

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Optimierung von Nährmedien und der CO₂-Volumenstromregelung in einem
Airlift-Säulenreaktorsystem zur Kultivierung der Mikroalge *Chlorella vulgaris***

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik/Erneuerbare Energien

Vorgelegt von

Stefanie Mannweiler
Matrikel-Nr.: 1964326

Hamburg

am 30. Mai 2013

Gutachter: Prof. Dr. Heiner Kühle (HAW Hamburg)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta (IUE TUHH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt am
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung	2
3 Theorie	3
3.1 Potential der Mikroalgen.....	3
3.2 Photobioreaktoren	4
3.3.1 Kultivierung von Mikroalgen	6
3.3.2 Photosynthetisch aktive Strahlung	7
3.3.3 Anorganische Nährstoffe	9
3.3.4 CO ₂ -Assimilation / Lösung von CO ₂ im Wasser	11
3.3.5 Temperatur.....	13
3.4 Messverfahren.....	13
4 Material und Methoden	16
4.1 Technischer Aufbau des Testsystems.....	16
4.2 Nährmedien.....	18
4.3 Analytische Bestimmungen	20
4.3.1 Bestimmung der Nitrat- und Phosphatkonzentration.....	20
4.3.2 Bestimmung der Optischen Dichte (OD)	21
4.3.3 Bestimmung von Trockensubstanz (TS)	21
4.3.4 Indirekte Bestimmung von TS mittels Korrelation.....	22
4.3.5 Bestimmung von TN.....	22
4.3.6 Bestimmung von N _{org}	23
4.4.1 Versuchsdurchführung	23
4.4.2 Versuchsreihe I	25
4.4.3 Versuchsreihe II	26
4.4.4 Versuchsreihe III	26

5 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	27
5.1 Versuchsreihe I	28
5.2 Versuchsreihe II	33
5.3 Versuchsreihe III	36
5.4 Zelluläre Aufnahme von Stickstoff.....	42
6 Zusammenfassung	44
7 Ausblick	47
Literaturverzeichnis	VI
Anhang	IX
I. Geräte und Materialien	IX
II. Berechneten Mittelwerte und die Standardabweichungen der Mittelwerte	X
III. Messwerttabellen.....	XIII

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Vergleich der PAR-Ausbeute während künstlicher Beleuchtung.....	8
Tab. 3-2: Essenzielle Elemente der autotrophen Organismen	9
Tab. 4-1: Nährmedium NM1	18
Tab. 4-2: Nährmedium NM2	18
Tab. 5-1: Übersicht zu CO ₂ -Volumenströmen, PPF _D und erzielten Biomassenkonzentrationen in den Versuchsreihen.....	39
Tab. 5-2: Durchschnittswerte über die Versuchszeit und Standardabweichungen ...	41
Tab. II-1: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe I.....	X
Tab. II-2: Standardabweichungen der pH-Mittelwerte, Versuchsreihe I.....	X
Tab. II-3: Relative Standardabweichungen der Nährstoffkonzentrationen und des organischen Stickstoffs, Versuchsreihe I.....	XI
Tab. II-4: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe II.....	XI
Tab. II-5: Standardabweichungen der pH-Mittelwerte, Versuchsreihe II.....	XII
Tab. II-6: Relative Standardabweichungen der Nährstoffkonzentrationen in den Nährmedien NM1 und NM3, Versuchsreihe III	XII
Tab. II-7: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe III.....	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1: Zusammensetzung der Inhaltstoffe dreier ausgewählter Algenarten	4
Abb. 3-2: Airlift-Säulenreaktor.....	5
Abb. 3-3: FPA-Reaktor	6
Abb. 3-4: Lichtintensität limitierende Wachstumsrate von <i>Chlorella vulgaris</i> SAG; 12 bis 22°C	8
Abb. 3-5: CO ₂ -Aufnahme der C ₃ - und C ₄ -Pflanze	12
Abb. 3-6: Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	13
Abb. 4-1: Technischer Aufbau des Testsystems, a: Anordnung von vier voneinander unabhängigen Airlift-Säulen-Photobioreaktoren und kontinuierliche pH-Wertmessung mittels Glaselektroden; b: Anordnung der Schwebekörper Durchflussmesser/-Regler zur manuellen Volumenstromregelung; c: künstliche Beleuchtung mittels zweier übereinander installierten Metalhalogenid-Lampen	16
Abb. 4-2: Anordnung elektronischer Bauelemente	17
Abb. 4-3: Schaltkasten zur Realisierung der automatischen CO ₂ -Volumenstromregelung	17
Abb. 4-4: Lichtmikroskopische Aufnahme der Algensuspension	22
Abb. 5-1: Korrelationsgeraden von TS zu OD	27
Abb. 5-2: Wachstumskurve in allen vier Reaktoren, Versuchsreihe I	28
Abb. 5-3: Produktivität und CO ₂ -Volumenstrom, Versuchsreihe I.....	29
Abb. 5-4: pH-Wertkurve der Mittelwerte und CO ₂ -Volumenströme, Versuchsreihe I	30
Abb. 5-5: pH-Wertkurven in Reaktoren, Versuchsreihe I.....	30
Abb. 5-6: Auf Reaktoroberfläche einfallende PPFD gemittelt, Versuchsreihe I	31
Abb. 5-7: Stickstoffverteilung in der Suspension unter Einsatz von Nährmedium NM1	32
Abb. 5-8: Nährstoffkonzentrationen und intrazellulärer Stickstoffgehalt, Versuchsreihe I	32
Abb. 5-9: Nährmedienvergleich von NM1 und NM2, Versuchsreihe II.....	33
Abb. 5-10: pH-Wertkurve der Mittelwerte und CO ₂ -Volumenströme, Versuchsreihe II	34
Abb. 5-11: Produktivität und CO ₂ -Volumenstrom, Versuchsreihe II.....	34

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-12: PAR, auf Reaktoroberfläche einfallende PPFD, Versuchsreihe II	35
Abb. 5-13: Wachstumsverlauf der Biomasse in den Reaktoren, Versuchsreihe III ...	36
Abb. 5-14: pH-Wertkurven in den Reaktoren, Versuchsreihe III	36
Abb. 5-15: Lichtmikroskopische Aufnahme der Suspension im R4 am letzten Tag der Versuchsreihe III.....	37
Abb. 5-16: Nährmedienvergleich von NM1 und NM3, Versuchsreihe III.....	38
Abb. 5-17: Produktivität und CO ₂ -Volumenstrom, Versuchsreihe III.....	38
Abb. 5-18: PAR, auf die Reaktoroberfläche einfallende PPFD, Versuchsreihe III	39
Abb. 5-19: Vergleich der manuellen und automatischen CO ₂ -Volumenstromregelung	40
Abb. 5-20: Organischer Stickstoffgehalt in Abhängigkeit von der Nitratkonzentration in Suspension	42
Abb. 5-21: Stickstoffverteilung in Suspension unter Einsatz von Nährmedien NM1 und NM3, Versuchsreihe III	43

1 Einleitung

Mikroalgen sind eine nachhaltige Quelle für Naturstoffe und Energie in Form von Biodiesel, Biogas oder Ethanol. Eine Produktion von Mikroalgenbiomasse in Photobioreaktoren unter Verwendung von Abgasen und unter effizienter Nutzung von Nährstoffen in geschlossenen Reaktorsystemen ist eine ökologisch nachhaltige und effiziente Alternative zu konventionellen Energiepflanzen. Die Kultivierung von Mikroalgen als nachwachsender Rohstoff weist gegenüber konventionellen Energiepflanzen wesentliche Vorteile auf. Neben höheren Wachstumsraten und geringeren Nährstoffbedarfen, ist im Besonderen die Kultivierung ohne Konkurrenz zu potentiellen Nahrungsmitteln und zu wertvollen Ökosystemen hervorzuheben [Pulz, 2009]. Eine Kultivierung mit geschlossenen Reaktorsystemen kann auch auf Flächen wie beispielsweise Industriebrachflächen oder trockenen Wüstenregionen eingesetzt werden. Für das Algenwachstum ist die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus Abgasen möglich. Dieser wird dann, je nach Wachstumsrate, zu Biomasse synthetisiert. Die Inhaltstoffe der Mikroalgen, wie z.B. Lipide und Stärke, können zu Biodiesel, Biogas oder Ethanol umgesetzt werden.

Eine erfolgreiche Mikroalgenkultivierung ist hauptsächlich abhängig von der Wahl der Mikroalgenart mit zellspezifischen Eigenschaften, welche interessant für biotechnologische und kommerzielle Prozesse sind [Pulz und Gross, 2004]. Darüber hinaus ist es notwendig eine Prozessstrategie zu entwickeln, um die optimalen Faktoren für Biomasse- oder Metaboliten-Produktion festlegen zu können. Dabei ist es zunächst entscheidend, die Prozesse unter definierten Bedingungen durchzuführen [Hoffmann, 2010]. In der vorliegenden Arbeit werden unter definierten Kultivierungsbedingungen die möglichen Einflüsse unterschiedlicher Nährmedien auf das Zellwachstum der photoautotrophen Mikroorganismen *Chlorella vulgaris* untersucht. Im Vordergrund der Untersuchungen steht phosphat- und stickstoffhaltiger Fermentationsrest als Nährstoffquelle. Des Weiteren bezieht sich die Arbeit auf eine Automatisierung des Testsystems zur Optimierung der CO₂-Volumenstromregelung in Abhängigkeit vom pH-Wert. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen zur Realisierung des vom Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der Technischen Universität Hamburg-Harburg(TUHH) modifizierten Bioraffineriekonzepts nach Chisti (2008) beitragen. Das Konzept stellt eine algenbasierte Prozesskette dar, welche mit Rauchgas als CO₂-Quelle beginnt, mit einer stofflichen und energetischen Nutzung der produzierten Biomasse fortfährt und mit einer Rückführung von Nährstoffen aus einer Fermentation endet [Wieczorek et al., 2013].

2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es Nährmedien in einem geschlossenen Photobioreaktorsystem zur Kultivierung von Mikroalgen zu optimieren. Die Optimierung erfolgt hinsichtlich der Substitution konventioneller Dünger durch aus Gärresten einer Algen-Fermentation gewonnene Phosphat- und Stickstoffquelle. Um diese Nährstoffquelle verifizieren zu können, werden zwei etablierte Nährmedien zum Vergleich herangezogen. Verglichen werden Wachstum und Produktivität der Mikroalge unter definierten Bedingungen. Anschließend wird die Optimierung der CO₂-Volumenstromregelung über den pH-Wert untersucht und die automatisierte der manuellen Regelung gegenüber gestellt. Des Weiteren wird die zelluläre Aufnahme des Stickstoffs in Bezug auf Nährstoffverfügbarkeit dargestellt und ausgewertet. Es werden drei Versuchsreihen mit je vier voneinander unabhängigen Photobioreaktoren durchgeführt.

Versuchsreihe I: Eingangs wird der typische Wachstumsverlauf der Mikroalgenkultur unter definierten Kultivierungsbedingungen (Licht, Temperatur, Nährstoffverfügbarkeit und CO₂-Verfügbarkeit) in einem Testsystem untersucht. Um vergleichbare Ergebnisse in den folgenden Versuchsreihen gewährleisten zu können, werden die Wachstumsverläufe, sowie die Kultivierungsbedingungen in den vier Photobioreaktoren auf Reproduzierbarkeit überprüft. Zudem wird überprüft, ob eine Untersuchung der zellulären Aufnahme des Stickstoffs in Abhängigkeit von der Nitratverfügbarkeit durchführbar ist.

Versuchsreihe II: In dieser Versuchsreihe werden die Wachstumskurven und die zelluläre Stickstoffaufnahme von Mikroalgen unter Einsatz von zwei etablierten Nährmedien verglichen. Ferner soll eine Optimierung der CO₂-Volumenströme während der manuellen Regelung erfolgen.

Versuchsreihe III: Ziel dieser Versuchsreihe ist die Untersuchung möglicher Einflüsse der Substitution etablierter Nährmedien durch ein alternatives Nährmedium auf das Biomassenwachstum. Das alternative Nährmedium enthält phosphat- und stickstoffhaltigen Fermentationsrest als Nährstoffquelle. Die Optimierung der CO₂-Volumenströme während der manuellen Regelung soll erweitert werden, sowie die Erprobung der automatischen CO₂-Volumenstromregelung erfolgen. Zudem wird die automatisierte Regelung der manuellen Regelung gegenüber gestellt.

3 Theorie

In den folgenden Kapiteln werden Grundlagen zur Kultivierung von Mikroalgen sowie relevante Messverfahren dargestellt und erläutert.

3.1 Potential der Mikroalgen

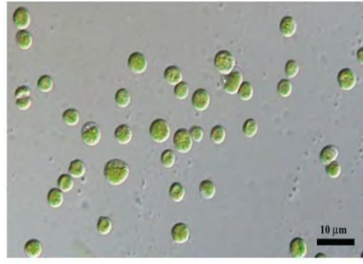
Der Begriff Mikroalgen umfasst sowohl eukaryotische Organismen als auch prokaryotische Cyanobakterien (Blaualgen). Diese ein- bis wenigzelligen Algen kommen in allen Gewässern vor und sind im Vergleich zu anderen Mikroorganismen klimatisch unempfindlich. In der Meereswelt sind Mikroalgen, auch Phytoplankton genannt, diejenigen, die Lichtenergie für den Aufbau organischer Stoffe aus anorganischen Ausgangsprodukten nutzen. Gegenüber den höheren Pflanzen haben die Mikroalgen einen entscheidenden Vorteil. Da jede einzelne Zelle zur Photosynthese befähigt ist, wachsen diese im Vergleich bis zu zehn Mal schneller. Die Mikroalgen sind für über 31,9 % des gesamten pflanzlichen Biomasseaufbaus der Erde verantwortlich und produzieren somit etwa 50 % des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre [Pulz, 2009]. Es sind bisher ca. 35.000 Mikroalgenarten bekannt und beschrieben [Pulz, 2009]. Eine davon ist *Chlorella vulgaris*. Dies ist eine kugelförmige Zelle mit einem Durchmesser von 2,5-12 µm. Diese Grünalge (*Chlorophyta*, Fam. *Chlorellaceae*) hat in den Süßwassern der warmgemäßigten Klimazone die optimale Wachstumsvoraussetzung [Round, 1973]. Auf Grund ihrer stabilen Zellwand ist diese tolerant gegenüber pH-Wert, Salzgehalt und mechanischer Belastung bei einer entstehenden bzw. vorhandenen Strömung.

Die große Artenvielfalt der Mikroalgen bietet eine nachhaltige Quelle für Naturstoffe. Zu den bekanntesten Produkten aus Algen zählen Farbstoffe wie Carotinoide (β -Carotin, Astaxanthin oder Lutein), mehrfach ungesättigte Fettsäuren wie Eicosapentaensäure (EPA) oder Docosahexaensäure (DHA), Antioxidanzien und Proteine [Stach, 2005]. Für die energetische Verwertung der Mikroalge ist die Zusammensetzung der Inhaltstoffe wie Proteine, Kohlenhydrate und Lipide von Bedeutung. Die folgenden Beispiele zeigen die Zusammensetzung der Inhaltstoffe dreier ausgewählter Mikroalgenarten auf und verdeutlichen das hohe Potential der grünen Mikroalgen als Rohstoff für die Biogas-, Biodiesel- oder Bioethanolproduktion (vgl. Abb.3-1).



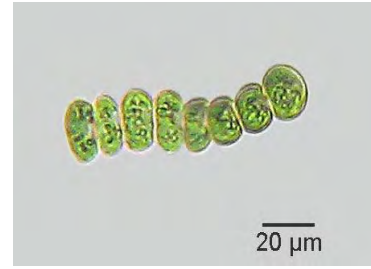
BOTRYOCOCUS

10-16% Proteine
18-28% Kohlenhydrate
30-62% Lipide



CHLORELLA

51-58% Proteine
12-17% Kohlenhydrate
14-25% Lipide



SCENEDESMUS

8-12% Proteine
21-32% Kohlenhydrate
16-40% Lipide

Abb. 3-1: Zusammensetzung der Inhaltsstoffe dreier ausgewählter Algenarten [Pulz, 2009]

3.2 Photobioreaktoren

Es ist bereits eine Vielzahl verschiedener Reaktortypen für eine industrielle Mikroalgenkultivierung vorhanden. Die Reaktorwahl ist im Wesentlichen von den Standortvoraussetzungen und den Investitions- Betriebskosten abhängig. Hierbei werden Kriterien für ein optimales Wachstum und Wirtschaftlichkeit abgewogen. In diesem Kapitel werden grundlegende Reaktortypen vorgestellt. Diese sind jedoch in vielfältigen Abwandlungen bzw. Weiterentwicklungen anzutreffen.

Offene Becken (Open Ponds)

Diese offenen Kultivierungsbecken sind technisch sehr einfach und stellen die Situation in Teichen nach. Die Investitionskosten sind gering. Die tägliche Flächenproduktivität ist jedoch mit 8 bis 12 g m⁻² d⁻¹ begrenzt. In sogenannten Raceway ponds, runde Becken mit einer Tiefe von 10 bis 29 cm wird eine Suspension aus Mikroalgen und Nähmedien durch Schaufelräder oder Propeller durchmischt. Die ausschlaggebenden Nachteile in offenen Systemen sind Kontaminationen von außen, eine hohe Wasserverdunstung, keine Kontrolle der Reaktionsbedingungen und offenes Ausgasen von CO₂. [Ackermann, 2007]

Rohrreaktoren (Tubular Reactors)

Rohrreaktoren sind geschlossene Systeme. Je nach Anordnung der Reaktoren handelt es sich um vertikale, horizontale oder helikale Reaktorkonstruktionen. Es gibt eine Produktionsstätte im industriellen Maßstab (Deutschland, Klötze). Die Produktionskapazität dieser Anlage beträgt 130 Mg a⁻¹ auf 1,2 ha Gesamtfläche (Gewächshauskomplex). Das photoaktive Volumen beträgt ca. 600 m³. Das entspricht einer jahresdurchschnittlichen Produktivität von 0,6 g l⁻¹ d⁻¹. Eine weitere, kleinere Anlage (Deutschland, Ritschenhausen) hat eine Produktionskapazität von 6 Mg a⁻¹ mit einer Gesamtglasrohrlänge von 18 km. Die Investitionskosten dieser Anlage betragen ca. 3 Mio. Euro. [Ackermann, 2007]

Die Nachteile der großen Rohrsysteme liegen im Wesentlichen in der inhomogenen Gasverteilung. Die CO₂ Konzentration nimmt mit der zunehmenden Röhrenlänge ab und der produzierte Sauerstoff dagegen zu. Des Weiteren erhöhen die benötigten Pumpwerke die Investitions- und Betriebskosten. Die Investitionskosten liegen deutlich über denen der offenen Becken [Meiser, 2004]. Die Flächenproduktivität ist jedoch signifikant höher als die der offenen Becken [Acien Fernandez, 1998]. Ein weiterer Vorteil liegt in der Kultivierung von Monokulturen unter sterilen Bedingungen.

Airlift–Säulenreaktoren

Der Airlift–Säulenreaktor besteht aus einem zylindrischen Gefäß, das aus lichtdurchlässigem Material gefertigt ist. Die Bauweise wird, wie bei allen anderen Photobioreaktoren, durch die notwendige Lichtintensität beeinflusst. Zurzeit wird dieser Typ von Reaktoren mit einem Durchmesser von maximal 20 bis 30 cm und einer durch statische Gründe begrenzten Höhe von 4 m gefertigt. Ein größerer Durchmesser würde zur Folge haben, dass der Reaktor nicht stark genug durchleuchtet wäre, was eine Verringerung der Produktivität und CO₂-Aufnahme zur Folge hätte. Im Fall dieser Photobioreaktoren sorgt die aufsteigende Blasensäule für eine ausreichende Durchmischung des Algenmediums. [Abendroth und Luschnig, 2009]

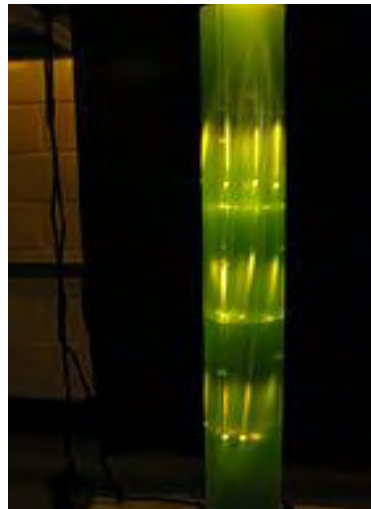


Abb. 3-2: Airlift-Säulenreaktor [Abendroth, Luschnig, 2009]

Plattenreaktoren (Flat Panel Reactors–FPA)

Diese Reaktoren bestehen aus lichtdurchlässiger PVC-Folie und werden kostengünstig aus tiefgezogener Kunststoffolie gefertigt. Plattenreaktoren werden in der Regel vertikal oder geneigt aufgestellt und sind mit integrierter Begasungsvorrichtung und Anschlüssen für Gas- und Mediumzufuhr bzw. Ernte ausgestattet. Die Besonderheit liegt hier in der gezielten Konvektion, mittels der die Algen nur kurzzeitig dem oberflächennahen, lichtübersättigenden Bereich ausgesetzt

werden. Das dort absorbierte Licht kann aufgrund des so genannten „Flashing Light Effects“ in einer oberflächenfernen Dunkelzone des Reaktors verwertet werden. In Stuttgart wurde eine Anlage dieser Art für Forschungszwecke und Algenproduktion im Pilotmaßstab aufgebaut. Die Produktionskapazität dieser Anlage beträgt $1,5 \text{ Mg a}^{-1}$ auf 400m^2 . [Ackermann, 2007]

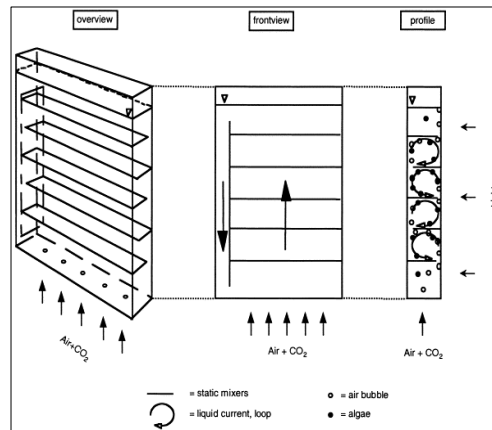


Abb. 3-3: FPA-Reaktor [Degen et al., 2001]

3.3.1 Kultivierung von Mikroalgen

Mikroalgen sind die ältesten Pflanzen unseres Planeten, die anthropogene Kultivierung begann jedoch erst vor 250 Jahren [UBA, 2012]. Die landbasierte Produktion von Mikroalgen findet aktuell insbesondere für die Pharma- und Chemieindustrie statt. Eine alleinige Produktion von Mikroalgen als Bioenergieträger ist derzeit aufgrund der hohen Kosten für Kultivierung noch nicht wirtschaftlich. Die Mikroalgenproduktion ist gegenwärtig vor allem in Asien eine etablierte Industrie. Hier kommen Mikroalgen auch in integrierten Aquakulturen zum Einsatz und gewährleisten ein Nährstoffrecycling [UBA, 2012]. Die Kultivierung kann je nach Zielsetzung mittels verschiedener Verfahren erfolgen.

Batch-Verfahren

Nachdem der Ansatz beimpft wurde, bleibt die Zellmenge zunächst konstant (Inkubationsphase, Lag-Phase) bis sich der Stoffwechsel der Organismen auf die Kulturbedingungen eingestellt hat. Nach der Lag-Phase nimmt die Geschwindigkeit des Wachstums zu und strebt dem bei den vorliegenden Umweltbedingungen maximalen Wert zu. In dieser Wachstumsphase nimmt die Zellmasse exponentiell zu (exponentielle Phase, Log-Phase), bis schließlich aufgrund des Verbrauchs essentieller Nährstoffe oder aufgrund anderer limitierender Faktoren die Wachstumsrate abnimmt und das Wachstum schließlich ganz zum Erliegen kommt (stationäre Phase). Bei anhaltendem Nahrungsmangel oder dauerhafter Einwirkung

toxischer Stoffwechselprodukte zerfallen die Zellen und verstoffwechseln sich selbst (Absterbephase, letale Phase). [Hempel et al., 2012]

Für eine statische Kultivierung ist ein Fed-Batch-Verfahren von Vorteil. Hierbei werden Inokulum (Mikroalge) und Nährstoffe in definierter Menge in den Reaktor gegeben. Es kommt zu einem spezifischen Wachstumsverlauf. Die verbrauchten Nährstoffe werden analytisch ermittelt und nach Bedarf zugegeben. Mit diesem Verfahren kann die Kultur über einen längeren Zeitraum in der Log Phase gehalten werden als mit einem Batch-Verfahren. Der Übergang einer Kultur in eine stationäre Phase wird hierbei von limitierenden Faktoren bestimmt. Photosynthetisch aktive Strahlung, anorganische Nährstoffe, CO₂-Verfügbarkeit und Temperatur sind die vier Hauptfaktoren. Diese werden deshalb in den folgenden Kapiteln (Kap. 3.3.2 bis Kap. 3.3.5) ausgeführt.

Kontinuierliche Kultivierung

Bei einer kontinuierlichen Kultivierung wird fortlaufend frische Nährlösung in den Bioreaktor zu der wachsenden Organismenpopulation gegeben. Mit gleichem Volumenstrom werden simultan Zellen, ihre Stoffwechselprodukte und nicht umgesetztes Substrat abgezogen. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Organismen wird dabei durch die Geschwindigkeit der Nährstoffzufuhr reguliert. Andererseits ist der Volumenstrom durch den Reaktor begrenzt, da der Organismenzuwachs durch die (organismenspezifische) maximale Wachstumsrate beschränkt ist. Sind die Auswaschverluste größer als durch den maximalen Zuwachs kompensiert werden kann, wird der Kultivierungsansatz an Organismen ausgedünnt (wash out). [Hempel et al., 2012]

3.3.2 Photosynthetisch aktive Strahlung

Photoautotrophe Organismen sind durch ihre lichtabsorbierenden Pigmente (Chlorophyll a, Chlorophyll b und Carotinoide) dazu befähigt, Energie der elektromagnetischen Strahlung in chemische Energie umzuwandeln. In dem biophysikalischen Primärprozess der Photosynthese treibt die absorbierte Energie die Reduktion des Akzeptoren NADP⁺ und daran gekoppelte Phosphorylierung an [Lüttge und Kluge, 2012]. In dem anschließenden biochemischen Sekundärprozess werden diese bereitgestellten Redox- und Phosphorylierungsäquivalente zur Fixierung von CO₂ und seiner Reduktion zu Kohlenhydraten verbraucht [Lüttge und Kluge, 2012], vergleiche Kapitel 3.3.3.

Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR- Photosynthetic Activ Radiation) setzt sich aus Wellenlängen zwischen 400 und 700 nm zusammen. Ein Maß für PAR ist die Photonenflussdichte (PPFD – Photosynthetic Photon Flux Density) mit der Einheit

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Andere Bezeichnung für den PAR-Sensor ist deshalb auch "Lichtquantenzähler". Die Einheit μE (mikro Einstein) entspricht 10^{-6} mol Photonen.

Bei einer kontinuierlichen Beleuchtung ergibt sich eine artspezifische Sättigungskurve der Biomassenproduktivität. Dabei bestimmt nicht die auf die Reaktoroberfläche einfallende PPFD die Produktivität, sondern die effektive PPFD [Budzikiewicz und Schäfer, 2005]. Für die Mikroalge *Chlorella vulgaris* liegt der Sättigungswert der PPFD_{eff} bei $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (vgl. Abb.3-4). Die einfallende PPFD muss jedoch um ein vielfaches größer sein als der Sättigungswert der PPFD_{eff} , um eine optimale Lichtversorgung zu gewährleisten. Je nach Algenart und Zelldichte wird eine Einstrahlung mit einer PPFD zwischen 1000 und $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ benötigt [Qiang und Richmond, 1996]. An einem wolkenlosen Sommertag erreicht die PPFD bis zu $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und wäre ohne die Nutzung des Flashing Light Effect photoinhibierend. An einem bewölkten Herbsttag werden $277 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erreicht [Maier, 2008].

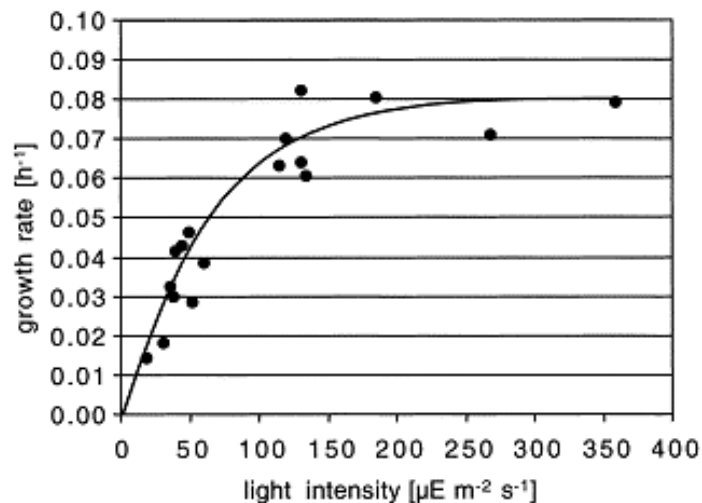


Abb. 3-4: Lichtintensität limitierende Wachstumsrate von *Chlorella vulgaris*; 12 bis 22°C [Degen et al., 2001]

Künstliche Beleuchtung	PAR-Ausbeute / elektrische Energie ($\mu\text{mol J}^{-1}$)
LED weiß	1,2
LED rot/blau	1,3
HID – Philips HMI	1,1
HID – Osram HQI	1,2

Tab. 3-1: Vergleich der PAR-Ausbeute während künstlicher Beleuchtung [Belz et al., 2010]

3.3.3 Anorganische Nährstoffe

Die autotrophen Organismen können alle Elemente, die sie benötigen, in anorganischer Form verwerten, indem sie diese reduzieren und in organische Verbindung überführen. Unter den essenziellen Elementen wird zwischen Nähr- und Spurenelementen unterschieden. Nährelemente sind am Aufbau der organischen Substanzen des Bau- und Betriebsstoffwechsels beteiligt und werden beim Wachstum in größeren Mengen aufgenommen. Spurenelemente sind in kleinsten Mengen als Bestandteile von Enzym- und Cofaktorsystemen essenziell. [Lüttge, und Kluge, 2012]

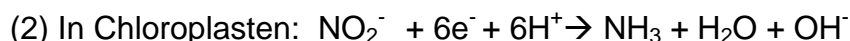
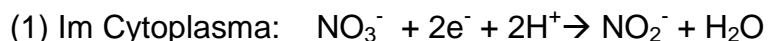
Nährelemente	C, N, S, P, H, O, K, Ca, Mg
Spurenelemente	B,Cu, Mn, Fe, Ni, Zn, Mo

Tab. 3-2: Essenzielle Elemente der autotrophen Organismen [Lüttge, Kluge, 2012]

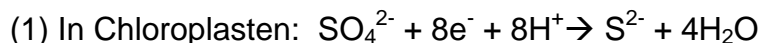
Die Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) sind Bestandteil aller organischen Verbindungen. Das Element Stickstoff (N) ist Bestandteil aller Aminosäuren und damit von Proteinen. Phosphor (P) als PO₄-Gruppe ist für phosphorylierte Verbindungen im Stoffwechsel wichtig. Magnesium (Mg) ist ein Bestandteil des Mg-ATP-Komplexes und somit für ATP-abhängige Reaktionen unabdingbar. Schwefel (S) ist unter anderem Bestandteil bestimmter Aminosäuren und von Coenzymen wie Ferredoxin, Coenzym der NADP-Reduktase. [Lüttge und Kluge, 2012]

Die Nährelemente C, N und S, die hauptsächlich in oxidiertem Form zur Verfügung stehen (CO₂, NO₃⁻, SO₄²⁻), werden reduziert, um diese dann so zum Einbau in pflanzeneigene Substanzen nutzen zu können. Nitrat (NO₃⁻) ist neben Ammonium aufgrund seines höheren Vorkommens die primäre Stickstoffquelle [Fernandez und Galvan, 2008]. Das Element Phosphor liegt als PO₄-Gruppe bereits in der benötigten Oxidationsstufe für den Stoffwechsel vor.

Nitratreduktion in grünen Zellen nach Lüttge und Kluge (2012):

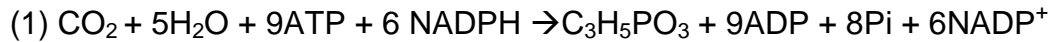


Sulfatreduktion in grünen Zellen nach Lüttge und Kluge (2012):



Die dazu notwendigen Elektronen transportiert das Ferredoxin aus dem biophysikalischen Primärprozess der Photosynthese, die mittels der NADP-Reduktase zur Verfügung stehen können.

Kohlenstoffdioxidreduktion in grünen Zellen nach Horton et al. (2008):



Auf die Kohlenstoffdioxidreduktion in grünen Zellen wird im Zusammenhang mit CO₂-Assimilation im nächsten Kapitel 3.3.3 näher eingegangen.

Beim Abbau von Biomasse durch Mikroorganismen werden die Elemente wieder in anorganischer Form frei. Aus dem Gärrest der Fermentation oder aus Abwasser können dann verschiedene Phosphatminerale gefällt werden, von denen jedoch Struvit (MgNH₄PO₄) besonders vorteilhaft ist. Mit Struvit als Dünger werden drei Hauptnährelemente (P, N, Mg) gleichzeitig ohne die Gegenionen Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ appliziert. Dabei sind die Verunreinigungen durch Schwermetalle zu beachten. [Zewuhn et al., 2013]

Hoffmann (2010) untersuchte in seiner Arbeit den Einfluss unterschiedlicher Nitrat- und Phosphatverfügbarkeiten auf die Mikroalge *N.salina*. Als Referenz wurde ein Nährmedium mit Konzentrationen 90 µmol l⁻¹ von Phosphat (PO₄³⁻) und 1800 µmol l⁻¹ von Nitrat (NO₃⁻) eingesetzt. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass die intrazellulären Stickstoff- und Phosphatkonzentrationen der Abnahme der Verfügbarkeit aus den Medien folgen. Zudem konnte beobachtet werden, dass die unterschiedlichen Verfügbarkeiten keinen Einfluss auf die intrazelluläre Kohlenstoffkonzentration haben. [Hoffmann, 2010]

Bei Untersuchungen von Degen et al. zur Optimierung der Lichtausnutzung durch Flashing Light Effect wurde die Mikroalge *Chlorella vulgaris* eingesetzt. Die nicht limitierenden Nährstoffkonzentrationen waren hier an DS-Medium nach Pohl et al. (1987) angelehnt. Die Konzentrationen der verwendeten Salze betragen 5 g l⁻¹ Kaliumnitrat (KNO₃), und 0.75 g l⁻¹ Kaliumhydrogenphosphat (K₂HPO₄) [Degen et al., 2001]. Auf Nährstoffkonzentrationen umgerechnet enthielt das Nährmedium 409 mg l⁻¹ PO₄³⁻ und 3331 mg l⁻¹ NO₃⁻.

In den neuesten Untersuchungen von Hindersin et al. (2012) zur Bestrahlungsoptimierung von Freilandmikroalgenkultivierung mittels der Sonne nachgeführten Reaktoren wurde die Mikroalge *Chlorella vulgaris* eingesetzt. Die Zusammensetzung des Nährmediums erfolgte mittels Flory Basis Dünger 2 und Kaliumnitrat (KNO₃). Die konstanten Nährstoffkonzentrationen der Suspension betragen 200 mg l⁻¹ PO₄³⁻ und 2000 mg l⁻¹ NO₃⁻. [Hindersin et al., 2012]

3.3.4 CO₂-Assimilation / Lösung von CO₂ im Wasser

Wie aus der Gleichung der Kohlendioxidreduktion im Kap.3.3.3 zu entnehmen ist, ist die Assimilation eine endergone Reaktionsabfolge. Zur Fixierung von CO₂ und seiner Reduktion zu Kohlenhydraten werden die durch Lichtreaktion bereitgestellten Redox(NADPH)- und Phosphorylierungs(ATP)- Äquivalente oxidiert [Lüttge und Kluge, 2012]. Die Reaktionsfolge der CO₂- Assimilation kann nach Lüttge und Kluge (2012) in vier Abschnitte unterteilt werden:

- CO₂-Fixierung (Carboxylierung)
- Reduktion des fixierten Kohlenstoffs
- Regeneration des CO₂-Akzeptors
- Synthese von Endprodukten der CO₂-Assimilation

Es gibt zwei Arten der Carboxylierung. Dem zu Folge wird zwischen C₃- und C₄ Stoffwechselwegen unterschieden (vgl. Abb. 3-5). Die Differenz der Stoffwechselwege besteht in der Bindung des Kohlenstoffdioxids durch ein Enzym, bei C₃-Stoffwechselweg ist es Ribulose-1,5-diphosphat-Carboxylase (Calvin-Zyklus), bei C₄-Stoffwechselweg ist es erst die Carboanhydrase (Katalysator) und dann die Phosphoenolpyruvat-Carboxylase (Hatch-Slack-Zyklus) [Lüttge, Kluge, 2012]. Die Produkte sind dann 3-Phosphoglycerat bzw. Malat und Aspartat.

Bei *Chlorella* existiert neben dem Calvin-Zyklus auch ein Hatch-Slack-Zyklus. Die beiden Carboxylierungsreaktionen verlaufen im Wesentlichen parallel. Wobei die eine Reaktion CO₂ bindet und die andere HCO₃⁻. Wenn eine Konkurrenzreaktion unterdrückt wird, dominiert die andere. Diese Anpassungsfähigkeit der Algen ermöglicht eine Toleranz gegenüber der Kohlenstoff-Verfügbarkeit, der Temperatur und dem pH Wert. [Findenegg, 1974; Döhler, 1972]

Die Biomasse von Algen besteht zur Hälfte aus Kohlenstoff. Bei der Bildung von 0,5 kg Biomasse werden etwa 1 kg CO₂ aufgenommen und 0,7 kg Sauerstoff abgegeben [Belz et al., 2010]. Quantitativ lässt sich die Bildung von Biomasse mit der Produktivität erfassen.

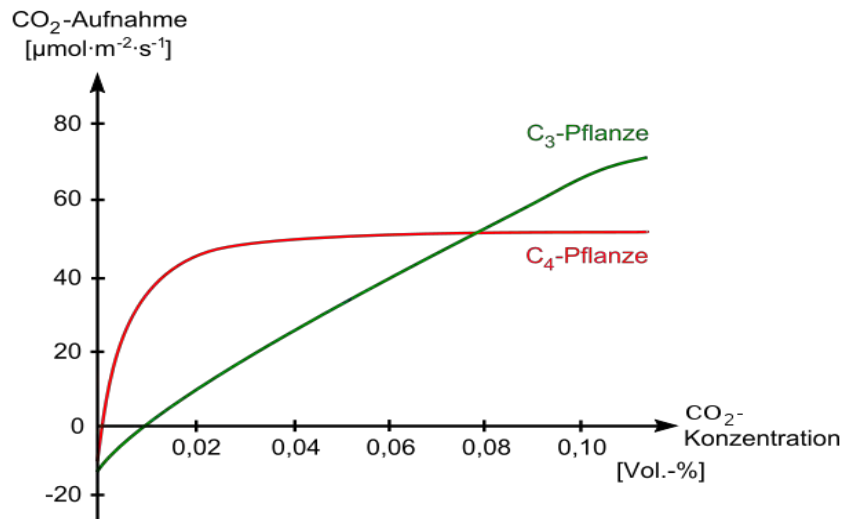
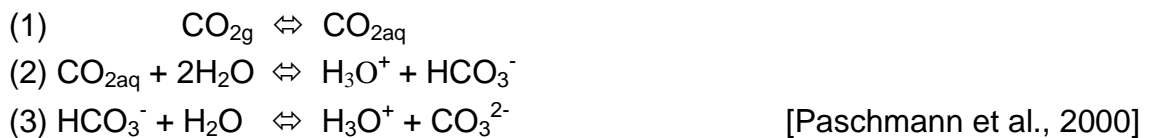


Abb. 3-5: CO₂-Aufnahme der C₃- und C₄-Pflanze [Belz et al., 2010]

Die CO₂-Löslichkeit hängt von Temperatur und Druck ab; bei steigender Temperatur sinkt die Löslichkeit, bei steigendem Druck erhöht sich diese [Kappas, 2009]. Die Sättigung des gelösten CO₂ (CO_{2g}) im Wasser liegt bei 0,22 %, unter Normaldruck und bei einer Temperatur von 19° C [Paschmann et al., 2000]. Das CO_{2g} steht in Wechselwirkung zur Kohlensäure (CO_{2aq}), welche mengenabhängig ein Absinken des pH-Wertes bewirkt. Nach den chemischen Gleichgewichtsreaktionen reagiert CO_{2g} im Wasser wie folgt.



Die Säurekonstante (K_S) entspricht der potentiellen Fähigkeit der Säure zur Protolyse. Für die K_S des Gleichgewichtes der Reaktion (2) gilt folgende Beziehung:

$$K_S = \frac{c(\text{HCO}_3^-) \cdot c(\text{H}_3\text{O}^+)}{c(\text{CO}_{2aq})}$$

[Paschmann et al., 2000]

Häufig wird der negative dekadische Logarithmus von K_S , der so genannte $\text{p}K_S$ -Wert angegeben. Je kleiner der $\text{p}K_S$ -Wert, desto stärker ist die Säure. Der $\text{p}K_S$ -Wert der Kohlensäure beträgt 6,52. Das bedeutet, dass das Dissoziationsgleichgewicht der Reaktion (2) sich ab dem zunehmenden pH-Wert 6,52 zunehmend stark auf der rechten Seite befindet (vgl. Abb. 3-6). Das Potential der Kohlensäure ab diesem pH-Wert Protonen zu übertragen ermöglicht eine Regelung der beiden Parameter über einander mit hoher Empfindlichkeit. Denn es gilt $\Delta c(\text{HCO}_3^-) = \Delta c(\text{H}_3\text{O}^+)$.

Autotrophe Organismen wie *Chlorella* und *Scenedesmus* entziehen durch Ihren Assimilationsvorgang der Lösung CO_{2g} und verlagern somit das

Dissoziationsgleichgewicht der Reaktionsgleichung (1) und (2) nach links, so dass der pH-Wert steigt. Wenn nicht genug CO_{2g} vorliegt, dominiert die Carboxylierung von HCO_3^- [Findenegg, 1973]. Dieser Zustand über längere Zeit kann eine Carbonatausfällung (CaCO_3 , MgCO_3) in der Lösung hervorrufen, mit der Folge einer Überkrustung der Pflanzenteile durch Kalksubstanz (Kalksuff) [Okrusch, 2005]

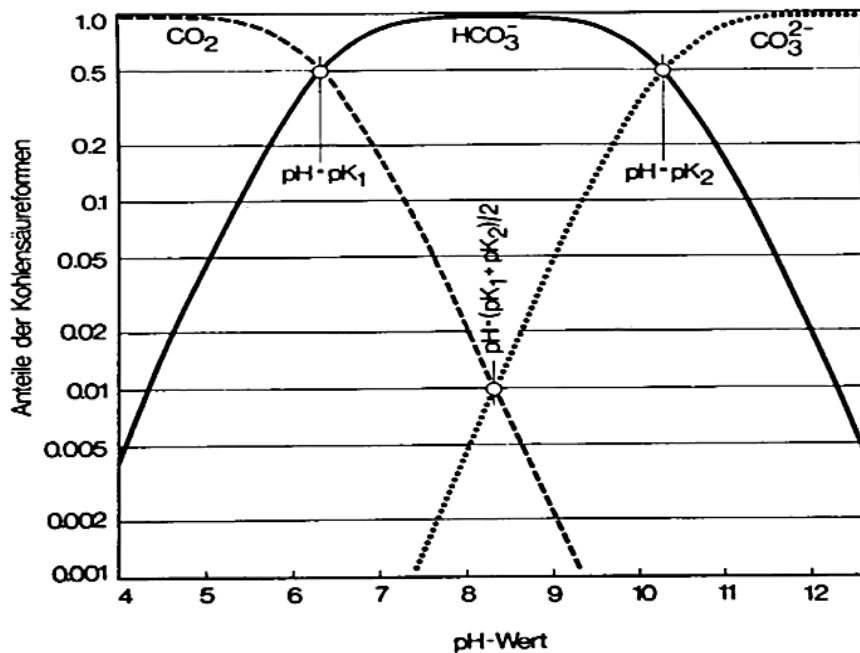


Abb. 3-6: Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht [Gimbel et al., 2004]

3.3.5 Temperatur

Kryophile Organismen haben ihr Wachstumsoptimum bei der Temperatur von 4 bis 20 °C, mesophile bei 20 bis 45°C und thermophile bei 45 bis 80°C. Der optimale Temperaturbereich variiert von Spezies zu Spezies, bei *Chlorella* liegt dieser bei 25 - 27 °C [Ackermann, 2007]. Bei höheren Temperaturen geht die Wachstumsrate zurück. Nach Hoffmann (2010) beeinflusst die Temperatur die Nährstoffaufnahme, so dass bei geringeren Temperaturen sich eine abnehmende Tendenz in der Nitrataufnahme abzeichnet [Hoffmann, 2010].

3.4 Messverfahren

Nährstoffkonzentrationen mittels Spektralphotometer (Nitrat/ Phosphat)

Die Photometrie erlaubt Konzentrationsbestimmung einer Substanz, wobei als Parameter die Schwächung der Intensität elektromagnetischer Strahlung gewählt wird. Zur Bestimmung nicht farbiger Verbindungen wie Nitrat und Phosphat wird eine

Derivatisierung durchgeführt. Eine chemische Verbindung erscheint dann farbig, da sie aus dem sichtbaren Teil des Spektrums (400 – 800 nm) einen bestimmten Frequenzbereich selektiv absorbiert und als Analyt photometrisch bestimmt werden kann [Universität Ulm, 2011]. Die mit dem Photometer gemessene Extinktion dieser Farbstoffe ist nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz proportional zur Konzentrationen der Nährstoffe.

Messung des Wachstums

Das Wachstum einer Zellkultur lässt sich über die Messung der Zellzahl (z. B. in Zählkammern) oder durch Messung der Zelldichte bzw. Zellmasse quantifizieren. Wird die Zelldichte als Kriterium für Wachstum herangezogen, kann diese über mehrere Messmethoden, wie folgt, bestimmt werden. [Hempel et al., 2012]

- Bestimmung des Trockengewichts in g TS l^{-1} (über Zentrifugation oder Filtration, Trocknung, Wägung)
- Messung der Menge einer typischen Zellkomponente (DNA, Proteine) oder der katalytischen Fähigkeit (Enzymaktivität)
- Bestimmung wachstumsgekoppelter Stoffwechselgröße (Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe)
- Messung der Optischen Dichte (Extinktion)

pH-Wertbestimmung mittels Glaselektrode

Per Definition ist der pH-Wert der negative dekadische Logarithmus der Aktivität der Wasserstoffionen (H^+). Dies entspricht in Näherung dem negativen dekadischen Logarithmus des Zahlenwertes der Stoffmengenkonzentration der Oxoniumionen (H_3O^+).

Das am häufigsten verwendete Messprinzip benutzt das Potential einer Glaselektrode. Eine Halbzellenreaktion an der Glasmembran bildet dort ein elektrisches Potenzial aus, welches in direkter Abhängigkeit zur H^+ -Ionenkonzentration steht. Bei der Messung kann kaum ein belastbarer Strom erzeugt werden. Deshalb muss das Messgerät aus einem Verstärker mit sehr hohem Eingangswiderstand und einem nachgeschalteten Spannungsanzeiger aufgebaut werden. Zur Kalibrierung müssen sowohl der Nullpunkt als auch der Verstärkungsfaktor der Schaltung verstellbar sein.

Bestimmung von PPF

Bei der Messung der Photonenflussdichte [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] kann der von Einstein 1905 erklärte photoelektrische Effekt, wofür er 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt, angewandt werden. Bei zunehmender Lichtintensität treffen pro Zeiteinheit mehr

Photonen auf eine Oberfläche der Messzelle. Dabei gilt nach Tipler und Mosca (2006) folgender Zusammenhang:

$$n = \frac{I_{\lambda} \cdot \Delta A \cdot \Delta t \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{\Delta E_{\lambda} \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

Mit

n: Photonenzahl

λ : Wellenlänge

I: Lichtintensität

A: Fläche

E: Energie

t: Zeit

h: Plancksches Wirkungsquantum

c: Lichtgeschwindigkeit

Die Messzelle absorbiert Energie der Photonen, die eine definierte Energie aufweisen bzw. einem definierten Wellenlängenbereich entsprechen. Für die selektive Absorption der Photonen ist die Wechselwirkung des Lichtstrahls mit einer Metalloberfläche bei einer bestimmten Spannung charakteristisch [Tipler und Mosca, 2006]. Bei der Bestimmung von PAR ist der Spektralbereich auf 400-700 nm begrenzt, sodass folgendes Integral gebildet werden kann.

$$n = \int_{400}^{700} \frac{\Delta E_{\lambda} \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot d\lambda$$

Der PAR Sensor kann eine rechteckige Resonanzkurve, oder eine, die genau auf die tatsächliche Resonanzkurve von Pflanzen abgestimmt ist, haben [Driesen und Kern, 2013]. Eine solche auf Pflanzen abgestimmte Resonanzkurve ist sinnvoll, da die photosynthetische Aktivität nicht über den gesamten Wellenbereich konstant ist, sondern vielmehr im Grünbereich (500-5600 nm) ein Minimum aufweist.

4 Material und Methoden

Im Folgenden werden Material und Methoden für den Aufbau des Testsystems, die Versuchsdurchführungen sowie Analytik beschrieben. Die Übersicht zu den eingesetzten Geräten und Materialien liegt im Anhang vor.

4.1 Technischer Aufbau des Testsystems

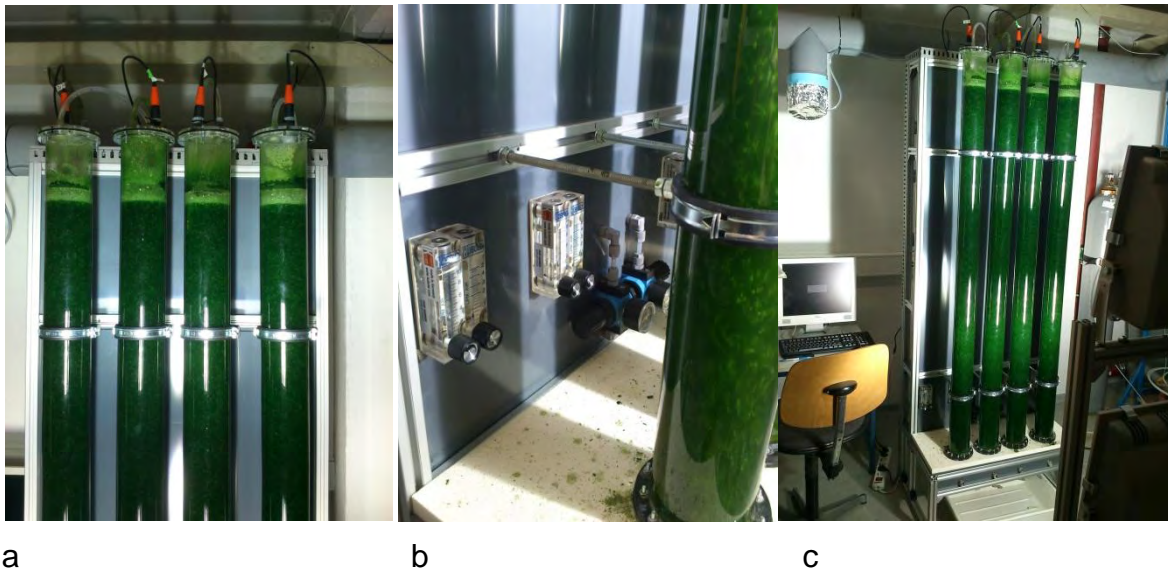


Abb. 4-1: Technischer Aufbau des Testsystems, a: Anordnung von vier voneinander unabhängigen Airlift-Säulen-Photobioreaktoren und kontinuierliche pH-Wertmessung mittels Glaselektroden; b: Anordnung der Schwebekörper Durchflussmesser/-Regler zur manuellen Volumenstromregelung; c: künstliche Beleuchtung mittels zweier übereinander installierten Metalhalogenid-Lampen

Die Umsetzung des Testsystems erfolgte mit vier voneinander unabhängigen Airlift-Säulen-Photobioreaktoren, mit einer Kunststoff-Schichtdicke von 4 mm und einem Innendurchmesser von 82 mm. Das Reaktorvolumen betrug 9,5 Liter mit einem effektiven Nutzvolumen von 8,0 Litern. Zur Überwachung und Steuerung des pH-Wertes wurde je Reaktor eine pH-Glaselektrode (InLabReach MettlerToledo) installiert (vgl. Abb. 4-1 a). Die pH-Messwertaufnahme erfolgte kontinuierlich. Zur manuellen CO₂-Volumenstromregelung wurden Schwebekörper Durchflussmesser/-regler (KOBOLT, KFR-2112 NO) mit einem Luftmessbereich von 0,05 bis 0,5 NI min⁻¹ und zur Luftvolumenstromregelung (KOBOLT, KFR-2115 NO) mit einem Bereich von 1 bis 10 NI min⁻¹ eingesetzt (vgl. Abb.4-1 b). Zur Sicherung der Durchflussmesser/-regler sowie auch der Elektronik wurden Kegelrückschlagventile (SERTO, SO CV 23A21-8-8) eingebaut. Die CO₂-Versorgung erfolgte mittels einer Gasflasche mit reinem CO₂ (99,995 %). Ein Druckminderer entspannte das CO₂-Gas auf 2,3 bar und ein zweiter auf 2,0 bar, bevor das Gas in die Durchflussregler strömen konnte. Zusätzlich wurden die Reaktoren mit Luft begast, um eine Durchmischung der Suspension zu gewährleisten. Eine gleichmäßige Luftbegasung entlang der

Innenfläche wurde über einen am Reaktorboden im Kreis angelegten Diffusor realisiert.

Die automatisierte CO₂-Zufuhr wurde über den pH-Wert als Stellgröße geregelt. Die dazu verwendeten Magnetventile (BRONKHORST, S.N. 910116 B/S) wurden nach Bedarf über eine Software (LabVIEW 7.1) gesteuert. Die elektronischen Elemente zu der Regelung waren wie folgt verschaltet.

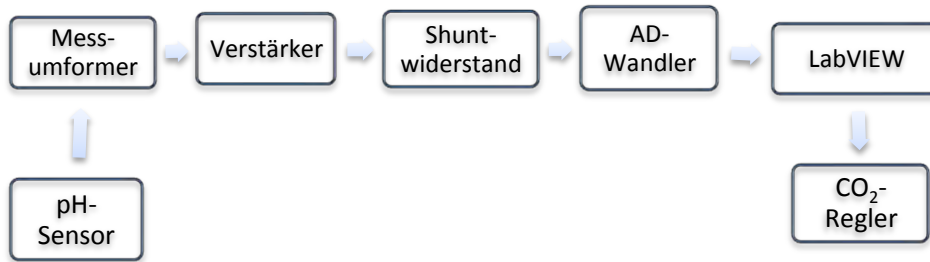


Abb. 4-2: Anordnung elektronischer Bauelemente

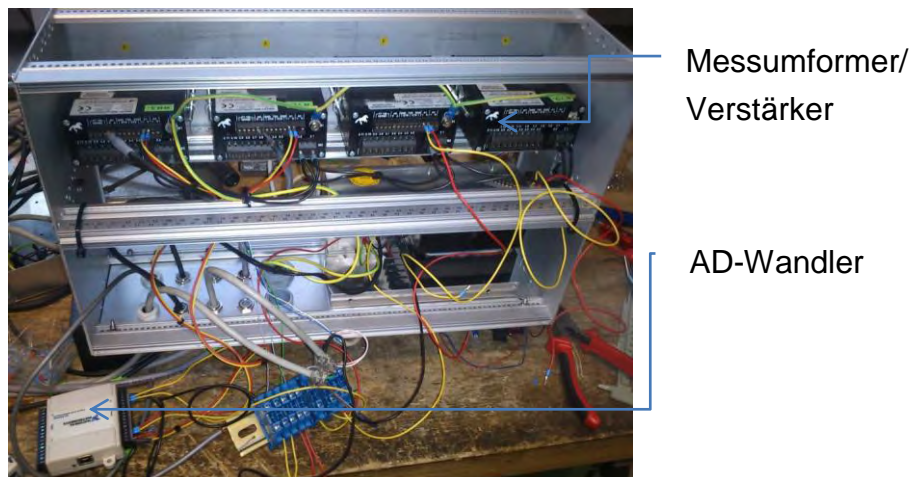


Abb. 4-3: Schaltkasten zur Realisierung der automatischen CO₂-Volumenstromregelung

Die künstliche Beleuchtung erfolgte mittels zweier übereinander installierten Metalhalogenid-Lampen (Osram; HQI-TS 400 W) mit PAR-Ausbeute von 1,2 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ (vgl. Tab. 3-1).

Die Probenentnahme und Ernte einer Suspension erfolgte über die dazu an der Plattform eingebauten Schläuche (SERTO, 6 mm) mit Ventilen. Zum Animpfen mit der Kultur wurde eine mobile Pumpe (Knf-flodos, NF1 300KT 18RC) eingesetzt.

Die gelösten Nährstoffe wurden über eine Öffnung an der Oberseite des Reaktors zugegeben. Das Abgas aus den Reaktoren wurde in das Abzugssystem abgeleitet.

Um das entstehende Kondenswasser aus der Abgasleitung abzuführen, wurde ein Dreiwegeventil eingesetzt.

4.2 Nährmedien

Nährmedium 1 (NM1)

Die Zusammensetzung von NM1 erfolgte in Anlehnung an das Medium nach Hindersin et al., (2012) und bestand aus im Wasser gelösten Flory Basic Dünger 2 (Eufloor, Germany) und KNO_3 . Der Flory Basic Dünger 2 beinhaltet 14 % Phosphorpentoxid (P_2O_5), 38 % N und 5 % Magnesiumoxid (MgO).

Die einzuwiegende Stoffmenge von Flory Basic Dünger 2 bestimmte primär die PO_4^{3-} Konzentration und ergab sich aus dem Richtwert. Der Anteil an N in dem Dünger wurde bei der Berechnung der Stoffmenge von KNO_3 auf Grund des PO_4^{3-} zu NO_3^- Verhältnisses (1:10) vernachlässigt (vgl.Tab.4-2).

Tab. 4-1: Nährmedium NM1

Stoff	Faktor ($\text{KNO}_3/\text{NO}_3^-$) bzw. (Flory/ PO_4^{3-})	Richtwerte NO_3^- bzw. PO_4^{3-} [mg/l]	K^+ [mg/l]	Mg^{2+} [mg/l]	spezifische Stoffmenge [g/l]
KNO_3	1,63	2000	1261	/	3,26
Flory Basic Dünger 2	5,33	200	/	32,1	1,07

Nährmedium 2 (NM2)

Die Zusammensetzung von NM2 erfolgte in Anlehnung an das DS-Medium nach Pohl et al. (1986) (vgl. Tab. 4-2). Das Stammkulturmedium basierte auf Wasser, in dem das Meeressalz (Instant Ocean) gelöst worden war. Das Nährmedium erforderte neben der Zugabe von KNO_3 und Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4) die Zugabe von Spurenelementen (vgl. Tab.4-3 und Tab. 4-4).

Tab. 4-2: Nährmedium NM2

Wasser vorlegen [l/l]	Instant Ocean [l/g]	Spuren- elementlösung A [l/l]	KNO_3 [g/l]	Spuren- elementlösung B [l/l]	KH_2PO_4 [g/l]	auffüllen mit Wasser [l/l]
0,90	3,50	0,04	2,79	0,04	0,38	0,01

Tab. 4-3: Spurenelementlösung-A

Stammlösung	Endkonzentration pro Liter Medium [µg/l]
MnCl ₂ • 2H ₂ O	400,00
ZnSO ₄ • 7H ₂ O	100,00
CoSO ₄ • 7H ₂ O	100,00
Na ₂ MoO ₄ • 2H ₂ O	100,00
CuSO ₄ • 5H ₂ O	10,00

Tab. 4-4: Spurenelementlösung-B

Stoff	Endkonzentration pro Liter DS Medium [mg/l]
FeCl ₃ • 6H ₂ O	4,00
Na ₂ EDTA • 2H ₂ O	5,50
K ₂ HPO ₄ • 3H ₂ O	50,00

Nährmedium 3 (NM3)

Das dritte Nährmedium enthielt als Komponente das aus dem Mikroalgen-Gärrest ausgefällte Phosphatmineral MgNH₄PO₄ (vgl. Tab. 4-5). Der Anteil an Ammonium (NH₄⁺) in dem Mineral wurde bei der Berechnung der Stoffmenge von KNO₃ auf Grund des PO₄³⁻ zu NO₃⁻ Verhältnisses (1:10) vernachlässigt.

Auf Grund der relativ geringen Löslichkeit von MgNH₄PO₄ unter neutralem pH-Wert wurde die Lösung (20 ml) mit 2g Zitronensäure angesäuert, bevor es als gelöste Nährstoffkomponente in das Nährmedium kam.

Tab. 4-5: Nährmedium NM3

Stoff	Faktor (KNO ₃ /NO ₃) bzw. (MgNH ₄ PO ₄ /PO ₄)	Richtwerte NO ₃ ⁻ bzw. PO ₄ ³⁻ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	spezifische Stoffmenge [g/l]
KNO ₃	1,63	2000	1261	/	/	3,26
MgNH ₄ PO ₄	1,45	200	/	51	38	0,29

4.3 Analytische Bestimmungen

Die gewählten Messgrößen, die regelmäßig gemessen wurden, dienten zum einen um den Wachstumsverlauf unter konstanten Bedingungen halten zu können. Zum anderen dienten diese um eine Aussage über den Wachstum von *Chlorella vulgaris* unter definierten Kultivierungsbedingungen treffen zu können. Die täglich erfassten Daten wurden dokumentiert und regelmäßig in Excel Tabellen übertragen und ausgewertet (vgl. Anhang). Dazu gehörte die Bestimmung der Konzentration von NO_3^- und PO_4^{3-} , sowie die Ermittlung der Wachstumsrate bzw. Produktivität der Mikroalgen im Kulturmedium mittels einer Messung der Optischen Dichte (OD) und der Trockensubstanz (TS - Total Solid). Zudem erfolgten Bestimmungen des gesamten Stickstoffs (TN - Total Nitrogen) und des organisch gebundenen Stickstoffs (N_{org}).

4.3.1 Bestimmung der Nitrat- und Phosphatkonzentration

Die Proben der Mikroalgensuspension wurden im 2-Tage-Rhythmus auf den Nährstoffgehalt untersucht. Die Konzentrationen wurden mit Küvettentests und einem Photometer (HACH LANGE, DR 3900) bestimmt. Es wurden Rundküvetten mit einem Barcode verwendet. Bestimmung der Phosphat-Konzentration erfolgte mittels Küvettentest (HACH LANGE, LCK 049) nach der Vanadat-Molybdat-Methode. Bestimmung der Nitrat-Konzentration erfolgte mittels Küvettentest (HACH LANGE, LCK 340) nach der 2,6-Dimethylphenol-Methode. Durch das Einstecken einer Küvette mit Barcode unter dem Menüpunkt „Barcode Programme“ wurde direkt eine entsprechende Messung ausgelöst, und es bedurfte keiner weiteren Photometereinstellung.

Die Proben wurden zuvor filtriert und dem Messbereich entsprechend verdünnt (vgl. Tab. 4-6 und Tab. 4-7). Es wurden 3 ml der Algensuspension mit einem auf einer Einmalspritze aufgesteckten Filter (FP 30/0,2 CA-S) filtriert. Die verdünnten Proben wurden gemäß der beigelegten Anleitung in den Test-Sets eingesetzt.

Tab. 4-6: Messbereich des Schnelltests LCK 049

Parameter	Messbereich [mg l ⁻¹]	Verdünnung der Probe
PO_4	5 - 90	1:4
$\text{PO}_4\text{-P}$	1,6 – 30	
P_2O_5	3,7 – 70	

Tab. 4-7: Messbereich des Schnelltests LCK 340

Parameter	Messbereich [mg l ⁻¹]	Verdünnung der Probe
NO ₃	22 – 155	1:20
NO ₃ -N	5 - 35	

4.3.2 Bestimmung der Optischen Dichte (OD)

Die tägliche OD Messung erfolgte mittels eines Photometers (HACH LANGE, DR 3900) bei einer Wellenlänge von 750 nm in Rundküvetten gegen destilliertes Wasser. Die unverdünnten Proben (5ml) wurden in einem Extinktionsbereich von 0,03 E bis 3.0 E analysiert. Die systematische Messabweichung betrug 1 % bei 0,50 bis 2,0 E. Die zufälligen Messabweichungen wurden durch unmittelbare Messung und Mittelwert-Bildung einer Dreifachbestimmung minimiert.

4.3.3 Bestimmung von Trockensubstanz (TS)

Die Bestimmung von TS während der Versuchsreihe I erfolgte aus einem definierten Volumen (1 bis 3 ml) mit Vakuumfiltration und anschließender Trocknung (bei 80 °C) im Thermoschrank (Typ 430, Memmert). Während der Versuchsreihe II und Versuchsreihe III wurde mittels eines Infrarottrockners (Sartorius MA 100) getrocknet.

Vor dem Einwiegen wurden die Filter (Whatman GF/C Ø25mm) getrocknet. Während der Versuchsreihe I wurden die Filter im Thermoschrank mindestens 12 Stunden getrocknet und anschließend im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Während der Versuchsreihe II und Versuchsreihe III wurden die Filter im Infrarottrockner getrocknet und unmittelbar eingewogen. Die getrockneten Filter wurden mit einer Analysenwaage eingewogen und in nummerierte Petrischalen platziert.

Bei der Vakuumfiltration wurde der Filter mittig platziert und mit einem Volumen von 1 ml bis 3 ml der Probe aufgegeben. Das aufgegebene Volumen der Algensuspension variierte in Abhängigkeit von dem Biomassegehalt in der Suspension. Das Wasser wurde mittels einer Pumpe durch den Filter hindurch abgezogen, so dass auf der Filteroberfläche Biomasse mit einem geringen Wassergehalt zurückblieb. Anschließend wurde destilliertes Wasser auf den Filter gegeben und abfiltriert, um die möglichen Rückstände an Nährstoffen aus der Biomasse auszuwaschen. Durch anschließende Trocknung des Filters sollte ausschließlich TS auf dem Filter zurückbleiben. Durch das Auswiegen ergab sich als Differenz die Masse an TS aus

einem definierten Volumen, die sich zu einer Biomassenkonzentration in g l^{-1} umrechnen ließ. Es galt folgender Zusammenhang:

$$M_{\text{TS}} = M_{\text{Ges.}} - M_{\text{Wasser}} - M_{\text{Filter}}$$

Zufällige Messabweichungen der Biomassenkonzentration haben Einflussgrößen wie die Abweichung der Luftfeuchtigkeit beim Einwiegen und Auswiegen und Abweichung des Volumens der Probe beim Pipettieren.

Systematische Messabweichungen werden durch Messabweichung der Analysenwaage und Abweichung von Masse an TS durch Verbleiben ungelöster Nährstoffe in der Biomasse beeinflusst.

4.3.4 Indirekte Bestimmung von TS mittels Korrelation

Eine gute Korrelation von TS zu OD der Algensuspension war durch eine hohe morphologische Ähnlichkeit aller Zellen möglich (vgl. Abb. 4-4). Dem zu Folge wurden in einem Messwertbereich (0,2 bis 2,0 E) zwei Kalibriergeraden erstellt. Dabei wurde der Messwertbereich unterteilt, so dass die lineare Regression der beiden Bereiche das höchst mögliche Bestimmtheitsmaß (R^2) erreichte. Für die Erstellung der Kalibriergeraden wurde eine stark aufkonzentrierte Algensuspension aus einem Reaktor mit demineralisiertem Wasser kontrolliert in Lösung gebracht und gemessen. Die Aufkonzentrierung erfolgte mittels einer Zentrifuge (3-18K, Sigma).

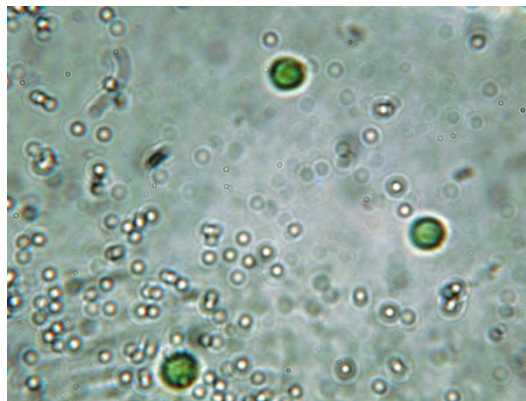


Abb. 4-4: Lichtmikroskopische Aufnahme der Algensuspension

4.3.5 Bestimmung von TN

Die Bestimmung von TN aus den Rückstellproben der Suspension wurde vom Labor des IUE an der TUHH mittels eines Destillationsapparats (Gerhard, Vapodest) und anschließender Titration (Schott, Titro Line Alpha) durchgeführt.

4.3.6 Bestimmung von N_{org}

Die Bestimmung von N_{org} bezogen auf Mikroalgenbiomasse erfolgte mittels CNS Analyser (Elementar, Vario Marco Cube) durch das Zentrallabor der TUHH. Die untersuchte Biomasse lag auf den Filtern (Whatman GF/C Ø25mm) aus der TS Bestimmung vor (vgl. Kap. 4.3.3).

4.4.1 Versuchsdurchführung

Es wurden drei Versuchsreihen mit je vier Photobioreaktoren durchgeführt. Als photoautotropher Organismus wurde in allen Versuchen die Mikroalgenart *Chlorella vulgaris* (No. U126) eingesetzt. Die Kultur entstammte der Conjugaten-Kultur (SVCK) der Universität Hamburg. Es wurde eine statische Kultivierung in einem Fed-Batch-Verfahren durchgeführt. Während der Versuchslaufzeit wurden die gelösten Nährstoffe dem Medium entsprechend zugeführt. Die Stoffmengen wurden an Hand der Analysenauswertungen der Suspension ermittelt. Die angestrebten Nährstoffkonzentrationen betragen $200 \text{ mg l}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ und $2000 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3^-$. Im Verlauf der Versuche wurden drei Nährmedien (NM1, NM2 und NM3) eingesetzt, die hauptsächlich eine Differenz in der PO_4^{3-} -Quelle aufwiesen (vgl. Kap. 4.2). Die wichtigste N- Quelle war in allen drei Nährmedien das Salz KNO_3 .

PAR wurde in allen Versuchsreihen als der limitierende Faktor vorausgesetzt. In Abhängigkeit von einem Abstand (ca. 0,85 m) zwischen den Reaktoren und den HQL-Lampen, sowie auch über die Ausrichtung der Lampen wurde eine Lichtintensität eingestellt. Mittels einer Zeitschaltuhr wurde ein Tag-Nacht Rhythmus (18 h zu 6 h) simuliert. Die Bestimmung der auf die Reaktoroberfläche einfallende PPFD erfolgte in einem 3 Tage Rhythmus mittels einer Messzelle (SN:Q, LI-COR) und Messwerterfasser (SN: DLA-1695, LI-COR). Zur Messung wurden drei Messpunkte auf der bestrahlten Oberfläche der Reaktoren festgelegt, die entlang der vertikalen Ebene verliefen. Es wurde ein Mittelwert aus den drei Messwerten gebildet und über den Tag ($\Delta t = 18\text{h}$) aufsummiert. Anschließend wurde ein Mittelwert aus den Werten der vier Reaktoren gebildet und über die Versuchszeit ein Durchschnittswert berechnet. Im Kap.5 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse werden die Werte differenziert aufgeführt.

Die Begasung der Reaktoren mit Luft erfolgte konstant mit einem festen Volumenstrom (0,0375 vvm).

Zur manuellen CO₂-Volumenstromregelung wurde der Durchfluss bzw. Regler für Luftvolumenströme eingesetzt. Die Umrechnung auf CO₂-Volumenströme erfolgte nach der VDI / VDE Richtlinie 3513 Bl.1. Für eine Messung vom Volumenstrom durch einen Schwebekörper-Durchflussmesser gilt folgender Zusammenhang.

$$\dot{V} = \frac{\alpha}{p} \cdot D \cdot \sqrt{g \cdot m_{SK} \cdot p \cdot \left(1 - \frac{p}{p_{SK}}\right)}$$

Bedingt durch das Verhältnis $\frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{Luft}}$ ergab sich folgender Umrechnungsfaktor.

$$\dot{V}_{CO_2} = \frac{p_{Luft}}{p_{CO_2}} \cdot \sqrt{\frac{p_{CO_2}}{p_{Luft}} \cdot \frac{1 - \frac{p_{CO_2}}{p_{SK}}}{1 - \frac{p_{Luft}}{p_{SK}}}} \cdot \dot{V}_{Luft}$$

Mit:

$$p_{Luft} = 1,204 \text{ kg m}^{-3}$$

$$p_{CO_2} = 3,625 \text{ kg m}^{-3}$$

$$p_{Schwebekörper} = 2500 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{CO_2} = 0,694 \cdot \dot{V}_{Luft}$$

Die Versuchsdauer je Versuchsreihe wurde aus Erfahrungswerten mit zwei Wochen eingeplant, war jedoch von der Wachstumsgeschwindigkeit der Kultur, die den Beginn der stationären Phase bestimmt, abhängig.

Die Suspensionstemperatur stellte sich über die Raumtemperatur und über den Anteil der absorbierten Infrarotstrahlung der HQI-Lampen ein. Die Temperatur der Stichproben betrug durchschnittlich 25,2 °C und lag im optimalen Temperaturbereich der Mikroalge, sodass keine weiteren temperaturbezogene Einstellungen notwendig waren.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den Einsatz der Medien und der CO₂-Volumenstromregelung während der Versuchsdurchführung (vgl. Tab. 4-8).

Tab. 4-8: Übersicht zu den Medien und CO₂-Volumenstromregelungen in den Versuchsreihen

Versuchsreihe	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3	Reaktor 4
I	NM1	NM1	NM1	NM1
	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler
II	NM1	NM 2	NM1	NM 2
	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler
III	NM1	NM1	NM 3	NM3
	Magnetventil- Regler	Magnetventil- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler	Schwebekörper Durchflussmesser/- Regler

4.4.2 Versuchsreihe I

In der ersten Versuchsreihe wurden die Wachstumskurven und die zelluläre Stickstoffaufnahme unter gleichen Kultivierungsbedingungen in den vier voneinander unabhängigen Reaktoren auf Reproduzierbarkeit untersucht, wobei die Kultivierungsbedingungen ebenfalls auf Reproduzierbarkeit geprüft wurden. Dazu gehörten PAR, CO₂- und Nährstoffverfügbarkeit. Hierbei wurde ausschließlich das NM1 verwendet und manuelle CO₂-Volumenstromregelung durchgeführt. Zum Start der Versuchsreihe wurde die Mikroalgensuspension stark mit dem Nährmedium in den Reaktoren verdünnt, sodass der durchschnittliche TS-Gehalt in der Lag-Phase 0,33 g l⁻¹ betrug.

Während der Versuchszeit wurde durch die Zugabe von Nährlösungen oder Wasser durchgehend das Volumen der Suspension, welches dem effektiven Nutzvolumen im Reaktor entsprach, gehalten.

Der Startwert der CO₂-Volumenströme betrug 0,0043 vvm. Ab dem 9. Kultivierungstag wurden der Volumenströmen auf 0,0069 vvm erhöht und ab dem 11. Tag auf 0,0087 vvm, um eine Limitierung der Biomassenproduktivität durch CO₂ Mangel zu vermeiden.

4.4.3 Versuchsreihe II

In der zweiten Versuchsreihe wurden die Wachstumsraten in zwei unterschiedlichen Nährmedien unter gleichen Versuchsbedingungen in einer Doppelbestimmung untersucht. Hierbei wurde das NM1 und NM2 verwendet und eine manuelle CO₂ – Volumenstromregelung durchgeführt (vgl. Tab. 4-8). Zum Start der Versuchsreihe wurde die Mikroalgensuspension aus der Versuchsreihe I stark mit Wasser in den Reaktoren verdünnt, sodass der durchschnittliche TS-Gehalt in der Inkubationsphase ca. 0,03 g l⁻¹ betrug. Nach 2 Tagen wurden die im Wasser gelösten Nährstoffkomponenten der Kultur zugesetzt, sodass im Reaktor ein NM1 bzw. NM2 vorlag (vgl. Kap.4.2). Zu diesem Zeitpunkt betrug der durchschnittliche TS-Gehalt 0,30 g l⁻¹. Während der Laufzeit wurde durch die Zugabe von Nährlösungen oder Wasser durchgehend das Volumen der Suspension, welches dem effektiven Nutzvolumen im Reaktor entsprach, gehalten.

Der Startwert der CO₂–Volumenströme betrug 0,0043 vvm. Ab dem 6. Kultivierungstag wurden der Volumenströme auf 0,0069 vvm erhöht, und ab den 11. Tag auf 0,0087 vvm.

4.4.4 Versuchsreihe III

In dieser Versuchsreihe wurde das Nährmedium NM1 und NM3 eingesetzt. Es wurde eine automatische und eine manuelle CO₂–Volumenstromregelung durchgeführt (vgl. Tab. 4-8).

Zum Start des Versuches wurde die Mikroalgensuspension aus der Versuchsreihe II stark mit Wasser in den Reaktoren verdünnt, so dass der durchschnittliche TS-Gehalt in der Inkubationsphase ca. 0,15 g l⁻¹ betrug. Eine Zufuhr der gelösten Nährstoffkomponenten erfolgte unmittelbar, so dass in den Reaktoren ein Nährmedium NM1 bzw. NM3 vorlag (vgl. Kap. 4.2).

Der Startwert der CO₂–Volumenströme der manuell geregelten Prozessführung betrug 0,0260 vvm. Ab dem 8. Kultivierungstag wurden der Volumenströme auf 0,0434 vvm erhöht, und ab dem 10. Tag auf 0,0694 vvm. Der CO₂-Volumenstrom der automatisch geregelten Prozessführung wurde erhöht, wenn der pH-Wert im Reaktor über 7,3 stieg. Die Werte der CO₂–Volumenströme während der automatisch geregelten Prozessführung wurden in diesem Versuchsaufbau nicht gemessen.

5 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die ermittelten Daten dargestellt und diskutiert. Hierfür werden Ergebnisse der Ermittlung von Wachstumsverläufen und Volumenproduktivität der Biomasse vorgestellt und der Zielsetzung entsprechend ausgewertet. Anschließend wird die Optimierung der CO₂-Volumenstromregelung über den pH-Wert untersucht und die automatisierte der manuellen Regelung gegenüber gestellt. Des Weiteren wird die zelluläre Aufnahme des Stickstoffs in Bezug auf Nährstoffverfügbarkeit dargestellt und ausgewertet.

Der Biomassewachstumsverlauf der Mikroalgen wurde an Hand der indirekt bestimmten Biomassekonzentrationen dargestellt und ausgewertet (vgl. Kap.4.3.4). Über die Korrelationsgeraden Y1 und Y2, die einen unterdrückten Nullpunkt haben (vgl. Abb. 5-1), werden die OD-Messwerte in TS-Werte und somit in Biomassenkonzentrationen umgerechnet.

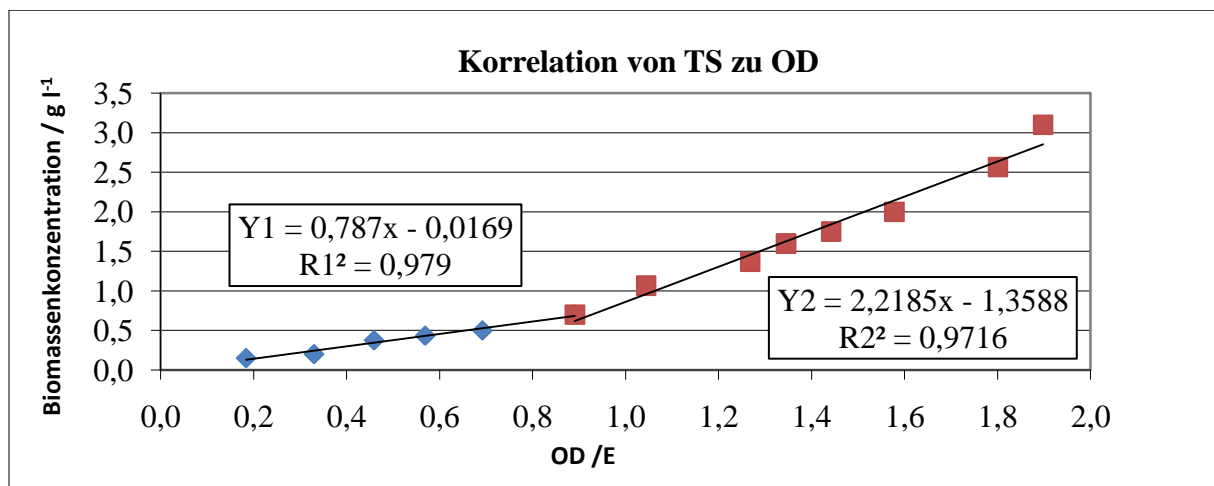


Abb. 5-1: Korrelationsgeraden von TS zu OD

Die Änderung der Biomassekonzentration bezogen auf Zeit (24 h) und Volumen entspricht der Volumenproduktivität der Mikroalgen und wird im weiteren Verlauf als Produktivität bezeichnet. Zum Nachweis der Reproduzierbarkeit oder zum Vergleich der Messwerte unter differenzierten Kultivierungsbedingungen werden Standardabweichungen der Mittelwerte herangezogen. Diese werden im weiteren Verlauf als relative bzw. absolute Abweichungen bezeichnet. Das Ergebnis einer Einzelmessung liegt mit 68,3 % Wahrscheinlichkeit im Vertrauensbereich. Die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte, sowie Rohdaten sind dem Anhang zu entnehmen.

5.1 Versuchsreihe I

Wenn von einer typischen Wachstumskurve der stationären Fed-Batch-Kultivierung ausgegangen wird, die allerdings in erster Linie für die Zellenzahl spezifisch ist, so lässt sich eine eindeutige Übereinstimmung zu dem ermittelten Wachstumsverlauf feststellen (vgl. Abb. 5-2). Die durchschnittliche Produktivität in den Reaktoren erreicht in der exponentiellen Wachstumsphase $0,51 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ am 4,8. Tag der Versuchsreihe, bevor diese verzögert in eine stationäre Phase übergeht (vgl. Abb. 5-3). Die Versuchszeit beträgt 13,8 Tage. Die Übergangsphase von exponentieller zu stationärer Phase ist in der ermittelten Wachstumskurve relativ lang. Da PAR der limitierende Faktor ist, lässt sich dieser Verlauf durch eine Auswirkung der gegenseitigen Verschattung erklären, die mit der Größe des Durchmessers der Säulenreaktoren einhergeht und mit der höheren Biomassenkonzentration zunimmt. Die Durchmischung der Algensuspension im Reaktor durch Luftblasen erreicht jedoch, dass alle Zellen abwechselnd in den oberflächennahen Bereich kommen und die Strahlung absorbieren können, so dass eine eindeutig stationäre Phase bei der Biomassekonzentration von $2,96 \text{ g l}^{-1}$ auftritt.

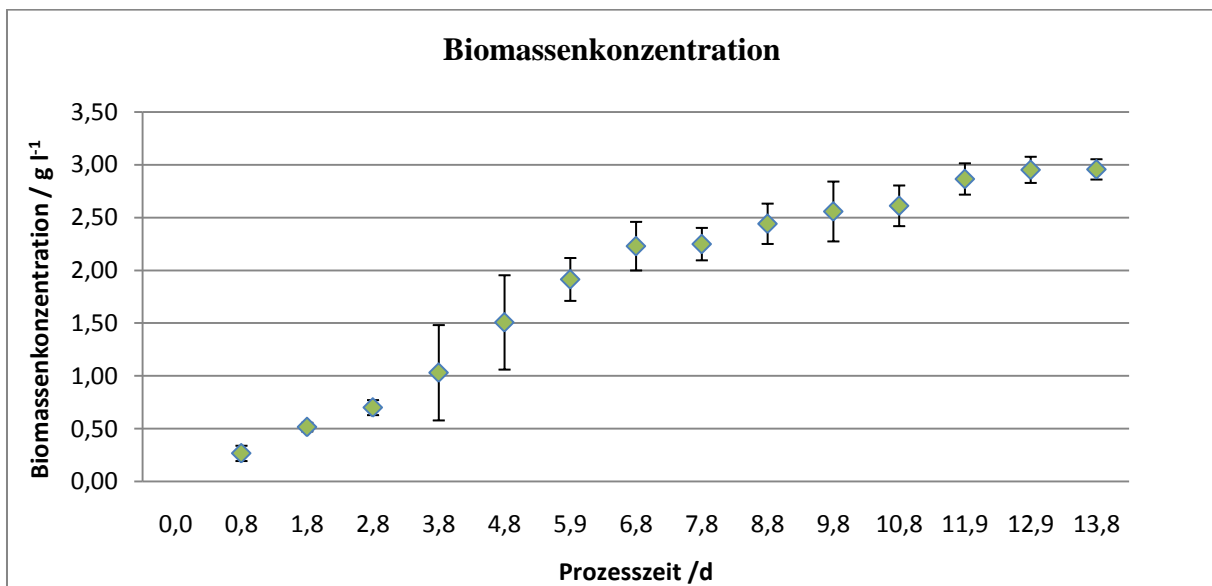


Abb. 5-2: Wachstumskurve in allen vier Reaktoren, Versuchsreihe I

In der Abb. 5-2 sind die Mittelwerte der Biomassenkonzentrationen in den vier Reaktoren und die dazu gehörigen Abweichungen aufgetragen. Die ermittelten Werte sind aus der Tab. II-1 zu entnehmen.

Die größte Abweichung der Biomassekonzentration in den Reaktoren ist mit 43,80 % zu verzeichnen (vgl. Tab. II-1). Diese signifikante Abweichung wurde durch ein starkes Schäumen der Suspension an den Versuchstagen 2,8 bis 4,8 verursacht. Die Biomasse, die mit dem Schaum in die Laborglasflaschen entwich, lag in unterschiedlichen Mengen vor und veränderte somit unterschiedlich die

Biomassenkonzentration. Im weiteren Verlauf nimmt die Abweichung zunehmend ab, so dass beim Erreichen der stationären Phase die Konzentrationen eine relative Abweichung von 3,25 % beträgt.

Am 7,8. Versuchstag ist die Produktivität mit $0,02 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ sehr gering (vgl. Abb. 5-3) und der pH-Mittelwert 7,25 (vgl. Tab. 5-2). Nach dem Erhöhen des CO_2 -Volumenstromes von 0,0043 auf 0,0069 vvm steigt die Produktivität und fällt wieder stark ab. Sobald der Volumenstrom auf 0,0087 vvm erhöht wird, so steigt auch die Produktivität (vgl. Abb. 5-3). Dieser Zusammenhang zeigt, dass in dieser Versuchsdurchführung neben dem limitierenden Faktor PAR ein weiterer limitierender Faktor auftritt, wenn der CO_2 -Volumenstrom von 0,0043 vvm über die Versuchsdauer konstant gehalten wird und der pH-Wert auf 7,3 steigt (vgl. Abb. 5-4).

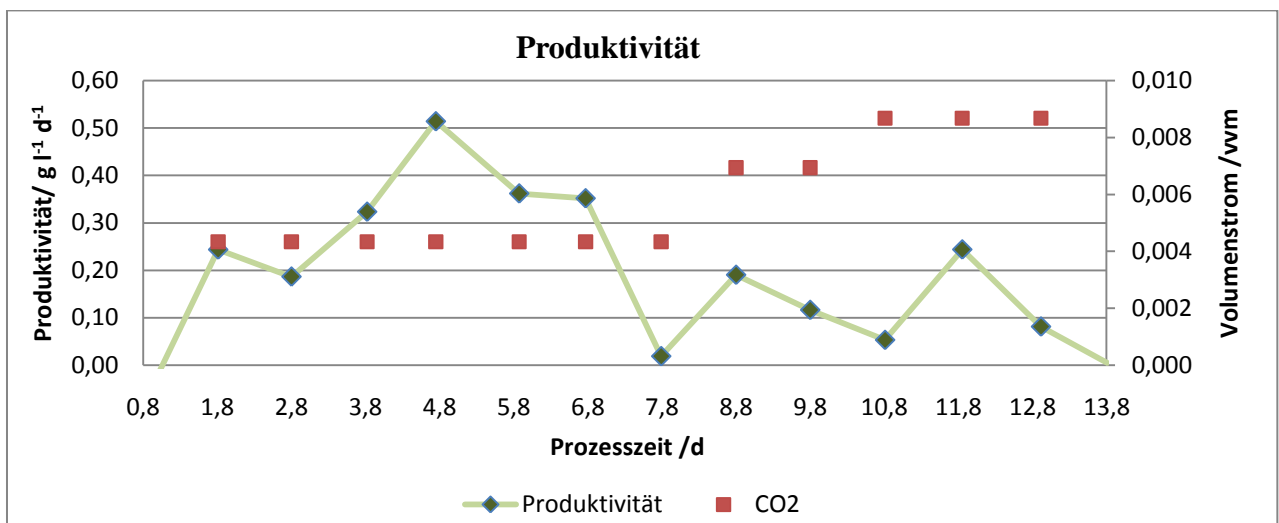


Abb. 5-3: Produktivität und CO_2 -Volumenstrom, Versuchsreihe I

Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die pH-Mittelwerte ergeben über den Versuchszeitraum einen Durchschnittswert von $7,02 \pm 0,24$. Die Tab. II-2 und Abb. 5-4 zeigt, dass die pH-Werte der Suspension in den Reaktoren abweichen, obwohl die Volumenströme gleich eingestellt sind. Die absolute Abweichung des pH-Wertes variiert zwischen 0,08 und 0,32.

Dies deutet auf eine Ungenauigkeit der Schwebekörper Durchflussmesser/-regler, da die pH-Sensoren und Messumformer kalibriert sind. Die vom Hersteller angegebene Abweichung der Schwebekörper Durchflussmesser/-regler beträgt 2 bis 5 % von ME.

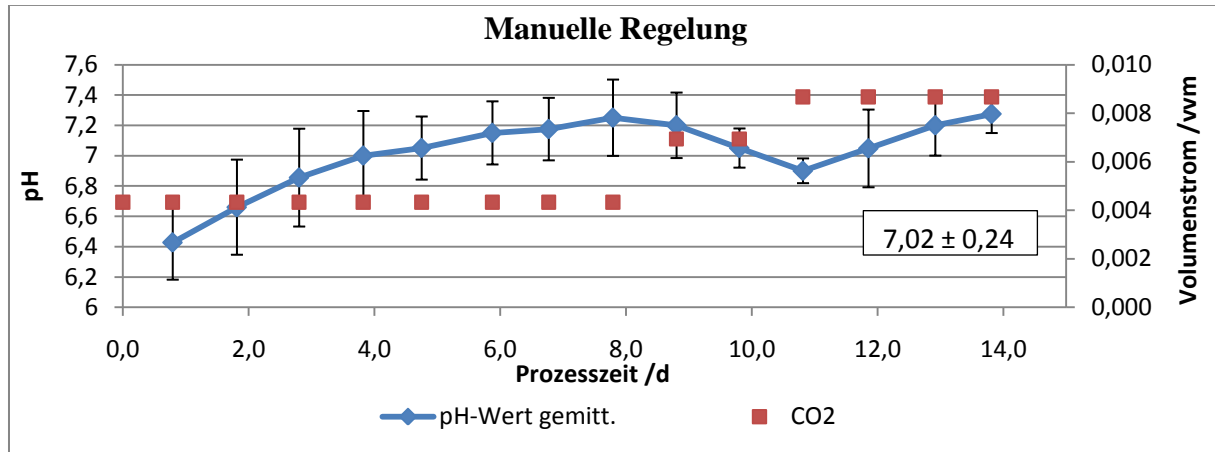


Abb. 5-4: pH-Wertkurve der Mittelwerte und CO₂-Volumenströme, Versuchsreihe I

Durch das Auftragen der pH-Werte der vier Reaktoren über die Zeit ist eine systematische Messabweichung der Schwebekörper Durchflussmesser/-regler zu erkennen (vgl. Abb. 5-5). Die pH-Wertkurve im Reaktor R3 liegt deutlich unter den pH-Wertkurven in den Reaktoren R1, R2 und R4. Dieses Verhalten deutet auf einen höheren CO₂-Volumenstrom im Reaktor R3. In den Reaktoren R1 und R2 ist eine deutliche Übereinstimmung der Kurven zu erkennen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die CO₂-Volumenströme gleich sind.

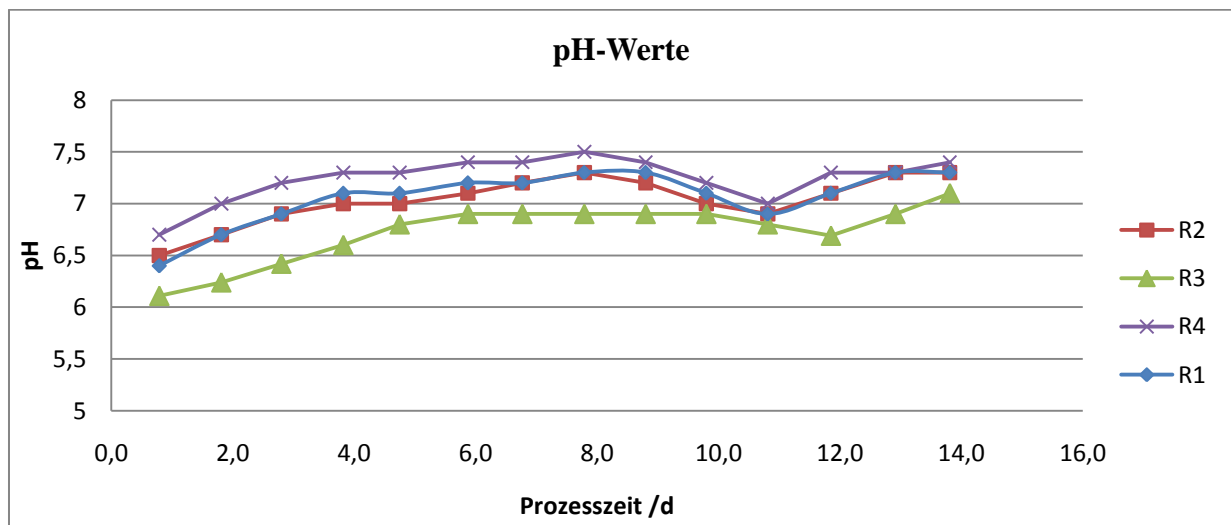


Abb. 5-5: pH-Wertkurven in Reaktoren, Versuchsreihe I

Die Abweichung von PPFD-Messwerten zwischen den einzelnen Reaktoren konnte aufgrund der zufälligen Messabweichungen nicht sinnvoll ermittelt werden. Da jedoch die Abweichung der erzielten Biomassenkonzentrationen 3,25 % beträgt, ist anzunehmen, dass die Reaktoren annähernd gleich bestrahlt werden. Die maßgeblichen zufälligen Messabweichungen ergaben sich durch die lokale Abweichung des Messpunktes bedingt durch die gewölbte Oberfläche des Säulenreaktors. In der Abbildung 5-6 werden die auf die Reaktoroberfläche einfallenden PPFD-Mittelwerte dargestellt um Lichtverhältnisse über die Versuchszeit, auch wenn ungenau, zu definieren. Die Lichtverhältnisse während der Versuchsreihen sowie die Abweichungen der PPFD- Mittelwerte werden im Kap. 5.3 weiter diskutiert. Der Durchschnitt der Mittelwerte während dieser Versuchsreihe beträgt $11,51 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

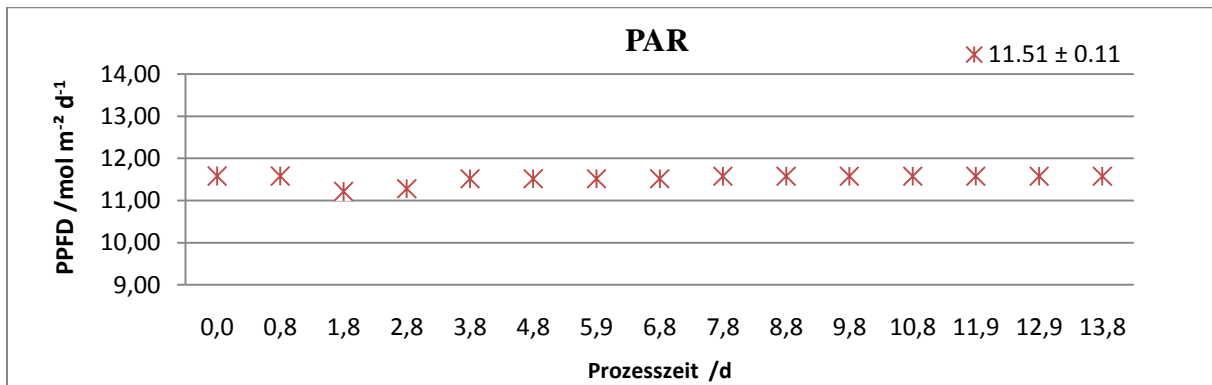


Abb. 5-6: Auf Reaktoroberfläche einfallende PPFD gemittelt, Versuchsreihe I

Die Gesamtstickstoffkonzentration ist über den Versuchszeitraum von 557 mg l^{-1} auf $697,5 \text{ mg l}^{-1}$ gestiegen. Die Abb. 5-7 zeigt, dass unter Einsatz von Nährmedium NM1 der Stickstoff hauptsächlich als Nitrat und als organischer Stickstoff in der Suspension vorliegt, da die Summe der beiden Konzentrationen der Gesamtstickstoffkonzentration entspricht. Dieses Ergebnis bestätigt die Annahme, dass Ammonium nicht bzw. in sehr geringen Konzentrationen in der Suspension vorhanden ist. Mit dieser Annahme kann die zelluläre Aufnahme von Stickstoff in Abhängigkeit von der Nitratverfügbarkeit in der Suspension untersucht werden, da Ammonium als N-Quelle nicht bzw. sehr begrenzt verfügbar ist.

Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

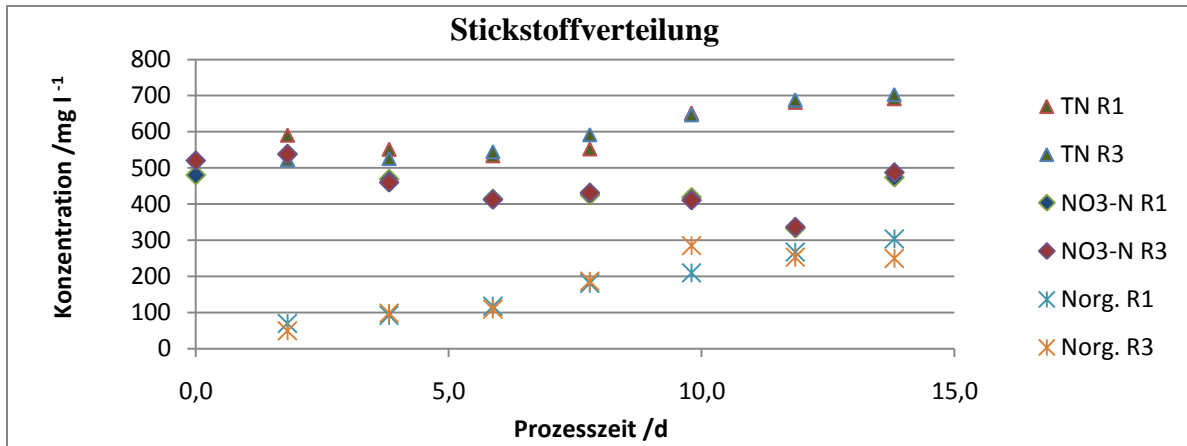


Abb. 5-7: Stickstoffverteilung in der Suspension unter Einsatz von Nährmedium NM1

Die Nährstoffe PO_4^{3-} und NO_3^- in der Suspension liegen mit geringer Abweichung in gleichen Mengen in den Reaktoren vor. Die durchschnittliche Abweichung der PO_4^{3-} -Konzentrationen beträgt 4,06 %, und der NO_3^- -Konzentrationen 1,58 % (vgl. Tab. II-3). Der prozentuale Anteil an zellulärem Stickstoff liegt über den Versuchszeitraum zwischen 6,54 % und 9,48 %. Die intrazellulären Stickstoffkonzentrationen folgen der Abnahme bzw. Zunahme der Nitratkonzentrationen in der Suspension (vgl. Abb. 5-8). Dieses Ergebnis bestätigt die Untersuchungen von Hoffmann (2010), indem der Einfluss der Nitratverfügbarkeit in der Suspension auf die intrazelluläre Stickstoffkonzentration zu erkennen ist. Der organische Stickstoffgehalt weist jedoch eine absolute Abweichung von 0,23 bis 1,53 % auf. Dies entspricht einer relativen Abweichung von bis zu 18,17 % (vgl. Tab. II-3). Demnach kann nicht von einer Reproduzierbarkeit in Bezug auf zelluläre Aufnahme des Stickstoffs ausgegangen werden. Es lässt sich lediglich untersuchen, ob ein Trend bezüglich des N_{org} -Gehaltes unter bestimmten Nährstoffverfügbarkeiten in Medien zu erkennen ist, wenn Messwerte aus den folgenden Versuchsreihen herangezogen werden.

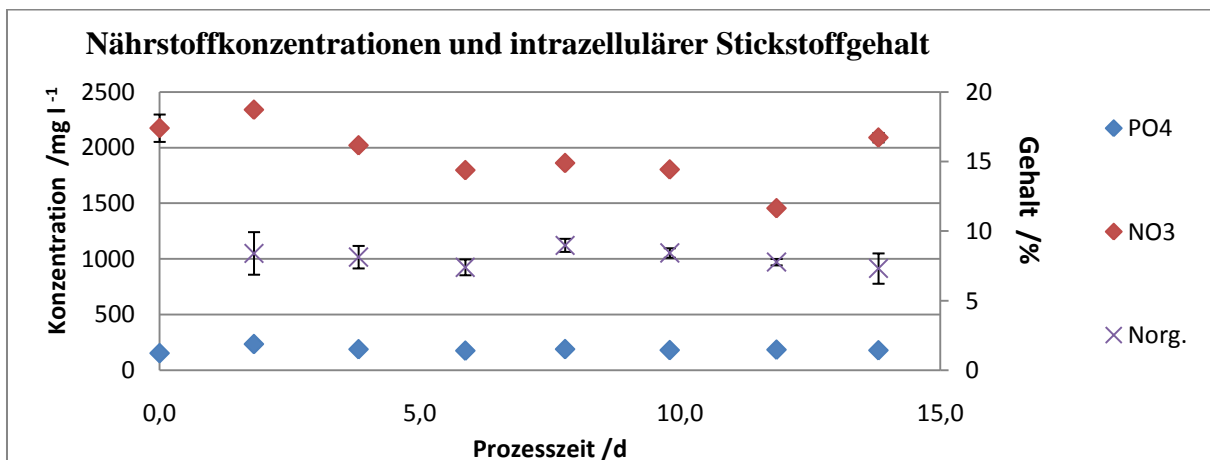


Abb. 5-8: Nährstoffkonzentrationen und intrazellulärer Stickstoffgehalt, Versuchsreihe I

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Reproduzierbarkeit des Wachstumsverlaufs, insbesondere in Bezug auf die erzielte Biomassekonzentration in der stationären Phase in den vier Reaktoren mit einer Abweichung von 3,25% möglich ist. Die absoluten Abweichungen der pH-Werte mit dem Maximalwert von 0,32 sind auf die Abweichung der CO₂-Volumenströme unter der manuellen Regelung zurück zu führen. Zudem wurde die limitierende Wirkung der konstanten CO₂-Volumenströme erkannt. Die Abweichung des PFD zwischen den einzelnen Reaktoren konnte aufgrund der zufälligen Messabweichungen nicht sinnvoll ermittelt werden. Die Reproduzierbarkeit in Bezug auf zelluläre Aufnahme des Stickstoffs unter bestimmten Nährstoffverfügbarkeiten im Medium ist aufgrund der großen Abweichung bedingt durch begrenzte Messwertmenge nicht möglich. Unter Einbezug der Messwerte aus den folgenden Versuchsreihen wird jedoch untersucht, ob ein Trend zu erkennen ist.

5.2 Versuchsreihe II

Verglichen werden die Wachstumskurven der Biomasse in Nährmedien NM1 und NM2 (vgl. Abb. 5-9). Die größte relative Abweichung der Biomassenkonzentration in den Reaktoren ist beim Start der Versuchsreihe mit 17,25 % zu verzeichnen (vgl. Tab. 5-4). Diese Abweichung ist jedoch für die Auswertung nicht relevant, da in den Reaktoren zu diesem Zeitpunkt weder das Nährmedium NM1 noch NM2 vorlag. Mit zunehmender Biomassenkonzentration variieren die relativen Abweichungen zwischen 2,28 % und 8,69 %. Die stationäre Phase wurde nach 15,8 Tagen der Versuchsreihe erreicht. Der Mittelwert der Biomassenkonzentration beträgt in der stationären Phase 3,20 g l⁻¹ mit einer Abweichung von 3,83 % (vgl. Tab. II-4).

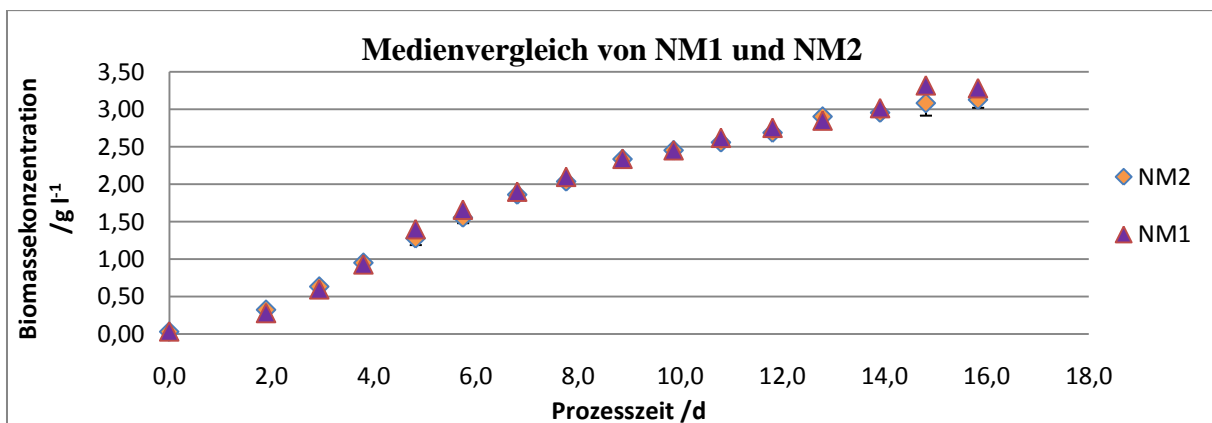


Abb. 5-9: Nährmedienvergleich von NM1 und NM2, Versuchsreihe II

Die Abb. 5-10 zeigt die pH-Mittelwertkurve während der Versuchslaufzeit. Ab dem 5,8. Kultivierungstag wurden der Volumenströme auf 0,00694 vvm erhöht, und ab

dem 10,8. Tag auf 0,0087 vvm. Die gemittelten pH-Werte ergeben einen Durchschnittswert über die Zeit $7,16 \pm 0,14$.

Die absolute Standardabweichung des pH-Wertes variiert zwischen 0,08 und 0,34 (vgl. Tab. II-5) und stimmt mit der Abweichung des pH-Wertes in der ersten Versuchsreihe bis zu einer Nachkommastelle überein.

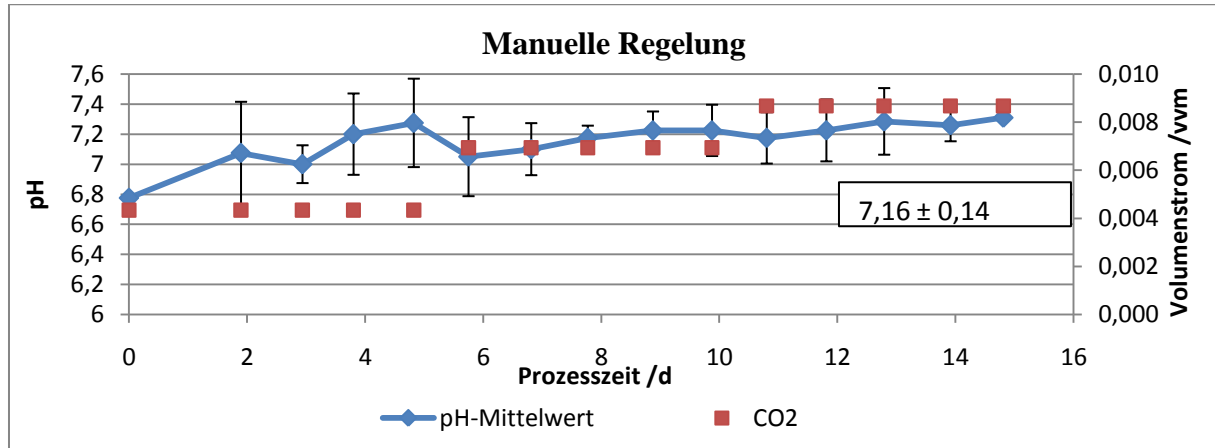


Abb. 5-10: pH-Wertkurve der Mittelwerte und CO₂-Volumenströme, Versuchsreihe II

Die Produktivität erreicht den Maximalwert von $0,37 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ am 2,8. Versuchstag (vgl. Abb. 5-11). Der Null-Wert wird erst am Ende der Versuchsreihe, als das Wachstum in die stationäre Phase übergeht, erreicht. Einen möglichen Zusammenhang der leichten Produktivitätssänken mit dem pH-Wert ist am 4,8 und am 12,8. Versuchstag zuerkennen, als der pH-Wert 7,3 erreicht (vgl. Abb. 5-10 und Abb. 5-11). Weiteren Schwankungen der Produktivität der Biomasse wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit durch andere Einflussgrößen wie Nährstoffkonzentrationen, Temperatur oder PAR verursacht. Mit dieser Annahme haben die CO₂-Volumenströme keine limitierende Wirkung auf die Produktivität, wenn der pH-Wert unter 7,3 gehalten werden kann.

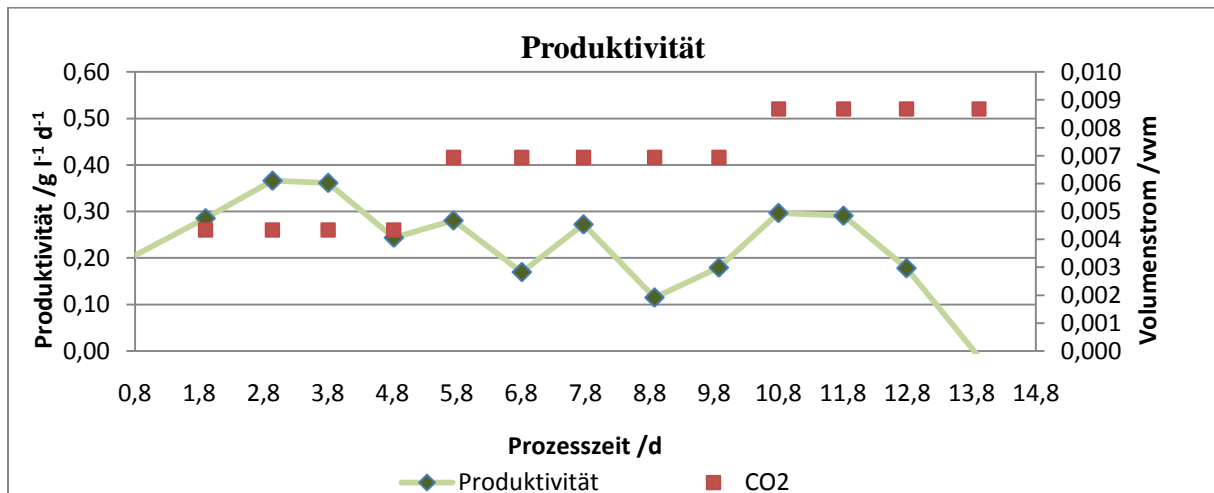


Abb. 5-11: Produktivität und CO₂-Volumenstrom, Versuchsreihe II

Die auf Reaktoroberfläche einfallende PPF_D betrug über die Versuchszeit im Durchschnitt $10,33 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (vgl. Abb. 5-12).

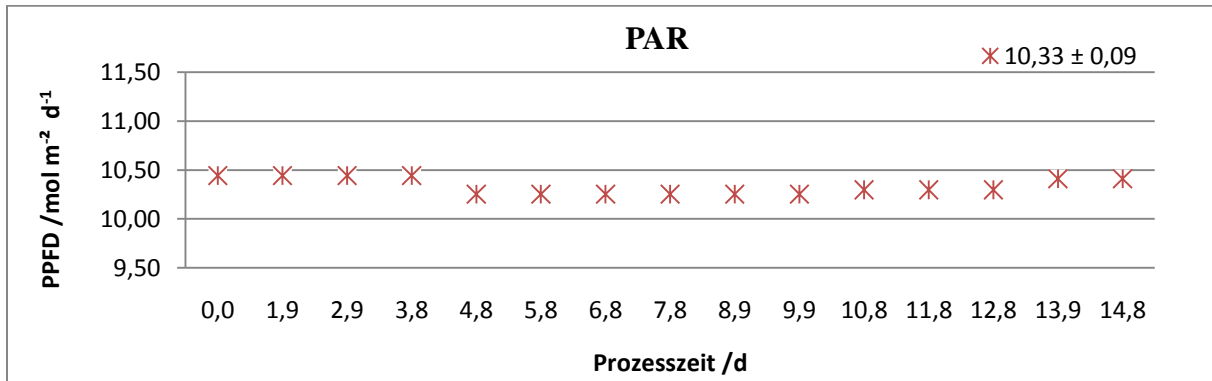


Abb. 5-12: PAR, auf Reaktoroberfläche einfallende PPF_D, Versuchsreihe II

Die Ergebnisse der Versuchsreihe II zeigen, dass durch den Einsatz der Nährmedien NM1 und NM2 vergleichbare Biomassenkonzentrationen erzielt werden können. Die Abweichung der Biomassenkonzentrationen von 3,83 % liegt unwesentlich höher als die Abweichung von 3,25 %, die bei dem Reproduzierbarkeitsnachweis ermittelt wurde. Im Vergleich zu der Versuchsreihe I konnte in der Versuchsreihe II die durchschnittliche Biomassenkonzentration mit $3,20 \text{ g l}^{-1}$ um $0,25 \text{ g l}^{-1}$ höher erzielt werden. Der ermittelte PPF_D-Durchschnittswert mit $10,33 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ fällt niedriger aus als während der ersten Versuchsreihe mit $11,51 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Der Bereich der CO₂-Volumenströme entsprach dem Bereich während der Versuchsreihe I, hatte jedoch eine andere zeitliche Sequenz. Mit dieser Regelung des CO₂-Volumenstromes konnten die pH-Werte mit dem Durchschnittswert von $7,16 \pm 0,14$ im Vergleich zu der Versuchsreihe I durchgehend konstanter gehalten werden. Zudem wurde festgestellt, dass CO₂-Volumenströme keine limitierende Wirkung auf die Produktivität haben, wenn der pH-Wert unter 7,3 gehalten werden kann.

5.3 Versuchsreihe III

Zu Beginn der Auswertung dieser Versuchsreihe werden die Wachstumsverläufe der Biomasse in allen vier Reaktoren einzeln dargestellt (vgl. Abb. 5-13). Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, verläuft das Mikroalgenwachstum in den Reaktoren während der ersten Versuchstage gleich. Im weiteren Verlauf bricht die Wachstumskurve im Reaktor R4 ein, und die Biomassenkonzentration verbleibt bis zum Versuchsende auf dem gleichen Niveau.

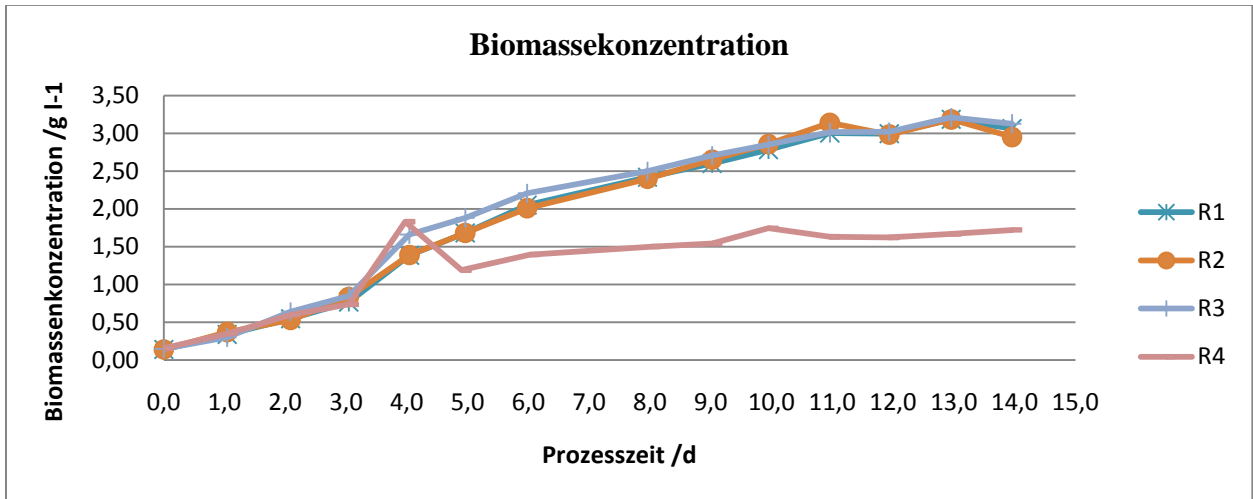


Abb. 5-13: Wachstumsverlauf der Biomasse in den Reaktoren, Versuchsreihe III

Durch das Auftragen der einzelnen pH-Werte in der Abb. 5-14 ist zu erkennen, dass der pH-Wert im R4 in den ersten Versuchstagen im Vergleich sehr stark schwankt. An dem 3. Versuchstag erreicht der pH-Wert 7,5, am 4. Versuchstag sinkt dieser auf 6,9 bevor der Wert am 5. Versuchstag wieder auf 7,4 steigt.

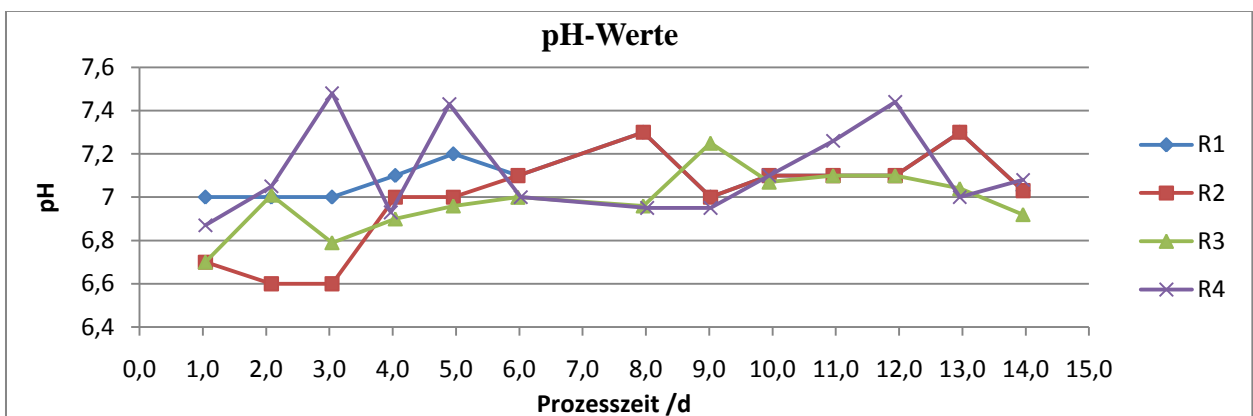


Abb. 5-14: pH-Wertkurven in den Reaktoren, Versuchsreihe III

Zudem konnte während der Versuchszeit eine milchige Trübung der Suspension beobachtet werden. Die lichtmikroskopische Aufnahme der Suspension im Reaktor R4 am Versuchsende zeigt, dass die Mikroalgenzellen abgestorben sind und in Flocken vorliegen (vgl. Abb. 5-15). Die Suspension im Reaktor R3 hatte ebenfalls eine leicht milchige Trübung. In den beiden Reaktoren R3 und R4 lag das Nährmedium NM3 vor. Die unvollständige Lösung des Stoffes MgNH_4PO_4 in dem Nährmedium kann ebenfalls eine Trübung der Suspension verursacht haben. Da der Wachstumsverlauf der Biomasse im Reaktor R4 nicht der spezifischen Kurve in dem Testsystem entspricht, wird dieser in der Auswertung nicht berücksichtigt.

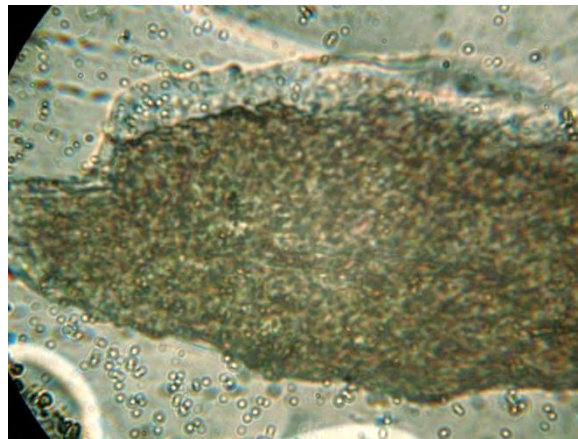


Abb. 5-15: Lichtmikroskopische Aufnahme der Suspension im R4 am letzten Tag der Versuchsreihe III

Die Nährstoffkonzentrationen in den Nährmedien NM1 und NM3 werden anhand von Messwerten aus den Reaktoren R1 und R3 mittels Abweichungen verglichen. Die gemessenen Nitratkonzentrationen liegen in den Nährmedien NM1 und NM3 mit einer durchschnittlichen Abweichung von 4,22 % vor, welche vergleichbar mit der Abweichung der Konzentrationen in der Versuchsreihe I ist (vgl. Tab. II-6). Die durchschnittliche Abweichung der gemessenen Phosphatkonzentrationen in den Nährmedien beträgt 54,19% (vgl. Tab. II-6), und ist deutlich höher als die Abweichung in der Versuchsreihe I. Dabei liegen die Werte der PO_4^{3-} -Konzentrationen im Nährmedium NM3 durchgehend unterhalb der PO_4^{3-} -Konzentrationen im Nährmedium NM1 (vgl. Abb. 5-16). Aus dem Zusammenhang ergibt sich, dass die Komponente MgNH_4PO_4 in dem Medium NM3 nicht vollständig in Lösung vorlag. Dem zu Folge beinhaltete die Suspension in den Reaktoren R3 und R4 MgNH_4PO_4 -Feststoffpartikel, welche eine milchige Trübung der Suspension verursachten.

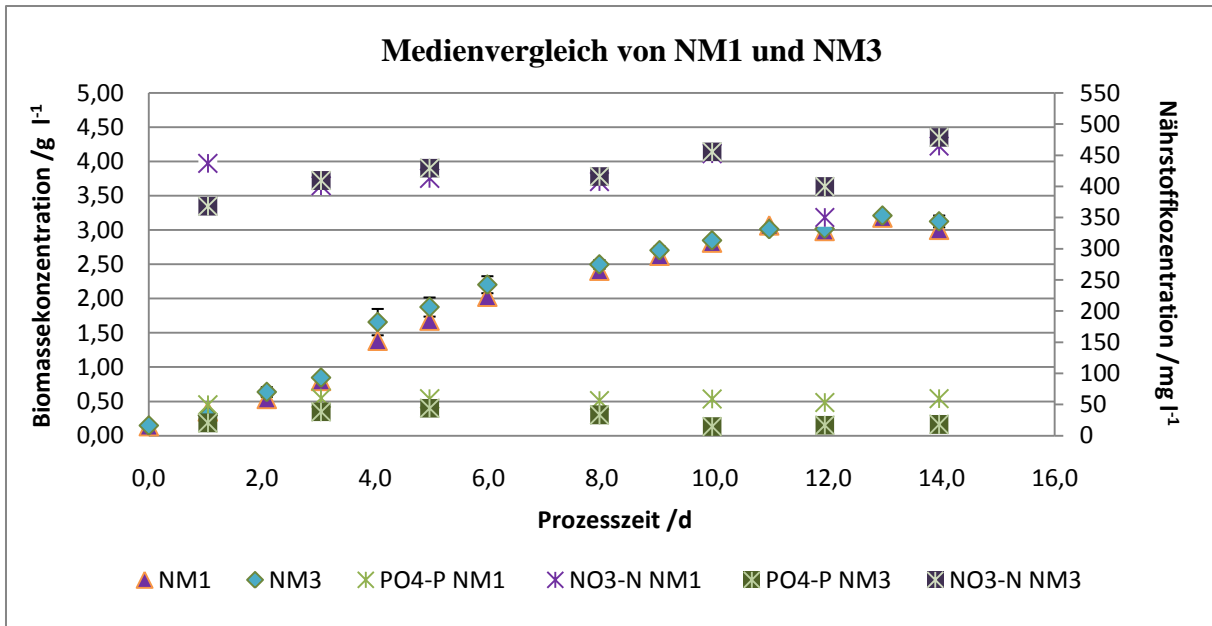


Abb. 5-16: Nährmedienvergleich von NM1 und NM3, Versuchsreihe III

Die Wachstumskurven in den Nährmedien NM1 und NM3 verlaufen vergleichbar (vgl. Abb. 5-16). Die Biomassenkonzentrationen erreichen in der stationären Phase $3,05 \text{ g l}^{-1}$, mit einer Abweichung von 2,94% (vgl. Tab. II-7).

Die Produktivität erreicht den durchschnittlichen Maximalwert von $0,66 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ am 3. Versuchstag (vgl. Abb. 5-17). Die größte Abweichung der Produktivität in den Reaktoren R1 und R2 zur Produktivität im Reaktor R3 liegt ebenfalls am 3. Versuchstag mit $0,08 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ vor. Ansonsten verlaufen die Produktivitätskurven sehr ähnlich (vgl. Abb. 5-17), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Substitution des Nährmediums NM1 durch NM3 ohne eine Auswirkung auf die Produktivität der Biomasse möglich ist. In Bezug auf die Phosphatverfügbarkeit kann keine Auswirkung durch die niedrigeren Konzentrationen im Nährmedium NM3 auf die Produktivität beobachtet werden.

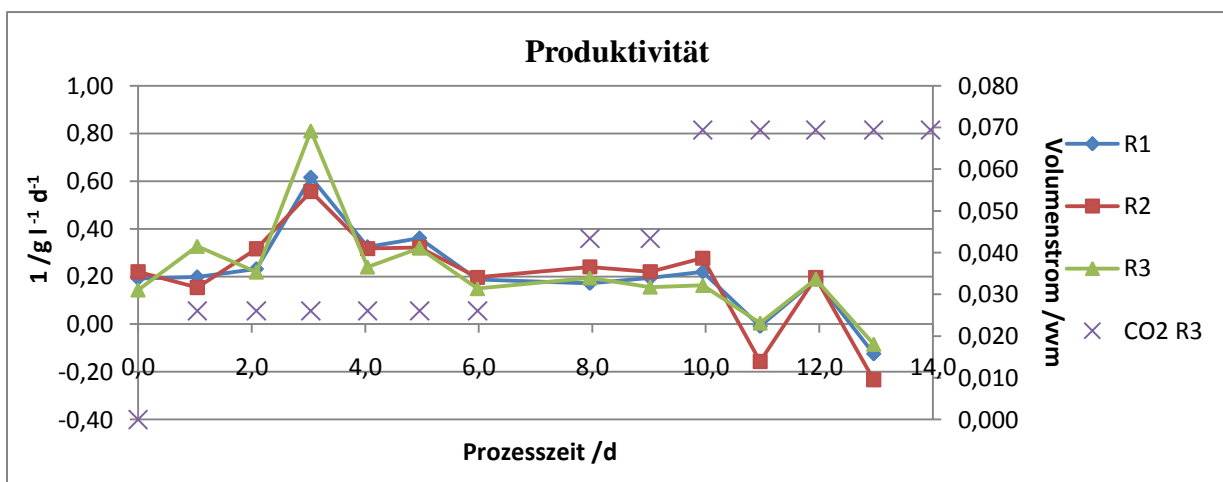


Abb. 5-17: Produktivität und CO₂-Volumenstrom, Versuchsreihe III

Eine Limitierung der Produktivität durch die CO₂-Verfügbarkeit während der manuellen Regelung im Reaktor R3 kann ausgeschlossen werden, da keine eindeutige Steigerung der Produktivität durch das Erhöhen des CO₂-Volumenstromes zu erkennen ist, und da die Produktivitätskurve parallel zu den Produktivitätskurven der automatischen Regelung verläuft (vgl. Abb. 5-17). Obwohl eine Limitierung der Produktivität durch die CO₂-Verfügbarkeit in dieser Versuchsreihe ausgeschlossen werden kann, und der Volumenstrom signifikant höher ist als der in der Versuchsreihe I und Versuchsreihe II, sind die erzielten Biomassenkonzentrationen nicht höher als in der Versuchsreihe II und vergleichbar mit Konzentrationen aus Versuchsreihe I (vgl. Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Übersicht zu den CO₂-Volumenströmen, PPFD und erzielten Biomassenkonzentrationen in den Versuchsreihen

Versuchsreihe	CO ₂ - Volumenströme vvm	PPFD [mol m ⁻² d ⁻¹]	Biomassenkonzentration [g l ⁻¹]
I	0,0043 - 0,0087	11,51	2,96 ± 3,25 %
II	0,0043 - 0,0087	10,33	3,20 ± 3,83 %
III	0,0260 – 0,0694	12,87	3,05 ± 2,94 %

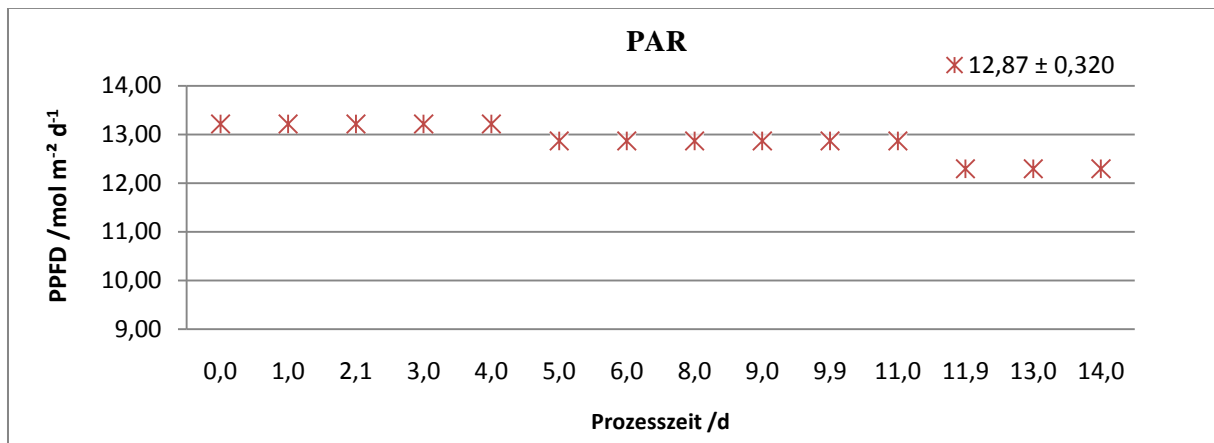


Abb. 5-18: PAR, auf die Reaktoroberfläche einfallende PPFD, Versuchsreihe III

Die PPFD-Mittelwerte betragen im Durchschnitt 12,87 mol m⁻² d⁻¹ (vgl. Abb. 4-18). Die PPFD-Durchschnittswerte variieren von Versuchsreihe zu Versuchsreihe zwischen 10,33 und 12,87 mol m⁻² d⁻¹ (vgl. Tab. 5-1). Da die erzielten Biomassenkonzentrationen in den einzelnen Versuchsreihen nicht den ermittelten PPFD-Werten entsprechend variieren, wird angenommen, dass der Einfluss der zufälligen Messabweichung bei der Bestimmung vom PAR groß sein muss. Durch

ein Aufsummieren der PPF-D-Messwerte auf eine Angabe von $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ vervielfacht sich der Messfehler zu einer signifikanten zufälligen Abweichung. Die gemessenen Werte in dem oberen Bereich der Reaktoren erreichten bis zu $136 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, in dem mittleren Bereich bis zu $404 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und in dem unteren bis zu $85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Der Mittelwert der ermittelten PPF-D-Werte ist vergleichbar mit der PAR-Ausbeute an einem bewölktem Herbsttag (vgl. Kap. 3.3.1).

Die pH-Wertkurven der manuellen und der automatischen Regelung verlaufen annähernd gleich mit einer maximalen relativen Abweichung von 0,23 (vgl. Tab. II-8). Der Bereich der pH-Werte lag während der manuell geregelten Prozessführung bei 6,7 - 7,3. Der CO_2 -Volumenstrom der automatisch geregelten Prozessführung wurde erhöht, wenn der pH-Wert im Reaktor über 7,3 stieg. Somit ergab sich während der automatisch geregelten Prozessführung der pH-Wertbereich 6,6 - 7,3 (vgl. Abb. 5-18). Die pH-Mittelwerte ergeben über die Versuchszeit den Durchschnittswert von $7,03 \pm 0,13$.

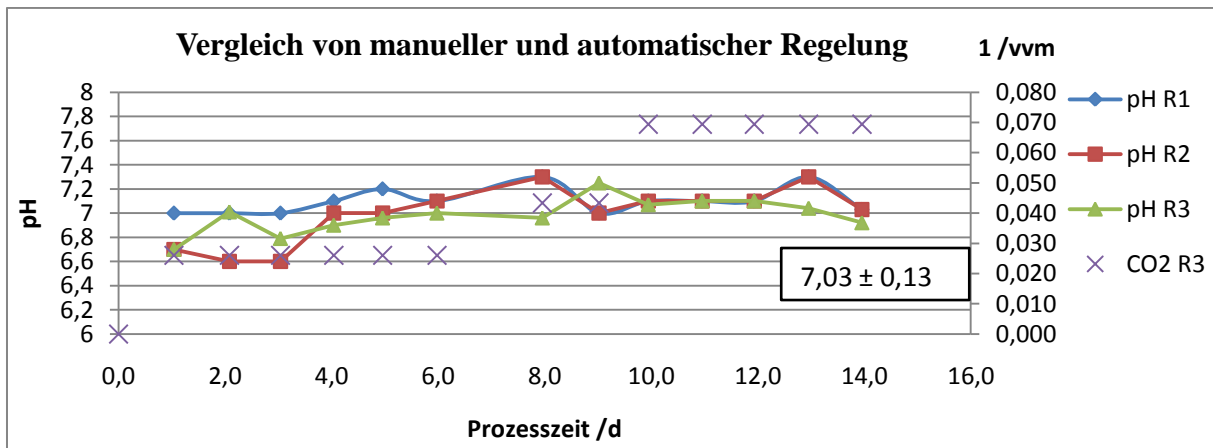


Abb. 5-19: Vergleich von manueller und automatischer CO_2 -Volumenstromregelung

Beim Differenzieren der Durchschnittswerte über die Versuchszeit und der dazugehörigen Standardabweichungen in den Reaktoren R1, R2 und R3 kann nicht eindeutig gesagt werden, dass während der automatischen Regelung die pH-Werte durchgehen konstanter gehalten werden als während der manuellen (vgl. Tab. 5-2). Die Vorteile der automatischen CO₂-Volumenstromregelung liegen eher in der Kontrollsicherheit, indem ein definierter pH-Grenzwert eingehalten wird. Das Absterben der Kultur im Reaktor R4 zeigt deutlich einen Schwachpunkt einer manuellen Regelung, die eine kontinuierliche Überwachung mit einem Alarmsystem erfordert, um einen pH-Grenzwert sicher einhalten zu können und so einen CO₂-Mangel zu vermeiden.

Tab. 5-2: Durchschnittswerte über die Versuchszeit und Standardabweichungen

Reaktor	pH-Durchschnittswert (Automatische Regelung)	pH-Durchschnittswert (Manuelle Regelung)
R1	7,10 ± 0,11	/
R2	6,99 ± 0,22	/
R3	/	6,98 ± 14

Die Auswertung der Versuchsreihe III ergibt, dass die Substitution des Nährmediums NM1 durch das Nährmedium NM3 ohne eine Auswirkung auf die Produktivität der Biomasse möglich ist. Außerdem wurde erkannt, dass niedrigere Phosphatkonzentrationen in der Suspension keine negative Auswirkung auf die Produktivität haben. Die durchschnittliche Abweichung der gemessenen Phosphatkonzentrationen in den Nährmedien NM1 und NM3 beträgt 54,19 %.

Die Trübung der Suspension unter Verwendung von Nährmedium NM3 wurde durch Feststoffpartikel des Nährstoffes MgNH₄PO₄ verursacht.

Da mittels eines höheren CO₂-Volumenstromes von 0,0326 vvm bis 0,0694 vvm während der manuellen Regelung keine höheren Biomassenkonzentrationen erreicht wurden, ist anzunehmen, dass die CO₂-Volumenströme mit 0,0043 vvm bis 0,0087 vvm für diesen Versuchsaufbau ausreichend sind, wenn der pH-Wertbereich unter 7,3 eingehalten wird.

Im Hinblick auf eine Entwicklung des Labor-Testsystems zu einem Freilandsystem, ist eine automatische Regelung anzuraten, da die Produktivität und somit der CO₂-Bedarf unter natürlichen Umweltbedingungen stärker schwankt. Es ist eine sichere Alternative zur manuellen Regelung, die eine kontinuierliche Überwachung mit einem

Alarmsystem erfordert um einen pH-Grenzwert sicher einhalten zu können und so einen starken CO₂-Mangel zu vermeiden.

5.4 Zelluläre Aufnahme von Stickstoff

Wie in der ersten Versuchsreihe festgestellt, ist die Reproduzierbarkeit in Bezug auf zelluläre Aufnahme des Stickstoffs unter bestimmten Nährstoffverfügbarkeiten im Nährmedium aufgrund der großen Abweichung, bedingt durch begrenzte Messwertmenge während der Versuchsreihe I, nicht möglich. Unter Einbezug der Messwerte aus darauf folgenden Versuchsreihen wird untersucht, ob ein Trend zu erkennen ist. Die Abb. 5-20 zeigt jedoch, dass kein Trend im Zusammenhang zwischen der Nitratkonzentration in der Suspension und dem organischen Stickstoff zu erkennen ist. Zum einem ist der Nitratkonzentrationsbereich mit 333 bis 538 mg l⁻¹ in dieser Versuchsdurchführung stark begrenzt. Zum anderen ergeben die Ergebnisse der Nitratverteilung in der Suspension unter Einsatz von Nährmedien NM1 und NM3 aus der Versuchsreihe III, dass weitere anorganische Stickstoffverbindungen wie Ammonium in der Suspension vorliegen und als N-Quelle für die zelluläre Aufnahme dienen können (vgl. Abb. 5-21). Dem zu Folge kann in dieser Versuchsdurchführung keine eindeutige Aussage über den Zusammenhang zwischen Nitratkonzentration und dem organischen Stickstoffgehalt in der Suspension getroffen werden.

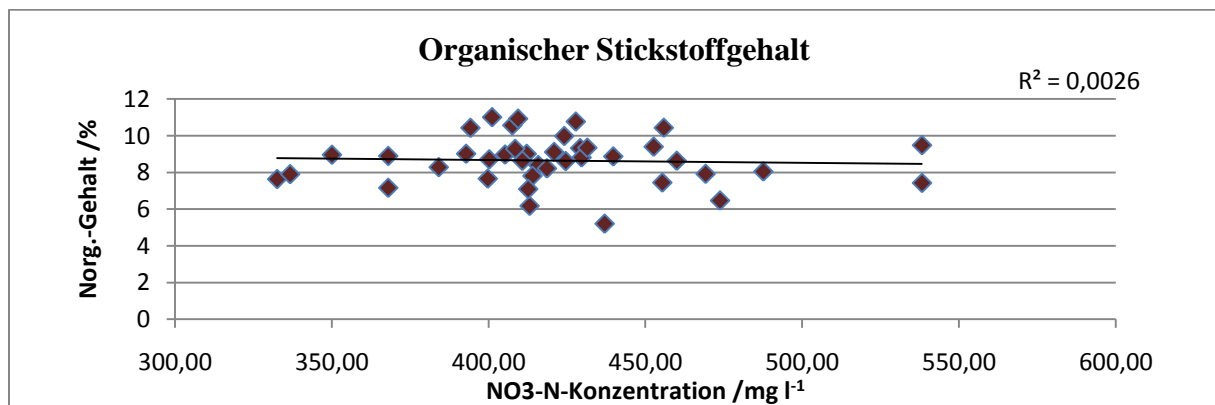


Abb. 5-20: Organischer Stickstoffgehalt in Abhängigkeit von der Nitratkonzentration in Suspension

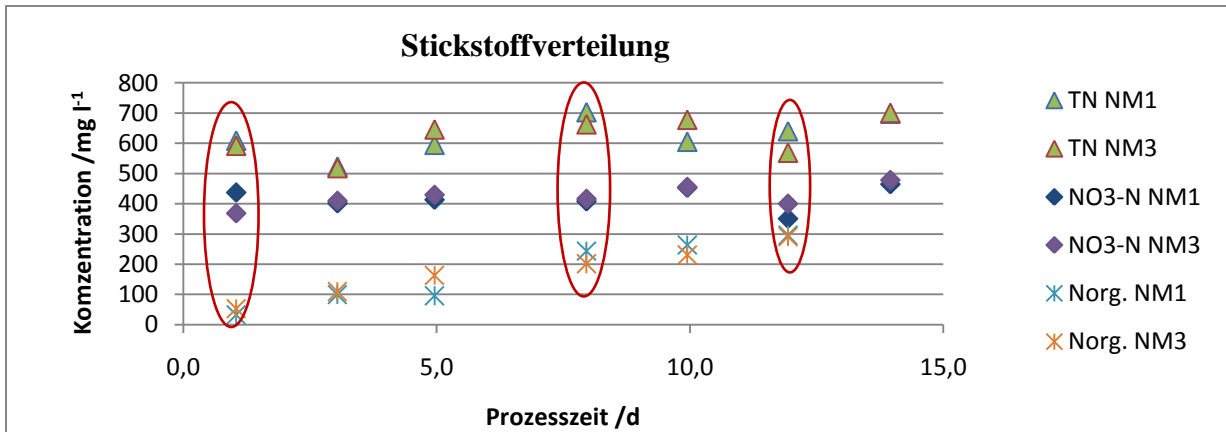


Abb. 5-21: Stickstoffverteilung in Suspension unter Einsatz von Nährmedien NM1 und NM3, Versuchsreihe III; die rote Umrandung markiert die unstimigen Stickstoffverteilungen

6 Zusammenfassung

Eine Produktion von Mikroalgenbiomasse in Photobioreaktoren unter Verwendung von Abgasen und unter effizienter Nutzung von Nährstoffen in geschlossenen Reaktorsystemen ist eine ökologisch nachhaltige und effiziente Alternative zu konventionellen Energiepflanzen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen zur Realisierung des vom Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) modifizierten Bioraffineriekonzepts nach Chisti (2008) beitragen. Das Konzept stellt eine algenbasierte Prozesskette dar, welche mit Rauchgas als CO₂-Quelle beginnt, mit einer stofflichen und energetischen Nutzung der produzierten Biomasse fortfährt und mit einer Rückführung von Nährstoffen aus der Fermentation endet [Wieczorek et al., 2013].

Ziel dieser Arbeit war es, Nährmedien in einem geschlossenen Airlift-Säulen-Photobioreaktorsystem zur Kultivierung des photoautotrophen Mikroorganismus *Chlorella vulgaris* zu optimieren. Die Optimierung erfolgte hinsichtlich der Substitution konventioneller Dünger durch aus Fermentationgärresten gewonnene Magnesiumammoniumphosphat (MgNH₄PO₄) als die Phosphat- und Stickstoffquelle. Um diese Nährstoffquelle verifizieren zu können, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurde ein Nährmedium in Anlehnung an Hindersin et al. (2012) mit konventionellem Dünger (Flory Basic Dünger 2) und Kaliumnitrat (KNO₃) eingesetzt, um Reproduzierbarkeit des Biomassenwachstums in vier voneinander unabhängigen Photobioreaktoren nachzuweisen. In der nachfolgenden Versuchsreihe wurde das Biomassenwachstum in zwei etablierten Nährmedien, dem Nährmedium in Anlehnung an Hindersin et al. (2012) und dem Medium in Anlehnung an Pohl et al. (1986), verglichen. Das Nährmedium nach Pohl et al. (1986) erforderte neben der Zugabe von KNO₃ und Kaliumdihydrogenphosphat (KH₂PO₄) die Zugabe von Spurenelementen. Anschließend wurde in der dritten Versuchsreihe das Biomassenwachstum im Nährmedium mit der primären Phosphatquelle MgNH₄PO₄ und das Biomassenwachstum im Medium nach Hindersin et al. (2012) verglichen. Zum Nachweis der Reproduzierbarkeit und zum Vergleich der Messwerte unter differenzierten Kultivierungsbedingungen wurden Standardabweichungen der Mittelwerte herangezogen. Es wurde eine statische Kultivierung in einem Fed-Batch-Verfahren durchgeführt. Die angestrebten Nährstoffkonzentrationen betragen 200 mg l⁻¹ Phosphat (PO₄³⁻) und 2000 mg l⁻¹ Nitrat (NO₃⁻). Das effektive Nutzvolumen der Photobioreaktoren betrug 8,0 Liter. Die Ergebnisse der Versuchsreihen zeigen, dass unter dem Einsatz der drei aufgeführten Nährmedien vergleichbare Biomassenkonzentrationen erzielt werden können. Somit ergab die Auswertung der Versuchsreihen, dass eine Substitution durch das

Nährmedium mit der primären Phosphatquelle MgNH_4PO_4 ohne Auswirkung auf die Produktivität der Biomasse möglich ist. Somit ist eine Rückführung von Phosphat aus der Fermentation in die Mikroalgenkultivierung umsetzbar. Außerdem wurde erkannt, dass niedrigere Phosphatkonzentrationen in der Suspension keine negative Auswirkung auf die Biomassenproduktivität von *Chlorella vulgaris* haben.

Des Weiteren wurde während der Versuchsreihen die zelluläre Aufnahme des Stickstoffs in Abhängigkeit von der Nitratverfügbarkeit in Nährmedien dargestellt und ausgewertet. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe ergaben, dass die Reproduzierbarkeit in Bezug auf die zelluläre Aufnahme des Stickstoffs unter bestimmten Nährstoffverfügbarkeiten in der Suspension aufgrund der großen Abweichung des organischen Stickstoffgehaltes, bedingt durch die begrenzte Messwertmenge, nicht möglich ist. Unter Einbezug der Messwerte aus darauf folgenden Versuchsreihen wurde untersucht, ob ein Trend zu erkennen ist. Die Auswertung ergab, dass kein Trend im Zusammenhang zwischen der Nitratkonzentration und dem organischen Stickstoff in der untersuchten Suspension zu erkennen ist. Zum einen war der Nitratkonzentrationsbereich mit 333 bis 538 mg l^{-1} in dieser Versuchsdurchführung stark begrenzt. Zum anderen ergaben die Ergebnisse der Nitratverteilung in der Suspension unter Einsatz der Nährmedien aus der Versuchsreihe III, dass weitere anorganische Stickstoffverbindungen wie Ammonium in der Suspension vorlagen und als Stickstoffquelle für die zelluläre Aufnahme dienen konnten. Dem zu Folge konnte in dieser Versuchsdurchführung keine eindeutige Aussage über den Zusammenhang zwischen Nitratkonzentration und organischem Stickstoffgehalt in Suspension getroffen werden.

Während der Versuchsreihen wurde ebenfalls die Optimierung der CO_2 -Volumenstromregelung über den pH-Wert als Stellgröße untersucht, und die automatisierte der manuellen Regelung gegenüber gestellt. Zur Bestimmung des pH-Wertes wurde je Reaktor eine pH-Glaselektrode installiert. Zur manuellen CO_2 -Volumenstromregelung wurden Schwebekörper Durchflussmesser/-regler und zur automatisierten CO_2 -Zufuhr Magnetventile eingesetzt. Die CO_2 -Versorgung erfolgte mittels einer Gasflasche mit reinem CO_2 (99,995 %). Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe ergaben, dass eine Regelung mit einem konstanten CO_2 -Volumenstrom von 0,0043 vvm mit zunehmender Biomassenkonzentration in einer exponentiellen Wachstumsphase einen limitierenden Einfluss auf die Produktivität der Mikroalgenbiomasse hat. Der CO_2 -Volumenstrom wurde in Folge dessen im Verlauf der ersten und der zweiten Versuchsreihe auf 0,0069 vvm und später auf 0,0087 vvm erhöht. Der Volumenstrom wurde erhöht, wenn der pH-Mittelwert 7,3 erreichte. In der zweiten Versuchsreihe konnten mit der Regelung des CO_2 -Volumenstromes die pH-Werte mit dem Durchschnittswert von $7,16 \pm 0,14$ im Vergleich zu der ersten Versuchsreihe durchgehend konstanter gehalten und die

durchschnittliche Biomassenkonzentration mit $3,20 \text{ g l}^{-1}$ um $0,25 \text{ g l}^{-1}$ höher erzielt werden. In der dritten Versuchsreihe diente während der manuellen Regelung der pH-Sollwert 7,0 und während der automatischen Regelung der pH-Grenzwert 7,3 als Stellwert. Da mittels eines höheren CO_2 -Volumenstromes von 0,0260 vvm bis 0,0694 vvm und einem pH-Durchschnittswert von $6,98 \pm 0,14$ keine höheren Biomassenkonzentrationen erreicht wurden, ist anzunehmen, dass die CO_2 -Volumenströme mit 0,0043 vvm bis 0,0087 vvm für diesen Versuchsaufbau ausreichend sind, wenn der pH-Wertbereich unter 7,3 eingehalten wird. Beim Differenzieren der pH-Durchschnittswerte über die Versuchszeit und der dazugehörigen Standardabweichungen in den Reaktoren kann nicht eindeutig gesagt werden, dass während der automatischen Regelung die pH-Werte durchgehend konstanter gehalten werden konnten, als während der manuellen Regelung. Im Hinblick auf eine Entwicklung des Labor-Testsystems zu einem Freilandssystem, ist die automatische Regelung anzuraten, da die Produktivität und somit der CO_2 -Bedarf unter natürlichen Umweltbedingungen stärker schwankt. Es ist eine betriebskostensenkende und sichere Alternative zur manuellen Regelung, die eine kontinuierliche Überwachung mit einem Alarmsystem erfordert, um einen pH-Grenzwert sicher einhalten zu können und so einen starken CO_2 -Mangel zu vermeiden.

7 Ausblick

Dieses Kapitel soll einen Ausblick geben, wie die eingesetzten Methoden und das Testsystem optimiert und erweitert werden können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine Substitution von konventionellen Nährmedien durch ein Nährmedium mit der primären Phosphatquelle Magnesiumammoniumphosphat (MgNH_4PO_4) ohne eine Auswirkung auf die Produktivität der Biomasse möglich ist. Als primäre Stickstoffquelle in den Medien diente während der Versuchsdurchführung der konventionelle Nährstoff Kaliumnitrat (KNO_3). In den nachfolgenden Untersuchungen sollte untersucht werden, ob mit dem aus Fermentationsrest gewonnenen Nährstoff Ammoniumsulfat (NH_4SO_4) als Stickstoffquelle vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können. Ferner sollte die Zugabe von der Phosphatquelle MgNH_4PO_4 optimiert werden. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass MgNH_4PO_4 nicht vollständig in Lösung vorlag, und somit eine Trübung der Suspension verursachte. Die Phosphatkonzentrationen lagen in der trüben Suspension deutlich unter dem Richtwert. Die niedrigere Phosphatkonzentration in der Suspension hatte, wie aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit hervorgeht (vgl. Kap. 5.3), keine negative Auswirkung auf die Biomassenproduktivität von *Chlorella vulgaris*. Demnach sollte untersucht werden, ob dieses Ergebnis unter einer höheren PPFD reproduzierbar ist. Je nach Algenart und Zelldichte wird eine Einstrahlung mit einer PPFD zwischen 1000 und 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ benötigt [Qiang und Richmond, 1996].

Wie aus Kap. 3.3.2 und Kap. 3.3.3 hervorgeht, ist die Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR) eine wichtige Einflussgröße bezüglich der Nährstoffaufnahme und CO_2 -Assimilation und somit der Produktivität der Mikroalgenbiomasse. Die Nährstoffaufnahme der Zellen ist lichtabhängig, da eine enge Interaktion zwischen Photosynthese und Nitrat- und Phosphatassimilation stattfindet (vgl. Kap. 3.3.3). Da PAR als ein stark limitierender Faktor in dem Testsystem auftritt, kann es sein, dass der Einfluss unterschiedlicher Nährstoffe in den Medien nicht erkennbar war. In nachfolgenden Arbeiten sollte die PAR-Intensität erhöht werden. Dies kann erfolgen durch eine Vergrößerung der Reaktor-Bestrahlungsfläche oder durch eine Erhöhung der Lichtintensität. Das Testsystem kann mit weiteren Lampen und mit reflektierenden Oberflächen erweitert werden, um die Bestrahlungsfläche zu vergrößern. Dabei sollte bedacht werden, dass durch Einsatz punktueller Lichtquellen ein Interferenzmuster entsteht. Die effektiv bestrahlte Fläche wäre demnach kleiner. Ab vier Lichtquellen treten im Interferenzmuster auch Nebenmaxima auf, sodass die PAR-Ausbeute höher und homogener ausfällt [Tipler und Mosca, 2006]. Besser ist es, mehrere Lichtquellen mit höherer Lichtintensität zu

installieren. Da jedoch die Infrarotstrahlung und somit die Suspensionstemperatur dann zu hoch wäre, sollten LEDs eingesetzt werden, LED rot/blau mit PAR-Ausbeute von $1,3 \mu\text{mol J}^{-1}$ (vgl. Tab. 3-1).

Ein weiterer Parameter, der die PAR-Ausbeute beeinflusst, ist die Durchmischung der Mikroalgensuspension. In den Untersuchungen von Leupold (2013) wurde belegt, dass die höchst eingestellte volumetrische Begasungsrate von 0,86 vvm die höchste Biomasseproduktivität der Mikroalge *Scenedesmus obliquus* bewirkte. Dem zu Folge sollte untersucht werden, ob eine höhere Stärke der Mischrate eine positive Auswirkung auf Produktivität der Mikroalge hat, wobei die mögliche Auswirkung der mechanischen Belastung auf die Mikroalge *Chlorella vulgaris* durch eine hohe Begasungsrate mit berücksichtigt werden sollte.

Um die optimalen Kultivierungsbedingungen gewährleisten zu können, sollte die Temperatur der Suspension kontinuierlich gemessen werden. Hierfür kann eine Temperatur/pH-Wert Kombielektrode eingesetzt werden. Die Temperatur hat einen Einfluss auf die CO_2 -Löslichkeit im Wasser (vgl. Kap. 3.3.4) und die Nährstoffaufnahme (vgl. Kap. 3.3.5), und somit auf den pH-Wert und die Produktivität der Biomasse. Einerseits könnten die möglichen Temperaturschwankungen während der Versuchszeit erfasst werden und als ein weiterer Parameter in die Auswertung einfließen. Andererseits könnte die Temperatur durch eine Erweiterung des Testsystems mit einem Wärmetauscher geregelt werden.

Die Kohlenstofffixierungsrate hängt von der Produktivität ab, und die Produktivität von der Kohlenstoffbegasungsrate. Die vorangehenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die Produktivität beim pH-Wert 7,3 sinkt. Demnach sollte untersucht werden, ob höhere Produktivität erreicht werden kann, wenn eine CO_2 -Volumenstromregelung mit einem pH-Grenzwert von 7,2 durchgeführt wird. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Kohlenstoff-Stoffwechselweg, insbesondere Carboxylierung der Mikroalge zu untersuchen. Bei Mikroalgen wie *Chlorella vulgaris* verläuft die Carboxylierungsreaktionen in zwei Zyklen parallel, in einem Calvin-Zyklus und Hatch-Slack-Zyklus (vgl. Kap. 3.3.4). Wenn eine Konkurrenzreaktion unterdrückt wird, dominiert die andere. Es sollte untersucht werden, ob die Carboxylierungsreaktion in einem Hatch-Slack-Zyklus durch Einflussgrößen wie Kohlenstoffverfügbarkeit adaptiert werden kann, indem bei der CO_2 -Volumenstromregelung ein pH-Wert von 8,0 konstant eingehalten wird. Denn der C_4 -Stoffwechselweg in einem Hatch-Slack-Zyklus hat einen höheren Wirkungsgrad der Photosynthese [Kaltschmitt et al., 2009]. Dies hätte möglicher Weise zur Folge, dass die Produktivität unter gemäßigten Lichtverhältnissen zu steigern ist. Zudem haben die C_4 -Stoffwechselwegprodukte einen höheren Heizwert und somit eine höhere Biogasausbeute. Die typische C_4 -Pflanze Mais hat den Heizwert von $18,461 \text{J g}^{-1} \text{TS}$;

zum Vergleich beträgt der Heizwert von der typischen C₃-Pflanze Roggen 17,5 J g⁻¹ TS [Born und Casaretto, 2012].

Während der Versuchsdurchführung wurden lichtmikroskopischen Aufnahmen von der Mikroalgensuspension gemacht. Diese zeigten, dass eine Mischkultur in der Suspension vorlag. Um mikroalgenartspezifische Aussagen bezüglich der Biomassenproduktivität unter definierten Kultivierungsbedingungen machen zu können, sollte eine Mischkultur vermieden werden. Hierbei kann eine dominante Mikroalgenart eingesetzt werden, die unter optimalen Kultivierungsbedingungen das Wachstum anderer Arten unterdrückt. Zum anderen konnte während der Versuchsreihen eine starke Biofilmbildung an der bestrahlten Reaktorinnenoberfläche beobachtet werden. Dieses Problem kann ebenfalls durch eine Kultivierung anderer dominanter Algenarten wie *Scenedesmus obliquus* gelöst werden.

Die analytischen Bestimmungen können optimiert werden. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe ergaben, dass die Reproduzierbarkeit in Bezug auf zelluläre Aufnahme des Stickstoffs unter bestimmten Nährstoffverfügbarkeiten in Suspension auf Grund der großen Abweichung des organischen Stickstoffgehaltes in einem Medium nicht möglich war. Die Messwerte der Bestimmung von organischem Stickstoff wiesen eine breite Streuung auf. Dieser Sachverhalt ist unter anderem auf die Messabweichungen während der Durchführung zur Bestimmung von TS zurück zu führen. Die Bestimmung von N_{org} bezogen auf Mikroalgenbiomasse auf den Filtern (Whatman GF/C Ø25mm) erfolgte aus der TS Bestimmung aus einem definierten Volumen (1bis 3 ml) mit Vakuumfiltration und anschließender Trocknung (vgl. Kap. 4.3.3).

Eine vollständige Trocknung von Filtern ist unter normalen Laborbedingungen praktisch unmöglich. Dadurch entsteht eine Messabweichung, so dass bei anschließender Analyse TS-Gehalt über 100% ermittelt werden kann. Die möglichen zufälligen Messabweichungen wurden durch die Abweichung der Luftfeuchtigkeit beim Einwiegen bzw. Auswiegen sowie die Abweichung des Volumens der Probe beim Pipettieren beeinflusst. Die Einflussgrößen der systematischen Messabweichungen waren die Messabweichung der Analysenwaage und die Abweichung der Masse an TS durch Verbleib der Nährstoffe in der Biomasse. Dabei variiert die relative Messunsicherheit in Abhängigkeit von dem Suspensionsvolumen. Diese Messunsicherheit kann weiter minimiert werden, um möglichst genaue und präzise Messwerte zu erzielen. Dies sollte erfolgen durch Einsatz von Filtern mit einem größeren Durchmesser als 25 mm und größeren Volumina als 3 ml an Mikroalgensuspension.

Genauere TS-Messwerte bei der Erstellung von Korrelationsgeraden von TS zu OD (vgl. Abb. 5-1) hätten ebenfalls zur Folge, dass die Abweichungen der berechneten TS-Werte reduziert werden könnten. In weiteren Arbeiten sollte zudem untersucht werden, ob die Abweichungen der berechneten TS-Werte durch eine Begrenzung des OD-Messbereiches minimiert werden können. Die Begrenzung des OD-Messbereiches kann mittels einer Verdünnung der Proben erfolgen. Die Messwerte werden dann der Verdünnung entsprechend aufsummiert. Der Messbereich sollte auf den OD-Wert von 0,5 E bis 1,0 E begrenzt sein, sodass ausschließlich eine Korrelationsgerade im unteren Messwertbereich für die Umrechnung in Biomassekonzentration verwendet werden kann.

Zur Trocknung der Filter wurden während der Versuchszeit zwei Methoden verwendet. Bei der ersten wurde die Trocknung (bei 80 °C) im Thermoschrank (Typ 430, Memmert) mindestens 12 Stunden durchgeführt und anschließend im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei der zweiten Methode wurde mittels eines Infrarottrockners (Sartorius MA 100) getrocknet. Da die Trockensubstanzbestimmung mittels des Thermoschranks besonders einen zeitlichen Aufwand erfordert, ist die Methode mittels eines Infrarottrockners für eine unmittelbare Bestimmung von TS im Vergleich besser geeignet.

Zur Ermittlung von PAR-Daten sollten in den weiterführenden Arbeiten die zufälligen Messabweichung bestimmen werden. Da die erzielten Biomassenkonzentrationen in den durchgeführten Versuchsreihen nicht den ermittelten PPFD-Werten entsprechend variieren, wird angenommen, dass der Einfluss der zufälligen Messabweichung bei der Bestimmung vom PAR groß sein muss. Die maßgeblichen zufälligen Messabweichungen ergaben sich durch eine lokale Abweichung des Messpunktes, bedingt durch die gewölbte Oberfläche des Säulenreaktors. Mit einer bekannten zufälligen Messabweichung lässt sich ein Vertrauensbereich definieren, so dass eine präzisere Angabe von PAR möglich ist.

Literaturverzeichnis

Abendrot C., Luschnig O., 2009: Biogasproduktion und Bioenergiegewinnung mit gleichzeitigem Einsatz von Algenkulturen; Bio H2 Energy GmbH und Robert-Boyle-Institut.

Acien Fernandez F.G., Garcia Camacho F., Sanchez Perez J.A., Molina Grama E., 1998: Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures, *Biotechnology and Bioengineering*.

Ackermann U., 2007: Mikrotechniken für eine effiziente Bioenergieerzeugung; VDI/VDE-IT

Belz S., Ganzer B., Hammer F., 2010: Kopplung einer regenerativen Brennstoffzelle mit einem Photobioreaktor im Hinblick auf Nachhaltigkeit; Berichtsnummer: IRS-10-IB04.

Born J., Casaretto R., 2012: Die theoretischen 100 Prozent geernteter Energie; Aus der Wissenschaft; *Biogas Journal*, Biogas Akademie Flintbek

Budzikiewicz H., Schäfer M., 2005: Massenspektrometrie – Eine Einführung, Wiley-VCH, Weinheim.

Chisti Y., 2008: Biodiesel from microalgae beats bioethanol; *Trends in Biotechnology*, 26 (3).

Degen J., Uebele A., Retze A., Schmid-Staiger U., Trösch W., 2001: A novel airliftphotobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect, *Journal of Biotechnology* No. 92, Elsevier.

Döhler G., 1972: Untersuchungen des Einflusses der Temperatur auf die Photosynthese-Induktion bei *Chlorella vulgaris* mit radioaktivem CO₂, *Planta (Ber.)* 107; Springer Verlag.

Fernandez E., Galvan A., 2008: Nitrate Assimilation in *Chlamydomonas*. *Eukaryotic Cell* 7 (4), 555–559.

Findenegg G. R., 1974: Beziehung zwischen Carboanhydraseaktivität und Aufnahme von HCO₃⁻ und Cl⁻ bei der Photosynthese von *Scenedesmus obliquus*, *Planta (berl.)* 116; Springer Verlag.

Gimbel R.; Jekel M.; Ließfeld R., 2004: Wasseraufbereitung – Grundlagen und Verfahren, Oldenbourg Industrieverlag München-Wien.

Griffiths M.J., Harrison S.T., 2009: Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production *J. Appl. Phycol.* 21 (5), 493-507.

Hempel D.C., Haarstrick A., Krull, R., 2012: Bioverfahrenstechnik, Springer Verlag.

Hindersin S., Leupold M., Kerner M., Hanelt D., 2012: Irradiance Optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors, *Bioprocess Biosyst Eng*; Springer Verlag.

Hoffmann M., 2010: Physiologische Untersuchungen parameterinduzierter Adaptionsantworten von *Nannochloropsis salina* in turbidostatischen Prozessen und deren biotechnologischer Potentiale; Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel in Büsum.

Horton H.R., Moran L.A., Scrimgeour K.G., Rawn J.D., Perry, M.D., 2008: Biochemie; Pearson Education Deutschland GmbH.

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H., 2009: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg.

Kappas M., 2009: Klimatogie; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

Leupold M., 2013: Einfluss von Mischrate und Temperaturführung auf die Kultivierung von Mikroalgen in Photobioreaktoren; Dissertation, Universität Hamburg.

Lüttge, U., Kluge, M., 2012: Botanik: die einführende Biologie der Pflanzen. John Wiley & Sons.

Maier M., 2008: Untersuchung zur effizienten Beleuchtung Photobioreaktoren in Lebenserhaltungssystemen, Diplomarbeit IRS-08-S50, Universität Stuttgart.

Meiser A., 2004: Produktion von Eicosapentaensäure mit *Phaeodactylum* im Flat Panel Airlift Reaktor; Forschungsbericht.

Okrusch M., 2005: Mineralogie; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Paschmann A. de Vries T., Lüchtenborg K., Arshadi, N., I. Parchmann I., 2000: Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffkreislauf, Teil 1, MNU 53/3.

Pulz O., 2009: Treibstoffe aus Algen, labor&more, succidia Verlag.

Pulz O., 2009: Biotechnologische Energieumwandlung: Gegewertige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf. Thomas Bley (Hrg.), Deutsche Akademie Der Technikwissenschaften, Springer Verlag.

Pulz O., Gross W., 2004: Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 65, 635–648.

Qiang H., Richmond A., 1996: Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate photobioreactor, *Journal of Applied Phycology* 8 (2).

Rosello Sastre R., Posten C., 2010: Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe, *Chemie Ingenieur Technik*.

Stach S., 2005: Polysaccharide aus marinen Bakterien und der Mikroalge vulgaris. Cuviller Verlag, Göttingen.

Tipler A.P., Mosca G., 2006: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Spektrum Akademischer Verlag.

UBA, 2012: www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/meere/mikroalgen.htm, [05.10.2012].

Universität Ulm - Institut für Analytische und Bioanalytische Chemie , 2010/2011: Begleittext zur Photometrie.

VDI: VDI / VDE Richtlinie 3513 Bl.1

Wieczorek N., Voss T., Kücük M.A., Pell L., Mannweiler S., Kuchta K., 2013: Auswirkungen unterschiedlicher Nährmedien auf die Kultivierung der Mikroalgen *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus obliquus* in einem Airlift-Säulenreaktor-System; Posterpräsentation; IBN Forum 12.03.2013.

Zewuhn A., Calmano W., Gerth J., 2013: Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser; Projekt von IUE-TUHH.

Anhang

I. Geräte und Materialien

- pH-Glaselektrode (InLabReach MettlerToledo (300mm))
- Schwebekörper Durchflussmesser/-Regler (KOBOLT, KFR-2114 NO)/ (KOBOLT, KFR-2115 NO)
- Kegelrückschlagventile (SERTO, SO CV 23A21-8-8)
- Magnetventile (BRONKHORST, S.N. 910116 B/S)
- Software (LabVIEW 7.1)
- Metallhalogenid-Lampen (Osram; HQI-TS 400 W)
- Schläuche (SERTO, 6mm)
- Messzelle (SN:Q, LI-COR) und Messwerterfasser (SN: DLA-1695, LI-COR)
- Photometer (HACH LANGE, DR 3900)
- Küvettentest (HACH LANGE, LCK 049)
- Küvettentest (HACH LANGE, LCK 340)
- Einmalspritze aufgesteckten Filter (FP 30/0,2 CA-S)
- Thermoschrank (Typ 430, memmert).
- Infrarottrockner (Sartorius MA 100)
- Filter (Whatman GF/C Ø25mm)
- Exsikkator
- Zentrifuge (3-18K, Sigma)
- Destillationsapparat (Gerhard, Vapodest) und anschließender Titration (Schott, Titro Line Alpha)
- CNS Analyser (Elementar, Vario Marco Cube)

II. Berechneten Mittelwerte und die Standardabweichungen der Mittelwerte

Tab. II-1: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe I

Zeit [d]	Mittelwert (R1/R2/R3/R4) [g/l]	Standardabweichung [g/l]	%
0,0			
0,8	0,267	0,072	27,10
1,8	0,516	0,041	8,00
2,8	0,700	0,071	10,14
3,8	1,031	0,451	43,80
4,8	1,507	0,447	29,65
5,9	1,914	0,203	10,61
6,8	2,229	0,230	10,32
7,8	2,248	0,153	6,82
8,8	2,441	0,191	7,82
9,8	2,557	0,283	11,08
10,8	2,611	0,193	7,37
11,9	2,865	0,148	5,17
12,9	2,952	0,124	4,20
13,8	2,956	0,096	3,25

Tab. II-2: Standardabweichungen der pH-Mittelwerte, Versuchsreihe I

Zeit [d]	pH-Mittelwert (R1/R2/R3/R4)	Standardabweichung
0,0		
0,8	6,43	0,25
1,8	6,66	0,31
2,8	6,86	0,32
3,8	7,00	0,29
4,8	7,05	0,21
5,9	7,15	0,21
6,8	7,18	0,21
7,8	7,25	0,25
8,8	7,20	0,22
9,8	7,05	0,13
10,8	6,90	0,08
11,9	7,05	0,26
12,9	7,20	0,20
13,8	7,28	0,13

Anhang

Tab. II-3: Relative Standardabweichungen der Nährstoffkonzentrationen und des organischen Stickstoffs, Versuchsreihe I

Zeit [d]	PO ₄ ³⁻ %	NO ₃ ⁻ %	Norg %
0,0	13,36	5,66	
0,8			
1,8	3,31	0,00	18,17
2,8			
3,8	4,65	1,40	9,90
4,8			
5,9	5,31	0,24	7,68
6,8			
7,8	1,64	1,14	5,22
8,8			
9,8	2,19	1,33	4,00
10,8			
11,9	1,07	0,87	2,97
12,9			
13,8	0,95	2,03	14,92
Durchschnitt	4,06	1,58	8,98

Tab. II-4: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe II

Zeit [d]	Mittelwert (R1/R2/R3/R4) [g/l]	Standardabweichung [g/l]	%
0,0	0,033	0,006	17,25
1,9	0,302	0,025	8,34
2,9	0,615	0,022	3,61
3,8	0,941	0,061	6,52
4,8	1,339	0,116	8,69
5,8	1,608	0,088	5,47
6,8	1,881	0,058	3,06
7,8	2,068	0,054	2,62
8,9	2,338	0,053	2,28
9,9	2,454	0,063	2,55
10,8	2,590	0,077	2,97
11,8	2,721	0,095	3,51
12,8	2,877	0,111	3,87
13,9	2,986	0,161	5,40
14,8	3,202	0,153	4,79
15,8	3,206	0,123	3,83

Anhang

Tab. II-5: Standardabweichungen der pH-Mittelwerte, Versuchsreihe II

Zeit [d]	pH-Mittelwert (R1/R2/R3/R4)	Abweichung
0,0		
1,8	6,78	0,34
2,9	7,08	0,13
3,8	7,00	0,27
4,8	7,20	0,29
5,8	7,28	0,26
6,9	7,05	0,17
7,8	7,10	0,08
8,9	7,18	0,13
9,9	7,23	0,17
10,8	7,23	0,17
11,8	7,18	0,21
12,8	7,23	0,22
13,9	7,29	0,11
14,8	7,26	0,11
15,8	7,31	0,12

Tab. II-6: Relative Standardabweichungen der Nährstoffkonzentrationen in den Nährmedien NM1 und NM3, Versuchsreihe III

Zeit [d]	PO ₄ ³⁻ %	NO ₃ ⁻ %
0,0		
1,0	57,89	12,12
2,1		
3,0	31,36	1,44
4,0		
5,0	20,61	2,70
6,0		
8,0	35,87	1,42
9,0		
9,9	84,75	0,43
11,0		
11,9	73,35	9,37
13,0		
14,0	75,49	2,07
Durchschnitt	54,19	4,22

Tab. II-7: Standardabweichungen der gemittelten Biomassenkonzentrationen, Versuchsreihe III

Zeit [d]	Mittelwert (R1/R2/R3) [g/l]	Standardabweichung [g/l]	%
0,0	0,14	0,01	3,66
1,0	0,34	0,04	10,58
2,1	0,57	0,06	10,27
3,0	0,82	0,04	5,23
4,0	1,48	0,16	10,62
5,0	1,75	0,11	6,53
6,0	2,09	0,10	4,94
8,0	2,44	0,05	2,20
9,0	2,65	0,05	1,97
9,9	2,83	0,04	1,48
11,0	3,05	0,07	2,42
11,9	3,00	0,02	0,61
13,0	3,19	0,02	0,50
14,0	3,05	0,09	2,94

Tab. II-8: Abweichungen der pH-Mittelwerte, Versuchsreihe III

Zeit [d]	pH-Mittelwert (R1/R2/R3)	Standardabweichung
0		
1,0	6,80	0,17
2,1	6,87	0,23
3,0	6,80	0,20
4,0	7,00	0,10
5,0	7,05	0,13
6,0	7,07	0,06
8,0	7,19	0,20
9,0	7,08	0,14
9,9	7,09	0,02
11,0	7,10	0,00
11,9	7,10	0,00
13,0	7,21	0,15
14,0	6,99	0,06
Durchschnitt	7,03	
	± 0,13	

III. Messwerttabellen

Folgende Parameter wurden während der Versuchsreihen dokumentiert:

Anhang

Versuchsreihe I; Nähmedium NM1; Reaktor R1

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,39	0,29		2088	139				0,10				
0,8	6,4	3,00	0,05	0,0043	0,50	0,37	0,13						0,18	178,00	174,00	288,00	72,00
1,8	6,7	3,00	0,05	0,0043	0,73	0,55	0,73	2340	241	69,54	9,483	591	0,16	165,33	145,00	283,00	68,00
2,8	6,9	3,00	0,05	0,0043	0,93	0,71	0,90						0,48	171,00	157,00	289,00	67,00
3,8	7,1	3,00	0,05	0,0043	1,15	1,20	1,17	2040	195	92,39	7,919	552	0,57	174,33	162,00	289,00	72,00
4,8	7,1	3,00	0,05	0,0043	1,39	1,73	1,23						0,27				
5,9	7,2	3,00	0,05	0,0043	1,53	2,04	1,50	1800	182	117,10	7,807	534	0,22				
6,8	7,2	3,00	0,05	0,0043	1,62	2,24	1,95						0,21				
7,8	7,3	3,00	0,05	0,0043	1,72	2,45	2,10	1846	188	180,92	8,615	553	0,01	174,00	79,00	353,00	90,00
8,8	7,3	3,00	0,08	0,0069	1,72	2,46	2,15						0,04				
9,8	7,1	3,00	0,08	0,0069	1,74	2,50	2,55	1820	178	209,52	8,217	652	0,31				
10,8	6,9	3,00	0,10	0,0087	1,88	2,81	3,20						0,18				
11,9	7,1	3,00	0,10	0,0087	1,96	3,00	3,50	1446	186	267,24	7,635	682	0,13				
12,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	2,03	3,14	3,20						-0,05				
13,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	2,01	3,09	4,70	2060	178	303,83	6,465	692					

Anhang

Versuchsreihe I; Nähmedium NM1; Reaktor R2

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,58	0,44		2244	171				-0,28				
0,8	6,5	3,00	0,05	0,0043	0,30	0,22	0,20						0,24	176,67	178,00	278,00	74,00
1,8	6,7	3,00	0,05	0,0043	0,61	0,46	0,67	2420	242			549	0,14	172,00	152,00	291,00	73,00
2,8	6,9	3,00	0,05	0,0043	0,78	0,60	0,93						-0,22	175,33	164,00	289,00	73,00
3,8	7,0	3,00	0,05	0,0043	0,99	0,37	0,83	2020	202			537	0,50	178,00	160,00	299,00	75,00
4,8	7,0	3,00	0,05	0,0043	1,34	0,84	1,10						0,69				
5,9	7,1	3,00	0,05	0,0043	1,47	1,61	1,50	1760	174			542	0,32				
6,8	7,2	3,00	0,05	0,0043	1,56	1,90	1,75						0,20				
7,8	7,3	3,00	0,05	0,0043	1,59	2,10	2,35	1894	197			553	0,07	182,33	82,00	371,00	94,00
8,8	7,2	3,00	0,05	0,0069	1,62	2,17	2,05						0,07				
9,8	7,0	3,00	0,08	0,0069	1,68	2,24	2,70	1810	183			557	0,13				
10,8	6,9	3,00	0,10	0,0087	1,82	2,36	3,00						0,30				
11,9	7,1	3,00	0,10	0,0087	1,92	2,67	3,20	1502	181			682	0,22				
12,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,93	2,90	2,80						0,03				
13,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,92	2,93	3,40	1872	170			747					

Anhang

Versuchsreihe I; Nähmedium NM1; Reaktor R3

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,40	0,30		2262	168				-0,10				
0,8	6,1	3,00	0,05	0,0043	0,30	0,22	0,00						0,28	180,33	183,00	287,00	71,00
1,8	6,2	3,00	0,05	0,0043	0,66	0,50	75,00	2340	230	49,49	7,423	523	0,24	176,67	157,00	300,00	73,00
2,8	6,4	3,00	0,05	0,0043	0,96	0,74	0,00						0,41	178,00	165,00	296,00	73,00
3,8	6,6	3,00	0,05	0,0043	1,13	1,15	59,61	2000	182	97,84	8,633	526	0,59	181,00	160,00	309,00	74,00
4,8	6,8	3,00	0,05	0,0043	1,38	1,70	0,00						0,30				
5,9	6,9	3,00	0,05	0,0043	1,53	2,04	55,29	1794	169	109,87	7,088	545	0,42				
6,8	6,9	3,00	0,05	0,0043	1,70	2,41	0,00						-0,13				
7,8	6,9	3,00	0,05	0,0043	1,64	2,28	62,75	1876	192	186,89	9,345	592	0,24	181,67	85,00	365,00	95,00
8,8	6,9	3,00	0,05	0,0069	1,75	2,52	0,00						0,40				
9,8	6,9	3,00	0,08	0,0069	1,93	2,92	60,00	1786	184	284,79	8,630	647	-0,34				
10,8	6,8	3,00	0,10	0,0087	1,77	2,57	0,00						0,37				
11,9	6,7	3,00	0,10	0,0087	1,95	2,97	59,87	1464	183	252,83	7,901	688	-0,09				
12,9	6,9	3,00	0,10	0,0087	1,91	2,87	0,00						0,00				
13,8	7,1	3,00	0,10	0,0087	1,91	2,87	58,95	2120	180	249,49	8,048	703					

Anhang

Versuchsreihe I; Nähmedium NM1; Reaktor R4

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	oben	mitte	unten
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,41	0,31		2196	141				-0,07				
0,8	6,7	3,00	0,05	0,0043	0,34	0,25	0,37						0,28	180,00	185,00	285,00	70,00
1,8	7,0	3,00	0,05	0,0043	0,71	0,54	0,70	2280	220			527	0,21	178,33	152,00	318,00	65,00
2,8	7,2	3,00	0,05	0,0043	0,98	0,75	1,07						0,63	172,00	156,00	290,00	70,00
3,8	7,3	3,00	0,05	0,0043	1,24	1,39	1,07	2020	186			526	0,39	177,67	168,00	295,00	70,00
4,8	7,3	3,00	0,05	0,0043	1,40	1,75	1,30						0,19				
5,9	7,4	3,00	0,05	0,0043	1,50	1,96	1,35	1784	179			531	0,45				
6,8	7,4	3,00	0,05	0,0043	1,68	2,37	1,95						-0,20	!			
7,8	7,5	3,00	0,05	0,0043	1,59	2,16	1,95	1816	184			598	0,44	176,67	78,00	360,00	92,00
8,8	7,4	3,00	0,05	0,0069	1,79	2,61	1,90						-0,04				
9,8	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,77	2,57	2,60	1796	181			572	0,12				
10,8	7,0	3,00	0,10	0,0087	1,83	2,70	2,80						0,13				
11,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,89	2,83	3,20	1688	180			700	0,07				
12,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,92	2,90	2,40						0,03				
13,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	1,93	2,93	3,30	1820	186			620					

Anhang

Versuchsreihe II; Nähmedium NM1; Reaktor R1

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,07	0,04							0,13				
1,9	6,8	3,00	0,05	0,0043	0,39	0,29	0,27	1958	188			486	0,30	159,67	95,00	317,00	67,00
2,9	7,1	3,00	0,05	0,0043	0,78	0,60	0,63						0,36				
3,8	7,1	3,00	0,05	0,0043	1,02	0,90	0,97	1762	169				0,39				
4,8	7,2	3,00	0,05	0,0043	1,20	1,30	1,40						0,31	153,67	92,00	306,00	63,00
5,8	7,3	3,00	0,08	0,0069	1,33	1,58	1,60	1792	177			552	0,24				
6,8	7,1	3,00	0,08	0,0069	1,44	1,84	1,80						0,22				
7,8	7,1	3,00	0,08	0,0069	1,54	2,05	2,05	1714	179			550	0,21				
8,9	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,64	2,28	2,10						0,10				
9,9	7,3	3,00	0,08	0,0069	1,69	2,38	2,40	1860	169			688	0,17				
10,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,76	2,54	2,50						0,10	158,67	90,00	320,00	66,00
11,8	7,2	3,00	0,10	0,0087	1,81	2,65	3,10	1912	199			685	0,12				
12,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,86	2,76	3,00						0,07				
13,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,89	2,84	3,40	1670	184			676	0,61				
14,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	2,14	3,39	4,20						0,00	157,67	93,00	317,00	63,00
15,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	2,14	3,39	3,55	1982	188								

Anhang

Versuchsreihe II; Nähmedium NM2; Reaktor R2

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,06	0,03							0,17				
1,9	6,9	3,00	0,05	0,0043	0,44	0,33	0,37	1782	167			435	0,23	165,33	95,00	331,00	70,00
2,9	7,1	3,00	0,05	0,0043	0,84	0,64	0,63						0,42				
3,8	7,1	3,00	0,05	0,0043	1,07	1,02	1,00	1848	175				0,24				
4,8	7,3	3,00	0,05	0,0043	1,21	1,32	1,25						0,16	165,67	92,00	338,00	67,00
5,8	7,4	3,00	0,08	0,0069	1,32	1,56	1,40	1864	176			483	0,36				
6,8	7,1	3,00	0,08	0,0069	1,46	1,88	1,80						0,06				
7,8	7,1	3,00	0,08	0,0069	1,52	2,02	1,85	1496	171			496	0,23				
8,9	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,65	2,30	2,10						0,20				
9,9	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,73	2,47	2,30	1536	171			567	0,00				
10,8	7,2	3,00	0,10	0,0087	1,75	2,53	2,30						0,99	159,00	91,00	317,00	69,00
11,8	7,2	3,00	0,10	0,0087	1,83	2,69	3,30	1984	191			684	0,20				
12,8	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,96	3,00	3,50						0,09				
13,9	7,3	3,00	0,10	0,0087	1,91	2,88	3,60	1710	146			689	-0,45				
14,8	7,2	3,00	0,10	0,0087	1,98	3,03	3,20						-3,13	161,33	92,00	325,00	67,00
15,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	2,02	3,12		1732	180								

Anhang

Versuchsreihe II; Nähmedium NM1; Reaktor R3

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	oben	mitte	unten
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,06	0,03							0,13				
1,9	6,3	3,00	0,05	0,0043	0,37	0,27	0,23	2080	192			492	0,35	167,00	95,00	336,00	70,00
2,9	6,9	3,00	0,05	0,0043	0,78	0,60	0,63						0,39				
3,8	6,6	3,00	0,05	0,0043	1,04	0,96	0,97	1758	163				0,47				
4,8	6,8	3,00	0,05	0,0043	1,29	1,50	1,45						0,16	166,33	94,00	337,00	68,00
5,8	6,9	3,00	0,08	0,0069	1,40	1,74	1,60	1750	178			576	0,27				
6,8	6,8	3,00	0,08	0,0069	1,50	1,96	1,90						0,17				
7,8	7,0	3,00	0,08	0,0069	1,58	2,15	2,05	1736	177			584	0,36				
8,9	7,0	3,00	0,08	0,0069	1,69	2,39	2,45						0,10				
9,9	7,0	3,00	0,08	0,0069	1,75	2,53	2,55	1604	186			668	0,38				
10,8	7,0	3,00	0,10	0,0087	1,83	2,70	2,90						0,00	163,67	98,00	326,00	67,00
11,8	6,9	3,00	0,10	0,0087	1,90	2,86	2,90	1980	174			752	0,71				
12,8	6,9	3,00	0,10	0,0087	1,94	2,94	3,60						0,36				
13,9	7,1	3,00	0,10	0,0087	2,05	3,19	4,00	1784	196			831	-0,33				
14,8	7,1	3,00	0,10	0,0087	2,08	3,25	3,70						-3,62	168,00	98,00	338,00	68,00
15,8	7,1	3,00	0,10	0,0087	2,05	3,18		1944	184								

Versuchsreihe II; Nähmedium NM2; Reaktor R4

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,05	0,0043	0,06	0,03							0,16				
1,9	7,1	3,00	0,05	0,0043	0,43	0,32	0,43	1786	162			445	0,26	152,67	95,00	298,00	65,00
2,9	7,2	3,00	0,05	0,0043	0,81	0,62	0,53						0,30				
3,8	7,2	3,00	0,05	0,0043	1,01	0,88	0,90	1740	170		8,710		0,34				
4,8	7,5	3,00	0,05	0,0043	1,17	1,23	1,20						0,34	147,33	90,00	290,00	62,00
5,8	7,5	3,00	0,08	0,0069	1,31	1,55	1,60	1708	169		9,014	532	0,26				
6,8	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,44	1,84	1,70						0,24				
7,8	7,2	3,00	0,08	0,0069	1,54	2,05	1,95	1844	172		9,983	534	0,29				
8,9	7,3	3,00	0,08	0,0069	1,68	2,37	2,40						0,06				
9,9	7,4	3,00	0,08	0,0069	1,71	2,43	2,50	1600	172		8,893	583	0,17				
10,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	1,78	2,59	2,30						0,09	154,33	92,00	307,00	64,00
11,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	1,82	2,68	2,70	1868	174		8,814	665	0,13				
12,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	1,88	2,81	3,30						0,20				
13,9	7,4	3,00	0,10	0,0087	1,98	3,03	2,90	1776	174		9,283	659	0,12				
14,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	2,03	3,14	3,70						0,00	155,67	91,00	314,00	62,00
15,8	7,4	3,00	0,10	0,0087	2,03	3,14	4,10	1830	174		9,112						

Anhang

Versuchsreihe III; Nähmedium NM1; Reaktor R1

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00			0,20	0,14	0,27						0,19				
1,0	7,0	3,00			0,45	0,34	0,63	1900	151	32,93	5,200	609,00	0,20	199,33	131,00	388,00	79,00
2,1	7,0	3,00			0,72	0,55	0,70						0,23				
3,0	7,0	3,00			1,00	0,77	0,90	1744	184	99,10	11,011	523,000	0,62				
4,0	7,1	3,00			1,24	1,38							0,32				
5,0	7,2	3,00			1,37	1,68	1,55	1796	181	95,64	6,170	595,000	0,36	196,00	132,00	373,00	83,00
6,0	7,1	3,00			1,54	2,05	2,05						0,19				
8,0	7,3	3,00			1,70	2,42	2,30	1772	172	243,06	10,568	703,000	0,17				
9,0	7,0	3,00			1,79	2,60	2,40						0,19				
9,9	7,1	3,00			1,87	2,78	2,80	1968	180	263,20	9,400	605,000	0,22				
11,0	7,1	3,00			1,97	3,00	3,65						-0,01				
11,9	7,1	3,00			1,96	2,99	3,30	1522	163	295,67	8,960	640,000	0,19	185,33	93,00	378,00	85,00
13,0	7,3	3,00			2,05	3,18	3,50						-0,12				
14,0	7,0	3,00			1,99	3,06	3,45	2020	182			698,000					

Anhang

Versuchsreihe III; Nähmedium NM1; Reaktor R2

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	oben	mitte	unten
0,0		3,00			0,20	0,14	0,10						0,22				
1,0	6,7	3,00			0,49	0,37	0,73	1924	165			622	0,15	208,33	136,00	404,00	85,00
2,1	6,6	3,00			0,70	0,53	0,50						0,32				
3,0	6,6	3,00			1,08	0,83	1,00	1754	187			517	0,56				
4,0	7,0	3,00			1,24	1,39							0,32				
5,0	7,0	3,00			1,37	1,68	1,45	2040	179			603	0,32	197,00	126,00	383,00	82,00
6,0	7,1	3,00			1,52	2,01	1,80						0,20				
8,0	7,3	3,00			1,69	2,40	2,25	1568	176			635	0,24				
9,0	7,0	3,00			1,81	2,65	2,65						0,22				
9,9	7,1	3,00			1,90	2,86	2,85	1972	180			623	0,28				
11,0	7,1	3,00			2,03	3,14	2,85						-0,16				
11,9	7,1	3,00			1,96	2,98	3,70	1250	162			572	0,20	190,67	93,00	385,00	94,00
13,0	7,3	3,00			2,05	3,18	3,60						-0,23				
14,0	7,0	3,00			1,94	2,95	3,30	2180	185			782					

Anhang

Versuchsreihe III; Nähmedium NM3; Reaktor R3

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,00	0,0000	0,21	0,15	0,10						0,14				
1,0	6,7	3,00	0,30	0,0260	0,40	0,30		1600	63	52,49	7,157	592	0,33	207,00	130,00	408,00	83,00
2,1	7,0	3,00	0,30	0,0260	0,83	0,64	0,83						0,22				
3,0	6,8	3,00	0,30	0,0260	1,10	0,85	1,00	1780	117	109,26	10,926	518	0,81				
4,0	6,9	3,00	0,30	0,0260	1,36	1,66							0,24				
5,0	7,0	3,00	0,30	0,0260	1,46	1,88	1,75	1866	135	163,12	9,321	646	0,32	204,67	132,00	403,00	79,00
6,0	7,0	3,00	0,30	0,0260	1,61	2,20	2,15						0,15				
8,0	7,0	3,00	0,50	0,0434	1,74	2,50	2,40	1808	102	201,59	8,400	663	0,19				
9,0	7,3	3,00	0,50	0,0434	1,83	2,71	2,95						0,16				
9,9	7,1	3,00	0,80	0,0694	1,90	2,85	3,10	1980	45	230,76	7,444	578	0,16				
11,0	7,1	3,00	0,80	0,0694	1,97	3,01	3,45						0,00				
11,9	7,1	3,00	0,80	0,0694	1,97	3,02	3,80	1738	52	291,01	7,658	569	0,19	200,00	95,00	410,00	95,00
13,0	7,0	3,00	0,80	0,0694	2,06	3,21	3,50						-0,08				
14,0	6,9	3,00	0,80	0,0694	2,02	3,13	3,50	2080	55			701					

Anhang

Versuchsreihe III; Nähmedium NM3; Reaktor R4

Zeit [d]	pH	Luft [l min ⁻¹]	CO ₂ [l min ⁻¹]	CO ₂ [vvm]	OD _{750nm}	TS _{ber.} [g l ⁻¹]	TS _{gem.} [g l ⁻¹]	NO ₃ [mg l ⁻¹]	PO ₄ [mg l ⁻¹]	Norg [mg l ⁻¹]	Norg [%]	TN [mg l ⁻¹]	Prod. [g TS l ⁻¹ d ⁻¹]	PAR [μmol m ⁻² s ⁻¹]	<i>oben</i>	<i>mitte</i>	<i>unten</i>
0,0		3,00	0,00	0,00	0,22	0,16	0,10						0,18				
1,0	6,9	3,00	0,00	0,00	0,46	0,35	0,57	1662	80			559	0,24	201,00	129,00	397,00	77,00
2,1	7,1	3,00	0,13	0,0113	0,78	0,60	0,67						0,14				
3,0	7,5	3,00	0,08	0,0069	0,96	0,74		1820	118			501	1,18				
4,0	6,9	3,00	0,14	0,0122	1,44	1,83							-0,69				
5,0	7,4	3,00	0,05	0,0043	1,15	1,19	0,90	1818	147			521	0,18	196,67	133,00	380,00	77,00
6,0	7,0	3,00	0,16	0,0139	1,24	1,39	1,15						0,05				
8,0	7,0	3,00	0,15	0,0130	1,29	1,50	1,40	2120	158			642	0,04				
9,0	7,0	3,00	0,15	0,0130	1,31	1,54	1,15						0,22				
9,9	7,1	3,00	0,15	0,0130	1,40	1,74	1,40	1963	147			559	-0,11				
11,0	7,3	3,00	0,15	0,0130	1,35	1,63	1,35						-0,01				
11,9	7,4	3,00	0,08	0,0069	1,34	1,62	1,70	1940	159			539	0,05	183,00	90,00	374,00	85,00
13,0	7,0	3,00	0,15	0,0130	1,36	1,67	2,60						0,05				
14,0	7,1	3,00	0,15	0,0130	1,39	1,72	1,60	2020	147			549					

