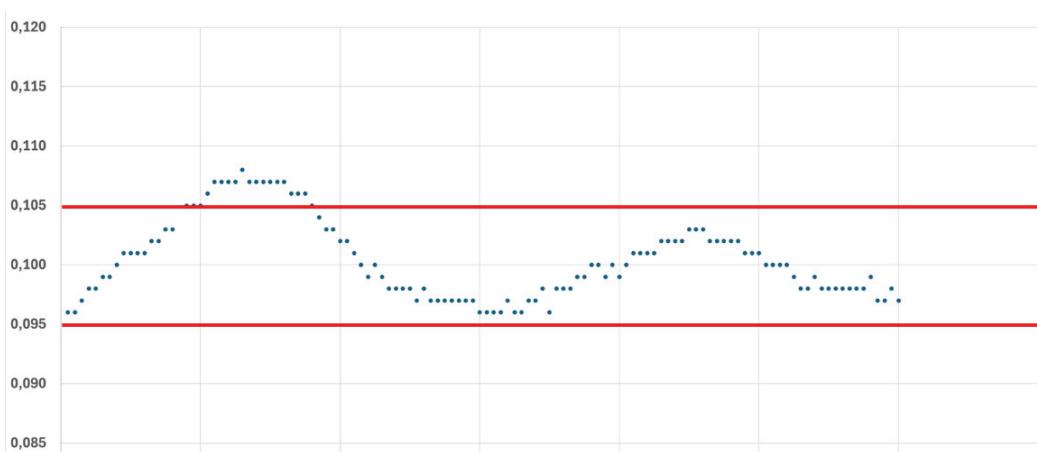


Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung der letzten 120 Histogramms-Standardabweichungen von I, 100 (1)

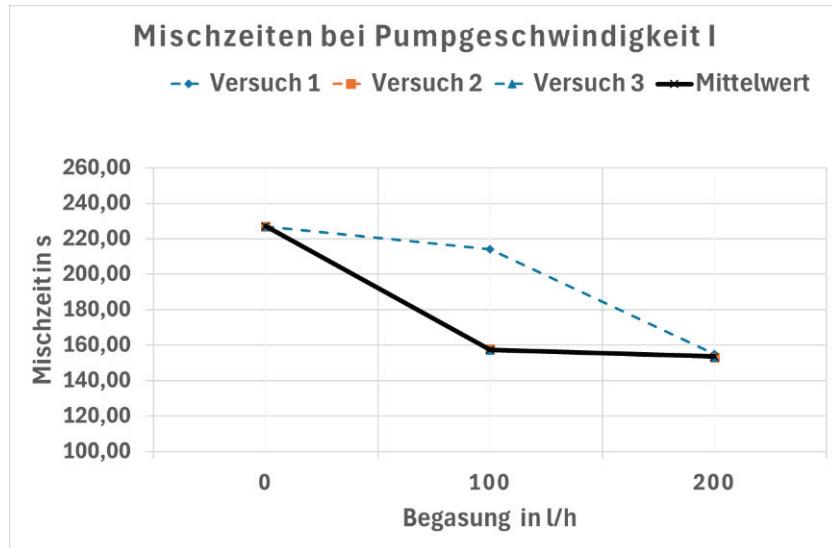


Abbildung 42: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit I

Abbildung 42 visualisiert die in Tabelle 9 aufgeführten Werte, indem Versuch 1,2 und 3 sowie der Mittelwert als Graph dargestellt werden. Ein klarer Abfall der Mischzeit ist beim Vergleich der Begasungsraten 0 l/h (227 s) und 100 l/h (157,5 s) erkennbar. Der Einfluss einer weiteren Erhöhung der Einspeisungsrate auf 200 l/h fällt minimal aus.

Tabelle 10: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit II

	II, 0 (1)	II, 0 (2)	II, 0 (3)	II, 100 (1)	II, 100 (2)	II, 100 (3)	II, 200 (1)	II, 200 (2)	II, 200 (3)
Ø Letzten 30 Werte	0,105	0,103	0,103	0,091	0,091	0,100	0,103	0,101	0,100
95%	<b>0,100</b>	<b>0,098</b>	<b>0,098</b>	<b>0,086</b>	<b>0,086</b>	<b>0,095</b>	<b>0,098</b>	<b>0,096</b>	<b>0,095</b>
105%	<b>0,110</b>	<b>0,108</b>	<b>0,108</b>	<b>0,096</b>	<b>0,096</b>	<b>0,105</b>	<b>0,108</b>	<b>0,106</b>	<b>0,105</b>
visuell									
Identifizierte scene	6061	6001	6001	5881	5791	5821	5731	5701	5731
Mischzeit in s	<b>202,03</b>	<b>200,03</b>	<b>200,03</b>	<b>196,03</b>	<b>193,03</b>	<b>194,03</b>	<b>191,03</b>	<b>190,03</b>	<b>191,03</b>
Mischzeit in [m]:ss	<b>03:22</b>	<b>03:20</b>	<b>03:20</b>	<b>03:16</b>	<b>03:13</b>	<b>03:14</b>	<b>03:11</b>	<b>03:10</b>	<b>03:11</b>
Mittelwert in [m]:ss	<b>03:21</b>			<b>03:14</b>			<b>03:11</b>		
Letzte scene vor Mischung nach Histogramm	5551	4141	4111	5371	3961	4021	3901	3931	3871
Mischzeit nach Histogramm in s	<b>185,03</b>	<b>138,03</b>	<b>137,03</b>	<b>179,03</b>	<b>132,03</b>	<b>134,03</b>	<b>130,03</b>	<b>131,03</b>	<b>129,03</b>
Mischzeit nach Histogramm in [m]:ss	<b>03:05</b>	<b>02:18</b>	<b>02:17</b>	<b>02:59</b>	<b>02:12</b>	<b>02:14</b>	<b>02:10</b>	<b>02:11</b>	<b>02:09</b>
Mittelwert in s	<b>153,37</b>			<b>148,37</b>			<b>130,03</b>		
Mittelwert in [m]:ss	<b>02:33</b>			<b>02:28</b>			<b>02:10</b>		
StAbw.	22,395			21,700			0,816		

Tabelle 10 stellt die Ergebnisse der Versuche der Pumpgeschwindigkeit II dar. Hier wird der höhere Unterschied zwischen den beiden Herangehensweisen der visuellen und wertgebundenen Auswertung ersichtlich. Dieser ist sowohl durch die exklusiv einkalkulierte 5%-Spanne sowie durch die hohe Abweichungsaffinität der Messwerte erklärbar. Diese Neigung wird durch hohe Standardabweichungen für II, 0 und II, 100 (22,395 und 21,700)

unterstrichen. Beide machen anteilig je 14,6 % des Gesamtwertes aus. Eine allgemeine Verringerung der Mischzeit bei steigender Begasungsrate kann auch hier beobachtet werden, wobei die Werte der Pumpgeschwindigkeit II im Vergleich zu Pumpgeschwindigkeit I ebenfalls sanken (I, 200 = 02:34 vs. II, 200 = 02:10).

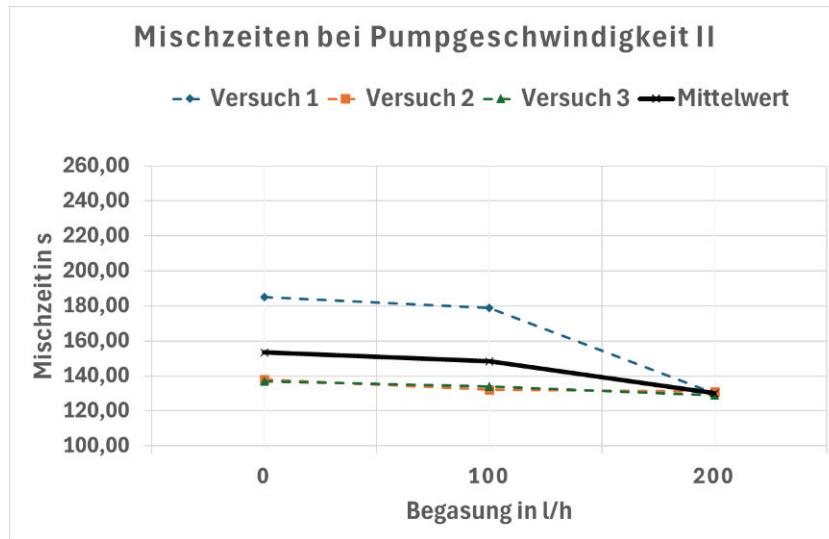


Abbildung 43: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit II

Die Datenreihe von Pumpgeschwindigkeit II findet sich, wie in Abbildung 43 nachverfolgt werden kann, auf einem niedrigeren Niveau wieder als Pumpgeschwindigkeit I, was die höhere Durchmischungswirkung der gesteigerten Förderrate verdeutlicht. Prominent sind die klar erkennbaren Mittelwerts-Abweichungen von Versuch 1.

Tabelle 11: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit III

	III, 0 (1)	III, 0 (2)	III, 0 (3)	III, 100 (1)	III, 100 (2)	III, 100 (3)	III, 200 (1)	III, 200 (2)	III, 200 (3)
Ø Letzten 30 Werte	0,095	0,096	0,095	0,091	0,090	0,094	0,107	0,095	0,096
95%	<b>0,090</b>	<b>0,091</b>	<b>0,090</b>	<b>0,086</b>	<b>0,086</b>	<b>0,089</b>	<b>0,102</b>	<b>0,090</b>	<b>0,091</b>
105%	<b>0,100</b>	<b>0,101</b>	<b>0,100</b>	<b>0,096</b>	<b>0,095</b>	<b>0,099</b>	<b>0,112</b>	<b>0,100</b>	<b>0,101</b>
visuell									
Identifizierte scene	6691	6691	6541	5041	5011	4951	5011	4981	4981
Mischzeit in s	<b>223,03</b>	<b>223,03</b>	<b>218,03</b>	<b>168,03</b>	<b>167,03</b>	<b>165,03</b>	<b>167,03</b>	<b>166,03</b>	<b>166,03</b>
Mischzeit in [m]:ss	<b>03:43</b>	<b>03:43</b>	<b>03:38</b>	<b>02:48</b>	<b>02:47</b>	<b>02:45</b>	<b>02:47</b>	<b>02:46</b>	<b>02:46</b>
Mittelwert in [m]:ss	<b>03:41</b>			<b>02:47</b>			<b>02:46</b>		
Letzte scene vor Mischung nach Histogramm							—	4501	4621
Mischzeit nach Histogramm in s	<b>165,03</b>	<b>210,03</b>	<b>207,03</b>	<b>159,03</b>	<b>156,03</b>	<b>156,03</b>	—	<b>150,03</b>	<b>154,03</b>
Mischzeit nach Histogramm in [m]:ss	<b>02:45</b>	<b>03:30</b>	<b>03:27</b>	<b>02:39</b>	<b>02:36</b>	<b>02:36</b>	—	<b>02:30</b>	<b>02:34</b>
Mittelwert in s	<b>194,03</b>			<b>157,03</b>			<b>152,03</b>		
Mittelwert in [m]:ss	<b>03:14</b>			<b>02:37</b>			<b>02:32</b>		
StAbw.	20,543			1,414			2,000		

Die Ergebnisse der Versuche von III finden sich, nach visueller Einschätzung, auf einem erneut niedrigeren Niveau wieder als I und II. Messwertgebunden fällt auf, dass die Mischzeiten von III höher ausfallen als bei II. Weiterhin ist bei beiden Ansätzen ein der Durchmischung zuträglicher Effekt der steigenden Begasungsrate zu begutachten. Die Resultate der Histogramms-Standardabweichungen beweisen sich hier in Teilen als in sich nicht schlüssig, während die visuelle Auswertung einer valideren Struktur zu folgen scheint. Versuch III, 0 sticht, analog zu II, 0 und II, 100, mit einer hohen Standardabweichung von 20,543 hervor, was knapp 10,6% des Endergebnisses ausmacht. Im Gegensatz dazu waren III, 100 und III, 200 mit Werten von 1,414 und 2,000 jeweils sehr tragfähig. III, 200 (1) konnte aufgrund einer massiven Lichtspiegelung auf den Glaskörpern nicht ausgewertet werden und wurde daher nicht mit einbezogen. Die Spiegelung ist in Abbildung 44 gezeigt und kann als Beispiel für einen unerwünschten Störfaktor herangezogen werden.

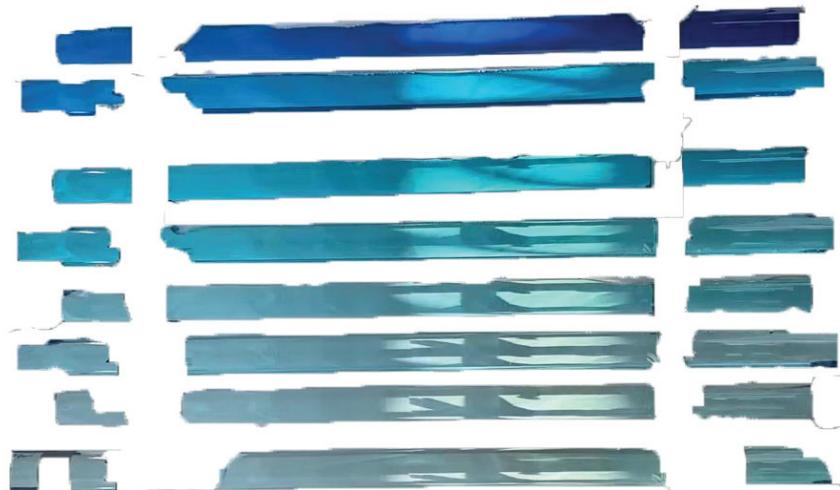


Abbildung 44: Spiegelung auf den Glaskörpern von III, 200 (1) als beispielhafter Störfaktor (Eigene Aufnahme)

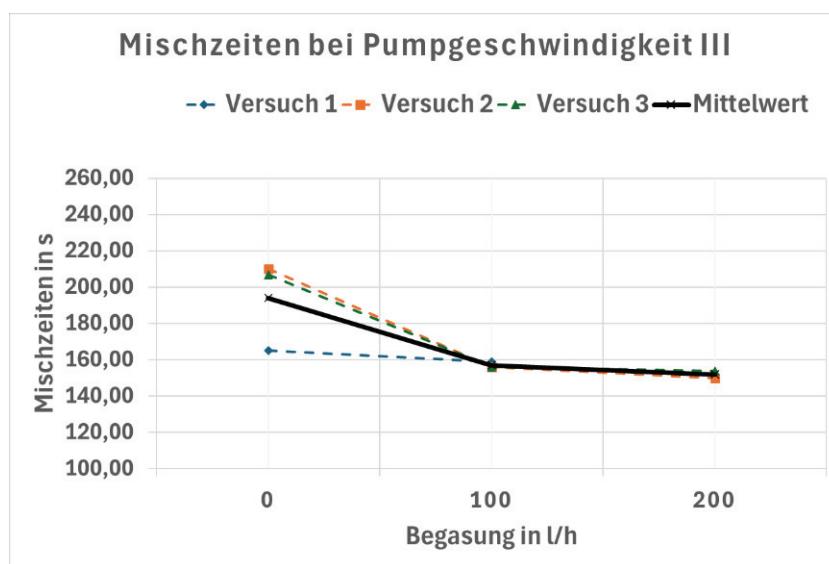


Abbildung 45: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit III

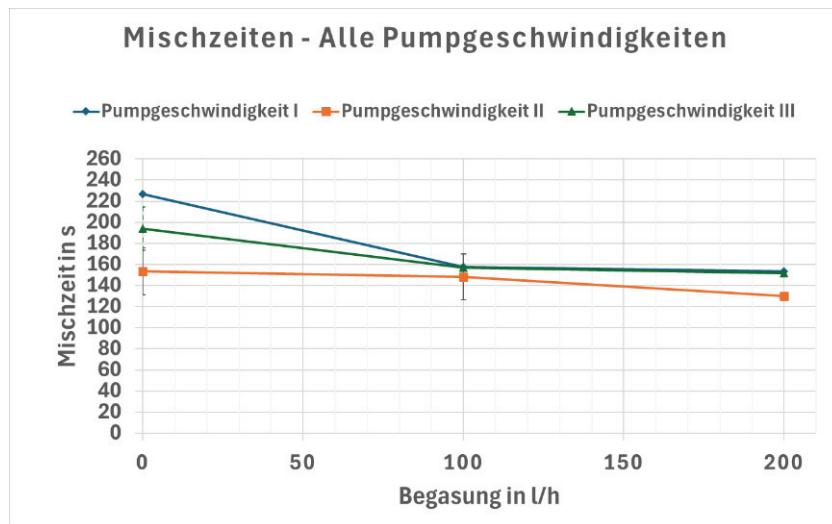


Abbildung 46: Mischzeiten Alle Pumpgeschwindigkeiten

Abbildung 46 zeigt die Verläufe der Mischzeits-Mittelwerte aller Pumpgeschwindigkeiten. Die jeweiligen Höhenniveaus drücken aus, dass I die höchste, III die zweithöchste und II die geringste Mischzeit vorweisen. Die Messwerte konnte die Erwartung nicht gänzlich bestätigen, dass höhere Pumpgeschwindigkeiten eine verringerte Mischzeit zur Folge haben. Es kann allerdings observiert werden, dass die Erhöhung der Begasungsrate von 0 auf 100 l/h einen erheblich reduzierenden Effekt auf die Mischzeit hatte sowie dass die weitere Erhöhung von 100 auf 200 l/h eine deutlich weniger senkende Wirkung entfaltet.

Für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten wurde die Wegzeit gemessen, die die injizierte Farbe benötigt, um einen Meter zurückzulegen. Entsprechende Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Reynoldszahl resultierte aus den Mittelwerten für die Fließgeschwindigkeit und ist in Abbildung 47 veranschaulicht.

Tabelle 12: Ergebnisse für Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl

		I			II			III		
0 l/h	Triplikat [m/s]	0,313	0,319	0,327	0,392	0,390	0,374	0,451	0,444	0,429
	Mittelwert [m/s]	<b>0,320</b>			<b>0,385</b>			<b>0,441</b>		
	Standardabweichung	0,006			0,008			0,009		
	Reynoldszahl	<b>19294</b>			<b>23246</b>			<b>26648</b>		
100 l/h	Triplikat [m/s]	0,338	0,359	0,349	0,407	0,405	0,384	0,425	0,476	0,442
	Mittelwert [m/s]	<b>0,349</b>			<b>0,399</b>			<b>0,448</b>		
	Standardabweichung	0,009			0,010			0,021		
	Reynoldszahl	<b>21026</b>			<b>24083</b>			<b>27022</b>		
200 l/h	Triplikat [m/s]	0,347	0,344	0,345	0,420	0,422	0,417	0,417	0,479	0,464
	Mittelwert [m/s]	<b>0,345</b>			<b>0,420</b>			<b>0,453</b>		
	Standardabweichung	0,001			0,002			0,026		
	Reynoldszahl	<b>20847</b>			<b>25333</b>			<b>27368</b>		

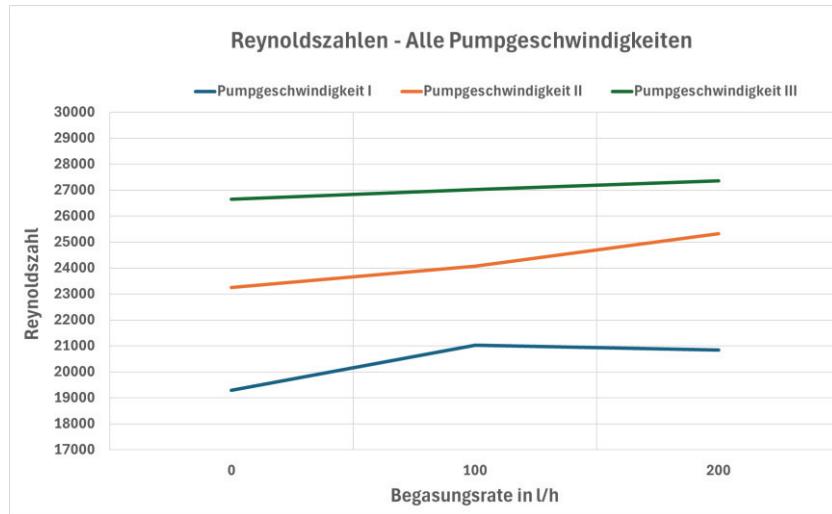


Abbildung 47: Reynoldszahlen - Alle Pumpgeschwindigkeiten

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Fließgeschwindigkeit (in der Tabelle grün markiert) sowohl durch eine erhöhte Pump- als auch Begasungsrate steigern lässt. Der Einfluss der Begasungsrate fällt dabei gemäßiger aus. Dieser zeigt sich vor allem bei den Vergleichen der Versuche ohne Einspeisung (I, 0; II, 0 und III, 0) und mit Gaszufuhr von 100 l/h (I, 100; II, 100 und III, 100). Analog zur Auswertung der Mischzeiten kann der Begasung also eine klare Relevanz in Bezug auf die Durchmischungsgüte attestiert werden, wobei sich das Ausmaß bei einer Erhöhung von 100 auf 200 l/h eher gering darstellt. Dieses Wirkverhalten der Fließgeschwindigkeiten schlägt sich proportional auf die Reynoldszahl (in der Tabelle gelb markiert) (Abbildung 47) nieder. Die Messergebnisse können durch die nur minimalen Standardabweichungen als sehr aussagekräftig bewertet werden.

## 4.2 kLa

Tabelle 13 führt alle Ergebnisse der Datenverarbeitung auf. Die dargestellten Werte spiegeln den kLa-Koeffizienten (grün markiert) wider. Auch hier werden die untersuchten Einflüsse deutlich. Sowohl die Pumpgeschwindigkeit hat einen positiven Einfluss auf die Effizienz des Gasaustausches (beispielhaft I, 100; II, 100; III 100: 6,04; 7,08; 7,32), als auch die Begasungsrate (beispielhaft I, 100 und I, 200: 6,04 und 7,68). Anzumerken ist die höhere Standardabweichung von I, 100, welche mit 0,8333 etwa 13,8 % des Mittelwerts ausmacht, aber den Werten nicht gänzlich ihre Bedeutung nimmt. Die restlichen Abweichungen pegeln sich zwischen 2,56 und 9,27 % ein. Eine weitere Auffälligkeit stellt der größere Wertunterschied zwischen den Versuchen mit 100 l/h und denen mit 200 l/h dar. Die intensivere Gaszufuhr performte erheblich besser.

Tabelle 13: Ergebnisse kLa

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Standardabweichung
I, 100	7,20	5,28	5,64	6,04	0,8333
I, 200	8,16	7,56	7,32	7,68	0,3533
II, 100	7,20	7,44	6,60	7,08	0,3533
II, 200	9,12	9,36	7,92	8,80	0,6299
III, 100	7,80	7,80	6,36	7,32	0,6788
III, 200	9,60	9,36	9,96	9,64	0,2466

Abbildung 48, 49 und 50 stellen die Ergebnisse für I, II und III dar.

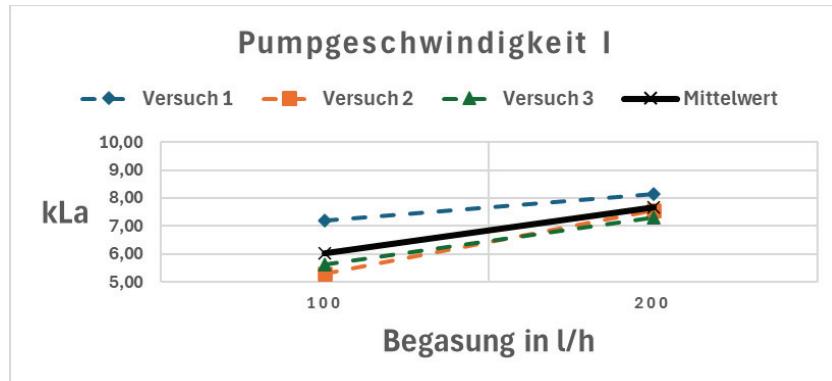


Abbildung 48: kLa Pumpgeschwindigkeit I

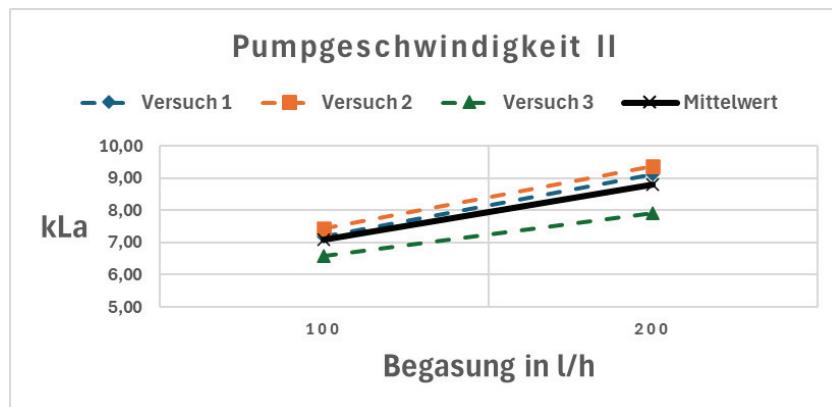


Abbildung 49: kLa Pumpgeschwindigkeit II

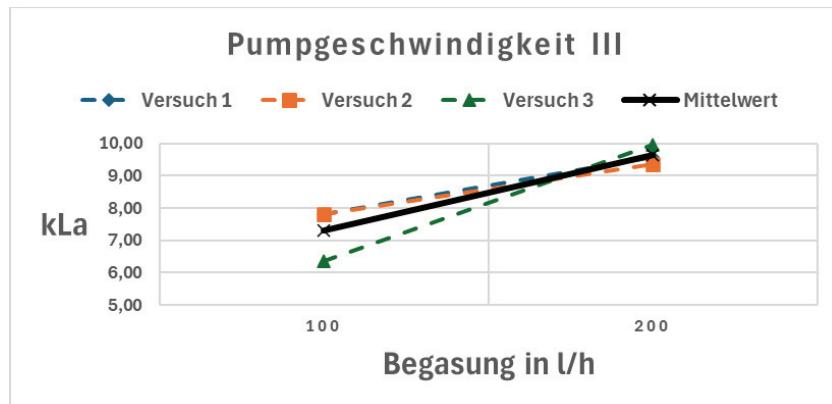
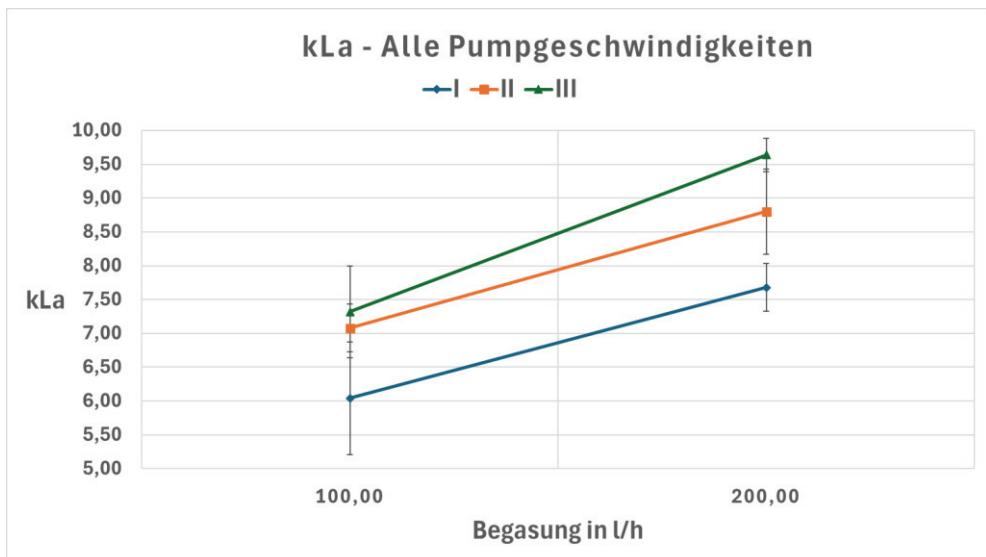


Abbildung 50: kLa Pumpgeschwindigkeit III



*Abbildung 51: kLa-Wert Alle Pumpgeschwindigkeiten*

Die Datenreihen, aus Abbildung 51, liegen jeweils auf ihren vorab erwarteten Niveaus, wobei der Wert von III, 100, im Vergleich zu I und II, etwas flacher ausfällt.

## 5 Interpretation

### 5.1 Einordnung des konstruierten PBR-Systems

Nach Torzillo & Chini Zittelli von 2015 handelt es sich bei einem richtig konzipierten Röhren-PBR, um eine Anlage, deren Grundfunktion es ist, eine kontrollierte Umgebung zu schaffen, um mit dem jeweils verwendeten Mikroalgenstamm ein optimales Biomassewachstum zu erreichen. Die Kernerfahrungen, die in der Literatur beschrieben sind, können in drei maßgeblichen Hauptfaktoren zusammengefasst werden, die eine Kultivierung in ihrer Leistung beeinflussen. Im Wesentlichen geht es dabei um den Rohrdurchmesser, die Rohrstrecke sowie den Mischmechanismus. Im Zuge der immer weiter voranschreitenden PBR-Design Beforschung, zeichnen sich viele Indizien und Beobachtungen ab, die eine bestimmte Bauteil-Lösung entweder empfehlen oder von ihr abraten.

Der Rohrdurchmesser stellt eine Hauptentscheidung im Planungsprozess dar. Von ihm hängen erfolgsrelevante Parameter, wie das A/V-Verhältnis, die Lichtverfügbarkeit, die Biomassedichte, das Temperaturprofil der Kultur, die Sauerstoffkonzentration sowie die CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität des Reaktors, ab. Dabei ist es nicht zu empfehlen Durchmesser von unter 5 cm zu wählen, wie Kobayashi und Fujita 1997 herausfanden. Die Autoren untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Durchmesser in Bezug auf die Biomasse-Produktivität und stellten fest, dass die höhere Produktivität von Röhren mit kleinen Durchmessern nicht ausreicht, um die geringen Volumenausbeuten zu kompensieren. Größere Durchmesser bieten demnach, aufgrund ihrer höheren Füllkapazität, eine überlegenere Ausbeute bei verringriger Produktivität.

Um eine Einordnung des konstruierten Systems (grün markiert) in diesem Kontext zu ermöglichen, wurden die von Torzillo und Chini Zittelli 2015 zur Verfügung gestellten technischen Daten von Reaktoren mit unterschiedlichen Rohrinnendurchmessern herangezogen, wie in Tabelle 14 verdeutlicht.

Tabelle 14: Vergleich technischer Daten mit anderen Röhren-PBRs in Bezug auf den sich ändernden Rohrinnendurchmesser (Torzillo & Chini Zittelli, 2015)

Rohrinnen-Durchmesser [cm]	Reaktor-Volumen [l]	Rohrstrecken-Länge [m]	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	Rohraußefläche [m <sup>2</sup> ]	Volumen pro Grundfläche [l/m <sup>2</sup> ]	A/V-Verhältnis [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
2,50	19,6	40,00	1,00	0,980	19,6	50
5,00	39	19,90	1,00	0,975	39	25
<b>6,06</b>	<b>70</b>	<b>15,85</b>	<b>1,84</b>	<b>2,690</b>	<b>38</b>	<b>~ 38</b>
7,40	58	13,49	1,00	0,986	58	17
13,10	100,5	7,56	1,00	1,005	102	10
14,00	110	7,14	1,00	0,990	110	9

Für einen direkten Vergleich lohnt es sich, die Ausführung mit einem Durchmesser von 5 cm zu verwenden, da sie dieser Arbeit am ähnlichsten ist. Es fällt auf, dass ein fast identisches Volumen pro Grundfläche besteht. Die räumlichen Dimensionen der beiden Reaktoren sind also als korrespondierend zu betrachten, was die Vergleichbarkeit zueinander unterstreicht. Weiterhin kann das Ausmaß des A/V-Verhältnisses begutachtet werden. Hier präsentiert sich der in dieser Arbeit konstruierte PBR ( $38 \text{ m}^2/\text{m}^3$  vs.  $25 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) etwas besser, was auf die höhere Bebauungsfläche ( $1,84 \text{ m}^2$  vs.  $1 \text{ m}^2$ ) zurückgeführt werden kann. Nutzt man das in dieser Arbeit bereits unter 3.3.1 angewendete Verhältnis des A/V-Verhältnis pro  $\text{m}^2$  Grundfläche wird dementsprechend ersichtlich, dass der Vergleichs-Reaktor seine photosyntheseaktive Fläche auf einer geringeren Grundfläche bereitstellt ( $25 \frac{\text{m}^2/\text{m}^3}{\text{m}^2}$  vs.  $20,88 \frac{\text{m}^2/\text{m}^3}{\text{m}^2}$ ) als das System dieser Arbeit. Sichtbar ist zudem das weitere Potential zur Aufstockung der Glasröhren-Anzahl des PBRs. Der Vergleichsreaktor stellte mit kleinerem Rohrinnendurchmesser sowie mit fast halb so großer Grundfläche ein ähnliches Volumen pro Grundfläche zur Verfügung, was das zusätzliche kapazitive Potential des Systems dieser Arbeit hervorhebt. Analog zu Tabelle 14 werden in der Literatur Werte für den Rohrinnendurchmesser von 5 bis 9 cm empfohlen (Brindley et al., 2004). Dieser Reaktor bewegt sich mit 6,06 cm also in einem äußerst günstigem Maß, da dieser Wert im unteren Bereich zu verorten ist und geringere Rohrdurchmesser generell eine höhere Produktivität bieten. Zudem muss erwähnt werden, dass ein zu kleiner Durchmesser den Druck, mit welchem das Medium gepumpt wird, in Bezug auf die Höhe stark abmindert, sodass die Fließgeschwindigkeit in oberen Abschnitten werden kann.

Ein weiteres System kann für vergleichende Zwecken von Torzillo et al. 1993 herangezogen werden. Dieser Röhren-Photobioreaktor wurde auf  $7,8 \text{ m}^2$  verbaut und zeichnete sich durch einen Rohrinnendurchmesser von 2,6 cm, einer Rohrstreckenlänge von 245 m und einem Volumen von 145 l aus. Daraus ergeben sich eine Röhren-Außenfläche von  $20,01 \text{ m}^2$  und ein A/V-Verhältnis von  $138 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , was ein sehr hohes Gütemaß ist. Pro  $\text{m}^2$  Grundfläche stellt dieses System desweiteren  $17,69 \text{ m}^2$  Rohr-Außenfläche pro  $\text{m}^3$  Reaktorvolumen zur Verfügung. Auch hier können wertvolle Information für diese Arbeit gewonnen werden. Torzillo et al.'s Reaktor stellt 145 l auf  $7,8 \text{ m}^2$  bereit, was ein Verhältnis von  $18,59 \text{ l/m}^2$  ausmacht. Im Vergleich dazu bringt es die Anlage dieser Arbeit auf  $38,04 \text{ l/m}^2$ . Es zeigt sich, dass der Anlage insgesamt eine hohe Komprimierung aller baulich entscheidenden Komponenten attestiert werden kann. Er stellt sich als sehr flächeneffizient dar, was auch der Vergleich zum größten PBR Deutschlands in Klötze ( $50 \text{ l/m}^2$ ) zeigt, mit welchem man auf einem ähnlichen Niveau liegt. Der Fakt, dass eine Aufstockung der Glasröhren-Anzahl (max.

2) durchaus möglich ist, unterstreicht dies weiterhin. Geht man davon aus, dass eine Erweiterung mit zwei Glasröhren stattfindet, steigt das Reaktorvolumen auf bis zu 80 l, wodurch das Volumen/Grundfläche-Verhältnis auf bis zu 43 l/m<sup>2</sup> und die Glasröhren-Außenfläche auf bis zu 3,26 m<sup>2</sup> ansteigen könnte. Hieraus würde sich ein A/V-Verhältnis von 40,75 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ergeben. Das eine Erweiterung möglich bzw. nötig sein könnte, zeigt der Blick auf die von Torzillo et al. entworfene Anlage, die eine Rohrstrecke von 245 m auf 7,8 m<sup>2</sup> verbauen konnte. Hier ergibt sich ein Verhältnis von 31,4 m/m<sup>2</sup>, was sich im Vergleich zum Reaktor dieser Arbeit (8,61 m/m<sup>2</sup>) als klar überlegen darstellt. Trotz des bedeutend kleineren Rohrdurchmessers bei Torzillo, wodurch mehr vertikaler Raum für die Installation von Rohrstrecke frei ist, lässt dies die Vermutung zu, dass ein Anbau von zwei Glasröhren sinnvoll wäre.

Auch die Vermischung hat einen großen Einfluss auf die Produktivität. Sie ist notwendig, um sicherzustellen, dass alle Zellen mit Licht sowie Nährstoffen versorgt sind und sich keine Gradienten in pH, Temperatur sowie Licht- und Substratversorgung ausbilden. Um ein System zu evaluieren, ist die Mischzeit ein wesentlicher Parameter. Die Zunahme der Mischzeit steht dabei eindeutig in Zusammenhang mit der Zunahme der Länge des Röhren-PBRs. Je länger Dieser ist, desto länger sind die Zyklen die eine Volumeneinheit braucht, um einen vollständigen Kreislauf zu vollziehen. Hier muss eine geeignete Auswahl getroffen werden, die mit der verfahrenstechnischen Leistungsfähigkeit konform ist. Wird die Anlage zu lang konzipiert, droht eine erheblich höhere Mischzeit. Lange Mischzeiten können weiterhin zu einer übermäßigen Ansammlung von O<sub>2</sub> im Reaktor führen und das Wachstum hemmen (Oncel & Sabankay, 2012). Unter Berücksichtigung dieses Verhaltens, ist der Reaktor dieser Arbeit, in seiner Funktion als technikumsmaßstäbliche Anlage als geeignet skaliert zu benennen, da er eine komprimierte Bauform mit einer Länge von 2,3 m und einer Rohrstreckenlänge von 15,85 m aufzuweisen hat. Das enthaltene Reaktorvolumen hat so nur eine geringe Strecke zurückzulegen, um einen gesamten Zyklus abzuschließen. Weitere Ausführungen zur Mischzeit finden sich in 5.2.

## 5.2 Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Versuchsdurchführung sowie -auswertung für die Mischzeit gestaltete sich als schwierig. Grund dafür waren einerseits die langen Mischzeiten, die durch die Zirkulationszyklen durch das System bedingt sind, und andererseits die unregelmäßige Bauform, welche ein gängiges Problem bei der optischen Begutachtung von Röhren-PBRs darstellt. Bei der Videoprozessierung wurde zunächst mit einer Bildentnahme von 1/3 Bildern pro Sekunde

gearbeitet, also alle drei Sekunden ein Bild. Dabei fiel auf, dass detektierte Mischzeiten sich sehr oft gleichten, da das Auswertungsverfahren nur eine Datenpräzision von drei Sekunden aufwies, was in Abbildung 52 nachverfolgt werden kann. Es ist zu sehen, dass das Bild rechts im Vergleich zum linken Bild streckenmäßig schon sehr weit fortgeschritten ist, wodurch die Zeitspanne zwischen beiden Bildern in den Messwerten verloren geht.



Abbildung 52: optische Entwicklung zweier nacheinander extrahierter Bilder während der ersten Auswertung (Eigene Aufnahmen)

Außerdem gestalteten sich die Werte für die Histogramms-Standardabweichung als zu „löchrig“, was eine Dokumentation eines genauen Datenverlaufs erschwerte. Daher wurde der gesamte Prozess mit einer Bildentnahme von einem Bild pro Sekunde wiederholt. Dies erwies sich im Nachgang als eine Entscheidung mit positiver Wirkung. Jedoch kann die Rate der extrahierten Bilder noch weiter erhöht werden, um die Verlaufsaufzeichnung noch detaillierter darzustellen. Eine weitere Stellschraube, die in dieselbe Kerbe schlägt findet sich in dem verwendeten Aufnahmegerät. Hier ist eine Steigerung der Qualität durch die Nutzung einer High-End-kamera möglich. Dies produziert wesentlich hochwertigere Bilder, welche mehr Pixel für die Helligkeitsauswertung über „GIMP“ bietet. Zudem ist die Aufnahme von mindestens 50 Bildern pro Sekunde möglich, was im Vergleich zum in dieser Arbeit verwendeten iPhone (30 Bilder pro Sekunde) einen Mehrwert darstellt. Für die Speicherung der dadurch steigenden Datenmengen ist eine größere SSD-Festplatte ratsam. Durch die Nutzung einer besseren Kamera und einer gleichzeitigen höheren Bildextraktionsrate könnte eine Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit erzielt werden.

Des Weiteren wurde unter 4.1 ausführlich erklärt, wie es bereits bei geringfügiger Änderung der Histogramms-Standardabweichung zu erheblichen Unterschieden in der Mischzeitdetektion kommen kann. Ein Ansatz, um dieses Problem zu lösen, könnte sein, die Standardabweichung mit vier Nachkommastellen anzeigen zu lassen. Dabei würden keine Auf- oder Abrundungen mehr passieren und die sehr feinfühlige Skala würde etwas konkretisiert werden. Im Lauf der Auswertung konnte keine Möglichkeit gefunden werden, auf vier Nachkommastellen umzustellen. Weitere Recherchen dazu könnten eine Lösung ermöglichen.

Generell war auffällig, dass es teils hohe Messergebnisunterschiede innerhalb einer Triplikatsreihe gab (Bsp. II, 0: 03:05, 02:18 und 02:17). Diese Messunsicherheit kann, für eine sichere Validierung der messwertgebundenen Auswertungs-Methodik, in nachfolgenden Versuchen minimiert werden, indem testweise eine deutlich höhere Zahl von Wiederholungsdurchgängen (5 – 10) realisiert wird. Das Mittel aller Ergebnisse hat dann eine höhere Aussagekraft und möglicherweise fallen während der Begutachtung kritische Einflüsse ins Auge, die eine Messunsicherheit verursachen können.

*Tabelle 15: Zusammengefasste Mischzeit-Ergebnisse der messwertgebundenen Auswertung*

	Pumpgeschwindigkeit I			Pumpgeschwindigkeit II			Pumpgeschwindigkeit III		
<b>0 l/h</b>	03:47	03:47	03:47	03:05	02:18	02:17	02:45	03:30	03:27
<b>100 l/h</b>	(03:34)	02:38	02:37	02:59	02:12	02:14	02:39	02:36	02:36
<b>200 l/h</b>	02:35	02:33	02:33	02:10	02:11	02:09	-	02:30	02:34

Tabelle 15 zeigt zusammenfassend alle Mischzeit-Ergebnisse der durchgeföhrten Versuche. Eine sichere Auswertung dieser Werte wird durch hohe interne Abweichungen erschwert. Die aufgestellte These, dass sowohl Pumpgeschwindigkeit als auch Begasungsrate einen durchmischungsfördernden Effekt haben, welcher sich in einer kürzeren Mischzeit äußert, kann durch die messwertgebundene Auswertung dadurch nur bedingt bestätigt werden. Es kann jedoch ein generelles Mischzeitniveau in einen Raum von 03:47 bis 02:10 verortet werden. Die Versuche der Pumpgeschwindigkeit II fallen derweil markant gering aus. Es kann zwar nicht gesichert gesagt werden, dass diese Parameterkonfigurationen den endgültig zuträglichsten Einfluss auf die Mischzeit haben, aber ein deutlich niedrigeres Ergebnisfeld ist festzustellen. Eine spürbare Verbesserung führte die Begasung bei Pumpgeschwindigkeit I herbei. Die Mischzeiten konnten sowohl von I, 0 auf I, 100 als auch geringfügig von I, 100 auf I, 200 verringert werden, was eine aktive Wirkung der Begasungsrate herausstellt. Ähnlich verhält es sich mit der Mischzeit beim Blick auf die dritte Pumpgeschwindigkeit, die von III, 0 auf III, 100 um etwa 40 Sekunden abfällt. Um einen vergleichenden Blick auf die Messwerte zu haben, können die in dieser Arbeit visuell beurteilten Empfindungen herangezogen werden. Eine wissenschaftliche Belastbarkeit dieser Einschätzung ist dabei, aufgrund der vorhandenen Subjektivität nicht gegeben. Allerdings sind die entsprechenden Ergebnisse untereinander vergleichbar, da immer nach demselben Muster bewertet wurde. Tabelle 16 zeigt die zugehörigen Werte für die Mischzeiten nach visueller Einschätzung.

Tabelle 16: Zusammengefasste Mischzeit-Ergebnisse der visuellen Auswertung

	Pumpgeschwindigkeit I			Pumpgeschwindigkeit II			Pumpgeschwindigkeit III		
<b>0 l/h</b>	03:59	03:58	04:00	03:22	03:20	03:20	03:43	03:43	03:38
<b>100 l/h</b>	03:41	03:40	03:45	03:16	03:13	03:14	02:48	02:47	02:45
<b>200 l/h</b>	03:40	03:41	03:46	03:11	03:10	03:11	-	02:46	02:46

Auffällig sind die Unterschiede in der Pumpgeschwindigkeit von II, 0 und III, 0. Bei keiner Begasung scheint II einen günstigeren Förderungszyklus bereitzustellen als III, weshalb eine höhere Mischzeit bei letztgenannter resultiert. Der ebenfalls in Tabelle 15 sichtbaren Analogie kann also eine gewisse Sicherheit zugesprochen werden. Bei einsetzender Begasung verschiebt sich der Förderungszyklus wahrscheinlich, weshalb von III, 0 auf III, 100 eine signifikant kleinere Mischzeit die Folge ist. Bei der visuellen Betrachtung fällt zudem auf, dass eine Erhöhung von 100 auf 200 l/h Gaszufuhr keine weitere Verbesserung der Mischzeit mehr herbeiführt.

Um einen Vergleich aus der Literatur umzusetzen, wurde der horizontale Röhren-PBR von Xu et al. von 2021 ausgewählt. Dieser setzt sich aus sechs 100cm-Röhren mit je einem Durchmesser von 2,5 cm zusammen und wurde durch eine Pumpe der Leistung 25 W angetrieben. Die Autoren untersuchten den Einfluss von CO<sub>2</sub>-Mikrobläschen-Dissolvern (CMD) auf die Erhöhung der Mikroalgenbiomasse-Produktivität. Für die Zwecke dieser Arbeit wurden nur enthaltene Messungen für die Mischzeit entnommen. Diese befinden sich in einem Rahmen von 600 bis 660 Sekunden und variieren anhand der Begasungsrate nur minimal. Aufgrund der hohen Unterschiede kann kein direkter Vergleich stattfinden, denn es ist möglich, dass die Pumpe nicht ihre deklarierten 25 W ausgenutzt hat und auf einer sehr niedrigen Durchflussrate betrieben wurde. Ein weiterer Vergleich ist anhand der Werte für die Mischzeit des Reaktors von Sierra et al. von 2008 möglich. Hierbei handelt es sich allerdings um einen Flachplatten-Reaktor. Da dieser sehr ähnliche Dimensionen wie die Anlage dieser Arbeit vorzuweisen hat, wurde eine zusätzliche Einordnung durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Durchmischungsmechanik, muss auch hier beachtet werden, dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Ein dimensionaler Vergleich ist dennoch sinnvoll. Die Mischzeiten dieses Reaktors verhalten sich bei ähnlichen Begasungsraten fast gleich und betragen bei keiner Gaszufuhr 192 Sekunden [03:12] und bei einer Begasung von 100 l/h 170 Sekunden [02:50]. Bei einer Erhöhung auf 0,09 vvm, was etwa einer Begasungsrate von 325 l/h entspricht, kann demnach die Mischzeit auf 100 Sekunden [01:40] reduziert werden. Die Werte ähneln am ehesten des Durchgangs III, 0 und III, 100, wobei gesagt sein muss, dass bei dem

Vergleichsreaktor die Durchmischung aufgrund hoher Begasungsraten geschieht, was den heftigen Sprung auf 01:40 erklärt.

Um die Reynoldszahlen zu evaluieren kann erneut Bezug auf die von Torzillo & Chini Zittelli (2015) entworfenen Richtlinien für eine optimale Gestaltung von Röhren-PBRs genommen werden. Dort wird eine Reynoldszahl von über 4000 empfohlen, damit ein turbulentes Strömungsregime erzielt wird. Die Werte für diese Arbeit bewegen sich etwa zwischen 19000 und 27000, wodurch ein positiver Effekt auf die Volumenverteilung erreicht wird. Besonders in Anbetracht des Austausches der Mikroalgen zwischen Hell- und Dunkelräumen, ist eine ausreichend intensive Durchmischung entscheidend. Es bleibt zu klären, inwieweit sich der Pumpmechanismus bzw. die hohen Turbulenzen negativ auf das Biomassewachstum auswirken, denn zu hoher mechanischer Scherstress kann zum Absterben der Mikroalgen führen. Behlolav et al. untersuchten 2021 einen hybriden horizontalen Röhren-Reaktor mit einem Röhrendurchmesser von 12,5 cm. Dabei wurden Werte für die Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl aufgenommen. Es konnte ein Strömungsregime im Bereich von 17000 bis 23700 erfasst werden, was im Vergleich zu dieser Arbeit ein ähnliches Ausmaß darstellt. Der unter 5.1 beschriebene Reaktor von Torzillo et al. von 1993 bietet ebenfalls die Möglichkeit des Vergleichs. Das System verwendete drei Pumpgeschwindigkeiten (darunter  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sowie fünf Begasungsraten (darunter  $300 \text{ l/h}$ ) (Abbildung 53). Die Konfiguration, die Einer dieser Arbeit am meisten entgegengesetzt, ist die Durchsatzrate von  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  (diese Arbeit: Pumpgeschwindigkeit I bei  $2,61 \text{ m}^3/\text{h}$ ) gepaart mit der Gaszufuhr von  $300 \text{ l/h}$  (Versuch I, 200 am ähnlichsten). Der Wert für die Reynoldszahl dieser Konfiguration liegt bei etwa 8000, während die Reynoldszahl für I, 200 bei 20847 liegt. Der deutliche Unterschied kommt vermutlich durch die erhöhte Pumpgeschwindigkeit zustande. Erwähnt muss werden, dass bei dem Vergleichsreaktor ein halb so großer Rohrinnendurchmesser existiert und die  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  eine höhere Fließgeschwindigkeit verursachen.

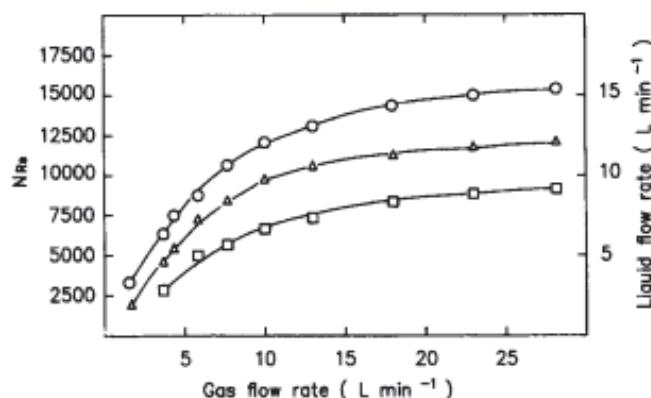


Abbildung 53: Entwicklungen der Reynoldszahlen in Abhängigkeit der Begasungs- und Durchflussrate (Torzillo et al., 1993)

Die Versuche der kLa-Bestimmung liefen grundlegend komplikationslos. Durch die heftige Ausgasung mit 1000 l/h Stickstoff konnte die Wartezeit, bis die gelöste Sauerstoffkonzentration im System auf unter 1 % fiel, minimiert werden. Es konnten kLa-Koeffizienten von 6,04 bis 9,64 erfasst werden, wobei die Werte mit steigender Pumpgeschwindigkeit sowie Begasungsrate zunahmen. Dies geschieht nach Definition, denn der kLa, der Stoffübergangskoeffizient von Gas- zu einer Flüssigphase, verändert sich gemäß des Strömungsregimes sowie des Gas-Volumenstroms. Eine Einordnung bietet der von Rubio et al. 1999 beschriebene Röhren-Reaktor. Dieser maß eine Rohrstreckenlänge von 100 m und einen Rohrinnendurchmesser von 5 cm. Das Gesamtreaktorvolumen belief sich auf 200 l. Die Autoren nutzten Massenbilanzmodelle für das Prognostizieren von Stoffströmen und waren so in der Lage Werte für den kLa in verschiedenen Bauteilen zu erahnen. Anschließend wurden diese Maße aufaddiert, wodurch der Gesamt-kLa resultierte. Sie berichteten, dass die kLa-Werte für den horizontalen Kreislaufabschnitt der Anlage bei unterschiedlichen Durchflussraten zwischen 1,1 und 3,6 lagen. Die entsprechenden kLa-Werte für den Gasaufstiegsabschnitt lagen zwischen 69,5 und 107,3. Die aus ihren Daten berechneten Gesamt-kLa-Werte für den gesamten Photobioreaktor liegen zwischen 3,4 und 7,2. Das leicht niedrigere Niveau dieser Werte, im Vergleich zu dieser Arbeit, weist darauf hin, dass eine höhere Skalierung mit einander korrelierender Parameteränderungen einher geht. Diese ergeben sich aus dem höheren verfahrenstechnischen Leistungsbedarf, der aufgrund größerer Abmessungen und Geometrien sowie volumetrischen Kapazitäten eine Herausforderung darstellt. Der Reaktor von Xu et al., aus dem Jahr 2021 bietet ebenfalls Werte für den kLa. Hier handelte es sich um einen PBR mit sechs 1m-langer Röhren und Werte von 3,9 bis 4,9 wurden angegeben. Generell ordnet sich der Reaktor dieser Arbeit in diesem Hinblick in einen leicht oberen Abschnitt ein. Direkte Vergleiche sind dabei selten möglich, da sich entweder die Bauform, angewendete Durchfluss- sowie Begasungsraten oder die Bauteilskalierungen vieler Systeme zu sehr unterscheiden. Dennoch kann eine grobe Einordnung in die Praxislage vorgenommen werden.

## 6 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasste sich mit dem Ziel einen mobilen Röhren-PBR im Technikumsmaßstab bereitzustellen. Im Verlauf wurden alle einbezogenen Einflüsse sowie Planungsschritte festgehalten und erklärt, die zu jeweiligen Kaufentscheidungen führten. Das System besteht im Wesentlichen aus fünf Komponenten – dem Gestell („MiniTec“), dem Glasröhrensystem („Schott“), dem PVC-Rohrstreckensystem („HT CONNECT“), dem Vorlaufbehälter („Tanks Direkt“) sowie dem Pumpsystem („Xylem“). Es zeigte sich, dass die vollständige Anlage alle Voraussetzungen erfüllt, die für eine erfolgreiche Mikroalgen-Kultivierung erforderlich sind. Dennoch bedarf es weiterhin einiger optimierender Arbeiten, wie der Schließung einer geringfügigen Leckage am unteren Glasröhren-Eingang, der Aufstockung um zwei weitere Glasröhren, der Optimierung der Glasröhren-Auflageflächen oder dem Beseitigen des im Tank befindlichen Totraums. Als äußerst geeignet stellte sich das Messsonden-System heraus. Impfventile und Elektrodenhalter lassen sich entweder an der Zugangsbatterie oder der Tankwand beliebig bestücken, um eine umfangreiche Prozesskontrolle sowie eine angemessene Gasversorgung zu ermöglichen. Das Glasröhrensystem ist flexibel demontierbar und kann nach Bedarf wieder zusammengesetzt werden. Ähnlich verhält es sich mit dem Pumpgehäuse, dass über vier Eckschrauben für Wartungszwecke vom Förderkörper getrennt werden kann, ohne die Rohrstrecke auszubauen.

Um die internen Wirkweisen besser zu verstehen und zukünftige Kultivierungsläufe vorzubereiten, wurde eine verfahrenstechnische Charakterisierung der Anlage durchgeführt. Aufgenommen wurden technische Daten wie die Grundfläche, das Reaktorvolumen und das A/V-Verhältnis, Mischzeiten, Reynoldszahlen sowie der volumetrische Stoffübergangskoeffizient ( $kLa$ ). Wie der Vergleich mit der Literatur zeigte, handelt es sich bei dem Reaktor um ein flächeneffizientes Modell, dass in sehr komprimierter Form einen Großteil seiner photosynthetischen Fläche zur Verfügung stellt. In Bezug auf den  $kLa$ , die Mischzeiten sowie Reynoldszahlen, wurden die Einflüsse zweier maßgeblicher Parameter untersucht – die Pumpgeschwindigkeit und die Begasungsrate. Es konnten jeweils zuträgliche Effekte beobachtet werden, wobei es Einschränkungen bei der Belastbarkeit der Mischzeitwerte gab. Die Mischzeit wurde, nach Wurm und Sandmann von 2021, mit optischer Bestimmungsmethode untersucht. Es gab währenddessen Schwierigkeiten der unregelmäßigen Bauform des PBRs gerecht zu werden, um einen geeigneten repräsentativen Bildausschnitt bereitzustellen. Erhaltene Mischzeiten pegelten sich zwischen 03:47 und 02:17 ein. Eine Korrelation mit der Pumpgeschwindigkeit sowie der Begasungsrate konnte gezeigt werden.

Großer Vorteil der Methode von Wurm und Sandmann war es, parallel zur Mischzeit die Fließgeschwindigkeit messen zu können. Die Zeit, die die injizierte Farbe für einen Meter benötigt, wurde gemessen. Demgemäß resultierten Werte von 0,320 bis 0,453 m/s. Die Begasungsrate hatte, bei der Erhöhung von 0 l/h auf 100 l/h, einen beschleunigenden Effekt auf die Fließgeschwindigkeit. Bei einer Erhöhung von 100 auf 200 l/h war das nicht zu beobachten. Errechnete Reynoldszahlen verhielten sich proportional zu den Fließgeschwindigkeiten und liegen deutlich über der kritischen Grenze für einen Übergang in das turbulente Strömungsregime. Dieses Regime ist zu empfehlen, um eine spätere ungleichmäßige Lichtversorgung der Mikroalgen zu vermeiden. Der Austausch der Biomasse zwischen Hell- und Dunkelräumen stellt eines der Hauptprobleme in PBRs dar und muss mit geeigneter Lichtintensität sowie Durchmischung begegnet werden. Die kLa-Bestimmung richtet sich nach dem Verfahren von Meusel et al. von 2016. Dabei wurde eine intensive Ausgasung mit Stickstoff durchgeführt, um einen minimalen Wert für die Konzentration des gelösten Sauerstoffs zu erreichen. Mit Start der Druckluftversorgung begann der Aufzeichnungsprozess, der bei einer Sauerstoffkonzentration von etwa 90 % beendet wurde. Die Auswertung der Werte ergab einen Bereich von 6,04 bis 9,64 und befindet sich damit im Vergleich zur Literatur im oberen Abschnitt. Die Pump- sowie Begasungsrate hatten auch hier einen wesentlichen Einfluss. Vor allem die Erhöhung der Gaszufuhr wirkte sich fördernd aus.

Die wissenschaftliche Einordnung lässt insgesamt auf ein leistungspotentes System schließen, dass seinem Zweck des kontrollierbaren, stabilen Kultivierungsgefäßes gerecht werden kann. Es gilt nun während der zukünftigen Mikroalgenzucht kritische Parameter, wie die Produktivität pro Tag oder die gewonnene Trockenmasse pro m<sup>2</sup> Grundfläche, zu messen, die zu einer weiteren Vergleichbarkeit befähigen. Für die Auswahl geeigneter Prozessparameter-Konfigurationen, können Erkenntnisse aus der verfahrenstechnischen Charakterisierung dieser Arbeit mit einfließen, die bestimmte Optionen empfehlen. Die Analyse des Systems hat gezeigt, dass, technisch gesehen, eine hohe Durchflussrate ratsam ist, um den kLa zu erhöhen sowie die Mischzeit zu senken. Die Kombination aus Pumpgeschwindigkeit III (57,5 W) und einer Begasungsrate von 100 l/h stellt demnach die effektivste Variante dar, da bei einer weiteren Erhöhung auf 200 l/h kein lohnenswerter Mehrwert einhergeht. Der Einfluss der Pumpgeschwindigkeit auf den Scherstress ist dabei noch zu berücksichtigen. Darüber hinaus muss darauf hingewiesen werden, dass das Mischen etwa 30 % der Gesamtproduktionskosten von Biomasse darstellt (Norsker et al., 2011). Daher ist ebenfalls die Nutzung von Pumpgeschwindigkeit II (38 W) denkbar, wenn ein wirtschaftlicherer Betrieb angestrebt wird.

## Literaturverzeichnis

1. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A.: „Microalgae and wastewater treatment“, Saudi journal of biological science, Vol. 19, 2012
2. Acién, F. G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C. & Masojídek, J.: „Photobioreactors for the production of microalgae“, Microalgae-based biofuels and bioproducts, Woodhead Publishing, 2017
3. Al-Qasmi, M., Raut, N., Talebi, S., Al-Rajhi, S., & Al-Barwani, T.: „A review of effect of light on microalgae growth“, Proceedings of the world congress on engineering, Vol. 1, 2012
4. Aroniada, M., Maina, S., Koutinas, A., & Kookos, I. K.: „Estimation of volumetric mass transfer coefficient ( $kLa$ ) - Review of classical approaches and contribution of a novel methodology“, Biochemical Engineering Journal, Vol. 155, 2020
5. Belohlav, V., Uggetti, E., García, J., Jirout, T., Kratky, L., & Díez-Montero, R.: „Assessment of hydrodynamics based on Computational Fluid Dynamics to optimize the operation of hybrid tubular photobioreactors“, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 9, 2021
6. Bogan, R.H., Albertson, O.E. & Pluntze, C.: „Use of algae in removing phosphorus from sewage“, Journal of the sanitary Engineering Division, Vol. 86, 1960
7. Borowitzka, M. A. & Moheimani, N. R.: „Algae for biofuels and energy“, Vol. 5, Springer, Dordrecht, 2013
8. Brindley Alías, C., García-Malea López, M. C., Acién Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., García Sánchez, J. L., & Molina Grima, E.: „Influence of power supply in the feasibility of Phaeodactylum tricornutum cultures“, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 87, 2004
9. Brune, D.E., Lundquist, T.J. & Benemann, J.R.: „Microalgal biomass for greenhouse gas reductions: potential for replacement of fossil fuels and animal feeds“, Journal of Environmental Engineering, Vol. 135, 2009
10. Canfield, D.E.: „The early history of atmospheric oxygen: homage to Robert M. Garrels“, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 33, 2005
11. Chae, S. R., Hwang, E. J., Shin, H. S.: „Single cell protein production of Euglena gracilis and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor“, Bioresource Technology, Vol. 97, 2006
12. Chen, M., Tang, H., Ma, H., Holland, T. C., Ng, K. S., & Salley, S. O.: „Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae Dunaliella tertiolecta“, Bioresource technology, Vol. 102, 2011
13. Christi, Y.: „Biodiesel from microalgae“, Biotechnology Advances, Vol. 25, 2007
14. Darvehei, P., Bahri, P. A., & Moheimani, N. R.: „Model development for the growth of microalgae: A review“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 97, 2018
15. Dau, H., Kurz, P., Weitze, M. D.: „Künstliche Photosynthese: Besser als die Natur?“, Berlin, Springer, 2019
16. Dillehay, T.D., Ramirez C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J. & Pino-Navarro, J.D.: „Monte Verde: seaweed, food, medicine, and the peopling of South America“, science, Vol. 320, 2008

17. Earth System Science Data, Vol. 15: Friedlingstein, P. et al.: „Global Carbon Budget 2023“, 2023
18. Ejike, C. E., Collins, S. A., Balasuriya, N., Swanson, A. K., Mason, B., & Udenigwe, C. C.: „Prospects of microalgae proteins in producing peptide-based functional foods for promoting cardiovascular health“, Trends in Food Science & Technology, Vol. 59, 2017
19. Fabregas, J., Herrero, C.: „Vitamin content of four marine microalgae. Potential use as source of vitamins in nutrition“, Journal of Industrial Microbiology, Vol. 5, 1990
20. FAO, 2017: „The State of food security and nutrition in the world“, Building resilience for peace and food security, Rome (Zugriff am 21.08.2024)
21. FAO, 2020: „Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings“, Rome, <https://doi.org/10.4060/ca8753en> (Zugriff am 05.09.2024)
22. FAO, 2023: „Statistical Yearbook – World Food and Agriculture 2023“, Rome, <https://doi.org/10.4060/cc8166en> (Zugriff am 23.09.2024)
23. Fields, F. J., Lejzerowicz, F., Schroeder, D., Ngoi, S. M., Tran, M., McDonald, D. & Mayfield, S.: „Effects of the microalgae Chlamydomonas on gastrointestinal health“, Journal of Functional Foods, Vol. 65, 2020
24. Fuentes, M. R., Sánchez, J. G., Sevilla, J. F., Fernández, F. A., Pérez, J. S., & Grima, E. M.: „Outdoor continuous culture of Porphyridium cruentum in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters“, Industrial Microbiology, Vol. 35, Elsevier., 1999
25. Global CCS Institut: Steyn, M. et al., 2022: „Global Status of CCS 2022“: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2022/> (Zugriff am 06.09.2024)
26. Gorissen, S. H. M., Crombag, J. J. R., Senden, J. M. G., Waterval, W. A. H., Bierau, J., Verdijk, L. B., van Loon, L. J. C.: „Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates“, Amino Acids, Vol. 50, 2018
27. Griffiths, M. J., Harrison, S. T. L.: „Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production“, Journal of Applied Phycology, Vol. 21, 2009
28. Hallmann, A.: „Algae biotechnology–green cell-factories on the rise“, Current Biotechnology, Vol. 4, 2015
29. IEA, 2024: „The global power mix will be transformed by 2028“: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (Zugriff am 05.09.2024)
30. IPCC, 2018: „Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty“
31. IPCC, 2019: „Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems“

32. Jabeen, A., Reeder, B., Hisaindee, S., Ashraf, S., Al Darmaki, N., Battah, S. & Al-Zuhair, S.: „Effect of Enzymatic pre-treatment of microalgae extracts on their anti-tumor activity“, Biomedical journal, Vol. 4, 2017
33. Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M., & Ghirardi, M. L.: „Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors“, Bioresource technology, Vol. 101, 2010
34. Kazbar, A., Cogne, G., Urbain, B., Marec, H., Le-Gouic, B., Tallec, J. & Pruvost, J.: „Effect of dissolved oxygen concentration on microalgal culture in photobioreactors“, Algal Research, Vol. 39, 2019
35. Kirst, G. O.: „Salinity tolerance of eukaryotic marine algae“, Annual review of plant biology, Vol. 41, 1990
36. Klausmeier, C. A., Litchman, E., & Levin, S. A.: „Phytoplankton growth and stoichiometry under multiple nutrient limitation“, Limnology and oceanography, Vol. 49, 2004
37. Kobayashi, K. & Fujita, K.: „Tube diameter on tubular photobioreactor for microalgal culture and its biomass productivity“, Journal of chemical engineering of Japan, Vol. 30, 1997
38. Koller, M., Muhr, A., Braunegg, G.: „Microalgae as versatile cellular factories for valued products“, Algal Research, Vol. 6, 2014
39. Kumar, S., Kumar, R., Diksha, Kumari, A., & Panwar, A.: „Astaxanthin: A super antioxidant from microalgae and its therapeutic potential“, Journal of Basic Microbiology, Vol. 62, 2022
40. Lauritano, C., Andersen, J. H., Hansen, E., Albrigtsen, M., Escalera, L., Esposito, F. & Ianora, A.: „Bioactivity screening of microalgae for antioxidant, anti-inflammatory, anticancer, anti-diabetes, and antibacterial activities“, Frontiers in marine science, Vol. 3, 2017
41. Lausitzer Rundschau, Seyfert, R., 2023: „Wie die Blaualge Spirulina im Kampf gegen Leberkrebs helfen soll“, BTU Senftenberg: <https://www.lr-online.de/lausitz/senftenberg/krebsforschung-an-der-btu-in-senftenberg-wie-die-blaualge-spirulina-im-kampf-gegen-leberkrebs-helfen-soll-68859695.html> (Zugriff am 10.10.2024)
42. Matsuda, F., Hayashi, M., Kondo, A.: „Comparative Profiling Analysis of Central Metabolites in Euglena gracilisunder Various Cultivation Conditions“, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, Vol. 75, 2011
43. Meusel, W., Löffelholz, C., Husemann, U., Dreher, T., Greller, G., Kauling, J., Kleebank, S.: „Recommendations for process engineering characterisation of single-use bioreactors and mixing systems by using experimental methods“, Dechema, Frankfurt am Main, 2016
44. Muñoz, R. & Gonzalez-Fernandez, C.: „Microalgae-based biofuels and bioproducts: from feedstock cultivation to end-products“, Woodhead Publishing, Cambridge, 2018
45. Nauha, E. K., & Alopaeus, V.: „Modeling method for combining fluid dynamics and algal growth in a bubble column photobioreactor“, Chemical engineering journal, Vol. 229, 2013
46. Nishida, Y., Berg, P.C., Shakersain, B., Hecht, K., Takikawa, A., Tao, R. & Maoka, T.: „Astaxanthin: past, present, and future“, Marine Drugs, Vol. 21, 2023

47. NOAA, climate.gov, 2024: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (Zugriff am 04.09.2024)
48. Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H.: „Microalgal production—a close look at the economics“, Biotechnology advances, Vol. 29, 2011
49. Oncel, S., Sabankay, M.: „Microalgal biohydrogen production considering light energy and mixing time as the two key features for scale-up“, Bioresource Technology, Vol. 121, 2012
50. Pires, J.C.M., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Simões, M.: „Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, 2012
51. Posten, C.: „Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae“, Engineering in Life Sciences, Vol. 9, 2009
52. Qiu, R., Gao, S., Lopez, P. A. & Ogden, K. L.: „Effects of pH on cell growth, lipid production and CO<sub>2</sub> addition of microalgae Chlorella sorokiniana“, Algal research, Vol. 28, 2017
53. Rahmstorf, S. & Neu, U.: „Klimawandel und CO<sub>2</sub>: haben die Skeptiker recht?“, Institut für Klimafolgenforschung, 2004
54. Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H. J.: „Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie“, München, C.H. Beck, 8. Auflage, 2018
55. Rai, M. P., Gautam, T., & Sharma, N.: „Effect of salinity, pH, light intensity on growth and lipid production of microalgae for bioenergy application“, Journal of Biological Sciences, Vol. 15, 2015
56. Ranganathan, P., Pandey, A. K., Sirohi, R., Hoang, A. T. & Kim, S. H.: „Recent advances in computational fluid dynamics (CFD) modelling of photobioreactors: Design and applications“, Bioresource technology, Vol. 350, 2022
57. Ranglová, K., Bureš, M., Manoel, J. C., Lakatos, G. E., & Masojídek, J.: „Efficient microalgae feed production for fish hatcheries using an annular column photobioreactor characterized by a short light path and central LED illumination“, Journal of Applied Phycology, Vol. 34, 2022
58. Ras, M., Steyer, J. P., & Bernard, O.: „Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production“, Reviews in environmental science and bio/technology, Vol. 12, 2013
59. Redfern, M.: „Eiszeiten. 50 Schlüsselideen Erde“, Berlin, Springer Spektrum, 2014
60. Rosenwinkel, K.H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.F. & Weiland, P.: „Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm-und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung.“, Berlin, Springer-Verlag, 3. Auflage, 2015
61. Rubio, F. C., Fernández, F. A., Pérez, J. S., Camacho, F. G., & Grima, E. M.: „Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture“, Biotechnology and bioengineering, Vol. 62, 1999
62. Shen, Y., Yuan, W., Pei, Z. J., Wu, Q., & Mao, E.: „Microalgae mass production methods“, Transactions of the ASABE, Vol. 52, 2009

63. Sierra, E., Acién, F. G., Fernández, J. M., García, J. L., González, C., & Molina, E.: „Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae“, Chemical Engineering Journal, Vol. 138, 2008
64. Sigl, M., Winstrup, M. et al.: „Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2500 years“, Nature 523, 2015
65. Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. & Isambert, A.: „Commercial applications of microalgae“, Journal of bioscience and bioengineering, Vol. 101, 2006
66. Sprague, M., Betancor, M. B. & Tocher, D. R.: „Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds“, Biotechnology letters, Vol. 39, 2017
67. Swanson, D., Block, R., Mousa, S. A.: „Omega-3 Fatty Acids EPA and DHA: Health Benefits Throughout Life“, Advances in Nutrition, Vol. 3, 2012
68. Szabo, N.J., Matulka, R.A. & Chan, T.: „Safety evaluation of whole algalin protein (wap) from Chlorella prothotheocoides“, Food and chemical toxicology, Vol. 59, 2013
69. Thünen, Institut für Waldökosysteme: „Projekt Bundeswaldinventur 2024“: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldökosysteme/projekte/waldmonitoring/projekte-bundeswaldinventur/bundeswaldinventur> (Zugriff am 09.10.2024)
70. Torres-Tiji, Y., Fields, F.J., Mayfield, S.P.: „Microalgae as a future food source“, Biotechnology Advances, Vol. 41, 2020
71. Torzillo, G. & Chini Zittelli, G.: „Tubular photobioreactors“, Algal biorefineries, Vol. 2, 2015
72. Torzillo, G., Carlozzi, P., Pushparaj, B., Montaini, E., & Materassi, R.: „A two-plane tubular photobioreactor for outdoor culture of Spirulina“, Biotechnology and bioengineering, Vol. 42, 1993
73. Wang, C., & Lan, C. Q.: „Effects of shear stress on microalgae—A review“, Biotechnology Advances, Vol. 36, 2018
74. WHO, J.: „Protein and amino acid requirements in human nutrition“, World Health Organization technical report series, Nr. 935, Singapur, 2007
75. Wu, L. F., Chen, P. C., & Lee, C. M.: „The effects of nitrogen sources and temperature on cell growth and lipid accumulation of microalgae“, International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 85, 2013
76. Wurm, H. & Sandmann, M.: „Establishment of a simple method to evaluate mixing times in a plastic bag photobioreactor using image processing based on freeware tools“, BMC Research Notes, Vol. 14, 2021
77. Xu, J., Cheng, J., Wang, Y., Yang, W., Park, J. Y., Kim, H., & Xu, L.: „Strengthening CO<sub>2</sub> dissolution with zeolitic imidazolate framework-8 nanoparticles to improve microalgal growth in a horizontal tubular photobioreactor“, Chemical Engineering Journal, Vol. 405, 2021
78. Yeo, U. H., Lee, I. B., Seo, I. H., & Kim, R. W.: „Identification of the key structural parameters for the design of a large-scale PBR“, biosystems engineering, Vol. 171, 2018

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Gestell-Bauteile der Firma "MiniTec" mit Artikelnummern .....	30
Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Röhren-PBR-Bauteile mit Artikelnummern.....	31
Tabelle 3: Technische Daten des verwendeten Vorlaufbehälters mit Artikelnummer .....	32
Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Pumpe mit Artikelnummer .....	33
Tabelle 5: Verwendete Rohrleitungs-Bauteile der Firma „HT CONNECT“ mit Artikelnummern .....	34
Tabelle 6: Technische Daten des konstruierten Röhren-PBR-Systems.....	53
Tabelle 7: Versuchsplan Mischzeitbestimmung mit jeweiligen Durchgangsbezeichnungen.....	54
Tabelle 8: Versuchsplan kLa-Bestimmung mit jeweiligen Durchgangsbezeichnungen .....	61
Tabelle 9: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit I.....	63
Tabelle 10: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit II .....	65
Tabelle 11: Versuchsergebnisse Mischzeit Pumpgeschwindigkeit III .....	66
Tabelle 12: Ergebnisse für Fließgeschwindigkeit und Reynoldszahl.....	68
Tabelle 13: Ergebnisse kLa .....	70
Tabelle 14: Vergleich technischer Daten mit anderen Röhren-PBRs in Bezug auf den sich ändernden Rohrinnendurchmesser (Torzillo & Chini Zittelli, 2015).....	72
Tabelle 15: Zusammengefasste Mischzeit-Ergebnisse der messwertgebundenen Auswertung .....	76
Tabelle 16: Zusammengefasste Mischzeit-Ergebnisse der visuellen Auswertung .....	77
Abbildung 1: CO <sub>2</sub> -Ausstoß der letzten 800.000 Jahren bis heute (NOAA, 2024) .....	7
Abbildung 2: Weltweite Anteils-Entwicklungen der Gesamtstrom-Bereitstellung durch erneuerbare Energien (IEA, 2023) .....	9
Abbildung 3: Arthrospira platensis (Spirulina) unter dem Mikroskop (Lausitzer Rundschau, Senftenberg, 2023) .....	14
Abbildung 4: Übersicht: Wirtschaftszweige der Mikroalge eingeteilt nach genutzten Rohstoffen (Sea & Sun Organic, 2024) .....	16
Abbildung 5: Gegenüberstellung der Drei verschiedenen Open-Pond-Bauarten (Rennbahnteich, Rundbecken, Flacher Teich v.l.n.r.) (Shen et al., 2009).....	21
Abbildung 6: Gegenüberstellung der Vier wesentlichen PBR-Bauarten (Flachplatten-PBR, Blasensäulen-PBR, Ring-PBR und Röhren-PBR v.l.n.r.) (Hallmann, 2015).....	23
Abbildung 7: Initialer Anlagenplan (Eigene Skizze) .....	28
Abbildung 8: Profilsystem der Streben; Montageprinzip von Zylinderschrauben; Montageprinzip von Hammerschrauben (v.l.n.r.) (mittig: Eigene Aufnahme; links und rechts: minitec.de).....	30
Abbildung 9: Glasröhren der Firma „Schott AG“ mit Kupplung als Verbindungselement (schott.com) .....	32
Abbildung 10: Pumpen-Demontage für Wartungszwecke durch Entfernen der vier Sechskant-Schrauben (Eigene Aufnahmen) .....	34
Abbildung 11: Erste Schritte der Gestell-Konstruktion (Eigene Aufnahmen) .....	37
Abbildung 12: Vorbereitung und Installation des Glasröhren-Systems auf dem Gestell (Eigene Aufnahmen) ...	38
Abbildung 13: Vollständig eingeführte Röhre und Drehrichtung zum Festziehen der blauen Schott-Kupplungen (Eigene Aufnahme) .....	38

Abbildung 14: Installierte Röhrenfixierung mithilfe der Gummi-Puffer; Öffnung der Zugangs-Versiegelung am Tank und angebrachter Probenahme-Hahn (v.l.n.r.) (Eigene Aufnahmen).....	39
Abbildung 15: Anpassung des Gestells und angebrachte Installationen am Vorlaufbehälter (Eigene Aufnahmen) .....	39
Abbildung 16: Installations-Reihenfolge der Tankdurchführungen für Messsonden und Überdruckventil (Eigene Aufnahmen) .....	40
Abbildung 17: Stift-Herstellungsprozess für die Röhrenstrecken-Konstruktion (Eigene Aufnahmen) .....	40
Abbildung 18: Bauteil-Anpassungen, um platz einschränkenden Gegebenheiten gerecht zu werden (Eigene Aufnahmen) .....	41
Abbildung 19: Prozess der Stift-Verklebung mit einer Klebemuffe (Eigene Aufnahmen).....	41
Abbildung 20: Verdickung des Rohrdurchmessers mit Gaffer Tape (Eigene Aufnahmen) .....	42
Abbildung 21: Eingebaute Rohrdurchmesser-Verjüngungen mithilfe der Schott-Kupplungen (Eigene Aufnahmen) .....	42
Abbildung 22: Anschlussoptionen für die Messstation bzw. Zugangs-Batterie (Eigene Aufnahmen) .....	42
Abbildung 23: Vollständige Schließung des Kreislaufes (Eigene Aufnahme) .....	43
Abbildung 24: Vollständige Anlage nach Fertigstellung aller baulichen Maßnahmen (Eigene Aufnahme) .....	43
Abbildung 25: Abbau der Glasmäntel bis zum für die Undichtigkeit verantwortlichen Bauteil (Eigene Aufnahmen) .....	46
Abbildung 26: Überstülpen des Kupplungs-Gummis für die Verbindung zweier Glasmäntel (schott.com, 2024).....	47
Abbildung 27: Installationshinweise zu den Endkappen, Elektrodenhaltern und Impfventilen (Eigene Aufnahmen) .....	50
Abbildung 28: Relevante Maße zur Berechnung der Mantelfläche eines U-Stückes (Eigene Grafik).....	50
Abbildung 29: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Pumpcharakteristiken (Eigene Aufnahme).....	52
Abbildung 30: 1. extrahierte Bild eines Durchgangs; 2. extrahierte Bild eines Durchgangs (v.l.n.r.) (Eigene Aufnahmen) .....	55
Abbildung 31: Von „Kaleido Removebg“ prozessierte Bilder (Eigene Aufnahmen) .....	56
Abbildung 32: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 1) (Eigene Aufnahmen).....	56
Abbildung 33: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 2) (Eigene Aufnahmen).....	56
Abbildung 34: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 3) (Eigene Aufnahmen).....	57
Abbildung 35: Symbol für die Maskenerstellung (Eigene Aufnahme) .....	57
Abbildung 36: Empfehlung für eine funktionstüchtige „Aktion“ (Eigene Aufnahme).....	58
Abbildung 37: Mischzeit-Bestimmung Bereich-Zuschneidung Photoshop (Schritt 4) (Eigene Aufnahme).....	58
Abbildung 38: Endprodukt des Photoshop-Verfahrens (Eigene Aufnahmen) .....	58
Abbildung 39: Standardabweichung des Histogramms als Maß für die Auswertung über Gimp (Eigene Aufnahme) .....	59
Abbildung 40: Experimenteller Aufbau für die Bestimmung des kLa (Eigene Aufnahme) .....	60
Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung der letzten 120 Histogramms-Standardabweichungen von I, 100 (1)..	64
Abbildung 42: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit I .....	65
Abbildung 43: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit II .....	66
Abbildung 44: Spiegelung auf den Glasmänteln von III, 200 (1) als beispielhafter Störfaktor (Eigene Aufnahme) .....	67

Abbildung 45: Mischzeiten Pumpgeschwindigkeit III.....	67
Abbildung 46: Mischzeiten Alle Pumpgeschwindigkeiten .....	68
Abbildung 47: Reynoldszahlen - Alle Pumpgeschwindigkeiten .....	69
Abbildung 48: kLa Pumpgeschwindigkeit I.....	70
Abbildung 49: kLa Pumpgeschwindigkeit II .....	70
Abbildung 50: kLa Pumpgeschwindigkeit III .....	70
Abbildung 51: kLa-Wert Alle Pumpgeschwindigkeiten .....	71
Abbildung 52: optische Entwicklung zweier nacheinander extrahierter Bilder während der ersten Auswertung (Eigene Aufnahmen) .....	75
Abbildung 53: Entwicklungen der Reynoldszahlen in Abhängigkeit der Begasungs- und Durchflussrate (Torzillo et al., 1993) .....	78

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist und ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Textstellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind durch Zitate als solche gekennzeichnet.

Ich erkläre weiterhin, dass die abgegebene digitale Version mit der eingereichten schriftlichen Arbeit übereinstimmt.

Neubrandenburg, 10.11.2024

\_\_\_\_\_