



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Lukas Höger

# **Entwurf eines Photobioreaktors für die Bilanzierung des biogenen Energiepo- tenzials im Labormaßstab**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Lukas Höger**  
**Entwurf eines Photobioreaktors für die  
Bilanzierung des biogenen Energiepo-  
tenzials im Labormaßstab**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Professor Dr.-Ing. Jan Piatek  
Zweitprüfer: Professor Dr.-Ing. Torsten Birth

Abgabedatum: 24.01.2023

# Zusammenfassung

## Name des Studierenden

Lukas Höger

## Thema der Bachelorthesis

Entwurf eines Photobioreaktors für die Bilanzierung des biogenen Energiepotenzials im Labormaßstab

## Stichworte

Solare Strahlung, Primärenergie, Biomasse, Mikroalgen, Photosynthese, Konstruktion, Lichtkollektor, Labor

## Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorthesis beschäftigt sich mit dem Entwurf eines Photobioreaktors, zur Untersuchung des biogenen Energiepotenzials von Mikroalgen im Labormaßstab.

Bestandteile der Arbeit sind, die Recherche verschiedener Laborsysteme für Algenreaktoren, eine Spezifizierung der Anforderungen im Laborbetrieb und die Konzeptionierung des Versuchsstandes. Diese beinhaltet eine Auswahl der Mikroalgenart und der benötigten Prozessbausteine zur Kultivierung. Eine Auslegung der Anlagenkomponenten und Auswahl für den Laborstand, ist auf Basis der ermittelten Grundlagen erfolgt.

Der Versuchsstand soll die stoffliche und energetische Bilanzierung hinsichtlich der Energiebereitstellung von Biomasse aus Mikroalgen ermöglichen. Im Rahmen von Lehrveranstaltungen soll eine Untersuchung des Wachstumsverhaltens möglich gemacht werden.

## Name of Student

Lukas Höger

## Title of the paper

Design of a photobioreactor for balancing the biogenic energy potential on a laboratory scale

## Keywords

Solar radiation, primary energy, biomass, microalgae, photosynthesis, construction, light collector, Laboratory

## Abstract

This bachelor thesis deals with the design of a photobioreactor to investigate the biogenic energy potential of microalgae on a laboratory scale.

Important Parts of the work are the research of different laboratory systems for algae reactors, a specification of the requirements in laboratory operation and the conceptual design of the test stand. This includes a selection of the type of microalgae and the required process modules for cultivation. A design of the system components and a selection for the laboratory stand was made based on the determined fundamentals.

The test stand is intended to enable material and energetic balancing about the provision of energy of biomass from microalgae. Within the framework of courses, an examination of the growth behavior should be made possible.

## **A u f g a b e n s t e l l u n g**

für die Bachelorthesis

von Herrn Lukas Höger

Matrikel-Nummer: ██████████

**Thema: Entwurf eines Photobioreaktors für die Bilanzierung des biogenen Energiepotenzials im Labormaßstab**

Im Rahmen der biogenen Energiebereitstellung haben Algen nach wie vor keine große Verbreitung. Durch die schnelle Erzeugung großer Mengen von Biomasse ohne direkte Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung durch die Nutzung alternativer Flächen bietet sich hier allerdings ein beachtliches Zukunftspotential.

Im Rahmen von Lehrveranstaltungen soll auf die stoffliche und energetische Bilanzierung der Biomasseproduktion zur Energiebereitstellung aus Algen eingegangen werden. Dazu soll eine Laboranlage entworfen werden, mit der Algenwachstum und energetische Bilanzierung einfach durchgeführt und nachvollzogen werden können.

### **Schwerpunkte:**

- Zusammenstellen der Grundlagen der energetischen Nutzung von Algen
- Recherche zu verschiedenen Laborsystemen für Algenreaktoren
- Spezifikation der Anforderungen eines Algenreaktors für den Lehrbetrieb
- Identifikation geeigneter Kaufteile und Algentypen
- Konzipieren eines Laborsystems und der notwendigen Messtechnik zur stofflichen und energetischen Bilanzierung
- Auslegung eines Systems

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Aufgabenstellung .....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Symbolverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VIII
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung .....	1
2 Theoretische Grundlagen .....	2
2.1 Biomasse als Nutzenergie .....	2
2.1.1 Energiewandlungskette .....	2
2.1.2 Primärenergieverbrauch .....	3
2.1.3 Klimawandel und Auswirkungen auf die Energiebereitstellung .....	4
2.2 Funktionsbeschreibung der Photosynthese .....	5
2.3 Mikroalgen als nachwachsender Energieträger .....	6
2.4 Mikroalgenarten und ihre Eigenschaften .....	7
2.5 Photobioreaktor-Typen .....	8
2.5.1 Airlift-Plattenreaktoren .....	9
2.5.2 Rohrreaktoren .....	11
2.6 Kultivierungsprozesse von Mikroalgen .....	12
2.7 Prozessbausteine zur Kultivierung im Satzverfahren .....	13
2.8 Umwandlung der Rohbiomasse in Endenergie .....	17
2.8.1 Sedimentation und Zentrifugation .....	18
2.8.2 Filtration .....	19
2.8.3 Endenergie Formen .....	20
3 Anforderungen und Bewertungskriterien .....	23
3.1 Anforderungen an den Photobioreaktor .....	23
3.2 Bewertungskriterien für Anlagenkomponenten .....	25
4 Photobioreaktor-Typen für den Laborstand .....	26
4.1 Verfügbare Laborreaktoren .....	26
4.2 Auswahl Reaktortyp für den Laborstand .....	28
5 Mikroalgenarten und Nährstoffe .....	30
5.1 Auswahl Algenart für den Laborstand .....	30
5.2 Nährlösung .....	31
6 Auswahl von Systemkomponenten .....	32
6.1 Anlagenschema .....	33

6.2	Auswahl Strahlenquelle .....	33
6.3	Auswahl Wärmequelle .....	36
6.4	Auswahl einer Pumpe zur Begasung .....	40
6.5	Ernte der Biomasse .....	41
6.6	Systemüberwachung .....	42
6.6.1	Verwendete Messmittel .....	42
6.6.2	Steuerung und Regelung .....	44
7	Energie Bilanz und Kosten .....	45
7.1	Stoffliche Bilanz Mikroalge .....	45
7.2	Energie Bilanz auf Basis der stofflichen Bilanz .....	45
7.3	Kosten .....	47
8	Zusammenfassung und Fazit .....	48
9	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	50
Anhang .....		53
	Wertetabelle Photonenflussdichte im Verhältnis zum Bestrahlungsabstand .....	53
	Technisches Datenblatt Leuchtmittel .....	54
	Technisches Datenblatt Heizelement .....	55
	Technisches Daten Membranpumpe .....	57
	Technisches Daten Thermoelement .....	58
	Technisches Daten pH-Elektrode .....	61
	Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung .....	62

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$a$	Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$A_{Boden}$	Oberfläche Reaktorboden	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Front}$	Oberfläche Reaktorfront	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Ges}$	Oberfläche Reaktor	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Seite}$	Oberfläche Reaktorseite	[m <sup>2</sup> ]
$A_{bestrahlt}$	Bestrahlte Oberfläche	[m <sup>2</sup> ]
$b$	Breite	[mm]
$b_{bestrahlt}$	Bestrahlungslänge	[m]
$c$	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
$C$	Berechnungskonstante der Nusselt-Zahl	[-]
$E$	Photonenenergie	[J]
$E_{410}$	Photonenenergie bei 410 nm Wellenlänge	[J]
$E_{710}$	Photonenenergie bei 710 nm Wellenlänge	[J]
$E_{Anlage}$	Energieeintrag des Photobioreaktors	[kJ]
$E_{Begasung}$	Energieeintrag der Begasung	[kJ]
$E_{Biomasse}$	Energieeintrag der Biomasse	[kJ]
$E_{Licht}$	Energieeintrag der Beleuchtung	[kJ]
$E_{Pf\ mittel}$	Mittlere Photonenflussdichte auf der bestrahlten Reaktorinnenseite	[ $\mu$ mol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$E_{Pf\ mittel}^*$	Mittlere Photonenflussdichte auf der bestrahlten Reaktoroberfläche	[ $\mu$ mol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$E_{Wärme}$	Energieeintrag der Beheizung	[kJ]
$E_{eff.}$	Prozessenergie effektiv	[kJ]
$E_{mittel}$	Mittlere Photonenenergie	[J]
$g$	Erdschwerefeld	[m/s <sup>2</sup> ]
$Gr$	Grashof-Zahl	[-]
$h$	Höhe	[mm]
$h$	Planck'schen Wirkungsquantum	[J·s]
$h_{Lampe}$	Bestrahlungsabstand	[m]
$I_A$	Strahlungsintensität	[W/m <sup>2</sup> ]
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$l$	charakteristischen Länge	[m]
$l$	Länge	[mm]
$l_{Lampe}$	Bestrahlungsabstand	[m]
$N_A$	Avogadro Konstanten	[1/mol]
$N_P$	Photonenzahl	[1/(m <sup>2</sup> ·s)]
$Nu$	Nusselt-Zahl	[-]
$Nu_L$	Nusselt-Zahl konvektiven Übergang zur Umgebungsluft	[-]
$P_A$	Flächenproduktivität	[kJ/(m <sup>2</sup> ·d)]
$P_{Lampe}$	Strahlungsleistung Lampe	[W]
$Pr$	Prandtl-Zahl	[-]
$P_V$	Volumetrische Produktivität	[kg/(m <sup>3</sup> ·d)]
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung	[nm]
PPFD	Photonenflussdichte	[ $\mu$ mol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$\dot{Q}_V$	Wärmestrom durch Wärmeleitung	[W]

$\dot{Q}_{fK}$	Wärmestrom durch freie Konvektion	[W]
$\dot{Q}_{ges}$	Wärmeverluststrom gesamt	[W]
$\dot{Q}_{str}$	Wärmestrom durch Wärmestrahlung	[W]
$t$	Materialstärke	[mm]
$T_U$	Umgebungstemperatur	[K]
$T_{Wasser}$	Wassertemperatur	[K]
$\alpha$	Einstrahlwinkel	[°]
$\alpha_L$	Wärmeübergangskoeffizient der Luft	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$\alpha_W$	Wärmeübergangskoeffizient Wasser	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$\beta$	Ausdehnungskoeffizienten	[1/K]
$\varepsilon_{Wasser}$	Emissionsgrad von Wasser	[-]
$\lambda_{Luft}$	Wärmeleitfähigkeit von Luft	[W/m·K]
$\lambda_S$	Wärmeleitfähigkeit der Reaktorwand	[W/m·K]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_S$	Stefan-Boltzmann Konstanten	[W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ]
$\tau_{PMMA}$	Transmissionsverhalten von Polymethylmethacrylat	[-]

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
%	Prozent
°C	Grad Celsius
$\mu$	Mikro
a	Jahr
Abb.	Abbildung
d	Tag
g	Gramm
G	Gewichtung
h	Stunde
Im	Lichtstrom
IP	Schutzklasse
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramm
KJ	Kilojoule
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LED	Leuchtdiode
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
min	Minute
MJ	Megajoule
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mol	Stoffmenge
mV	Millivolt
nm	Nanometer
PCE	Photokonversionseffizienz
pH-Wert	Potential des Wasserstoffs



PTC	Kaltleiter
s	Sekunde
sp.	spinosus
SPS	Speicheroptimierbare Steuerung
U/min	Umdrehungen pro Minute
USB	Universal Serial Bus
V	Volt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vul.	vulgaris
W	Watt
Wo.	Woche
$\eta$	Wirkungsgrad
$\lambda$	Wellenlänge

### Chemische Bindungen a.

Abkürzung	Bezeichnung
ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosintri-phosphat
C	Kohlenstoff
$C_6H_{12}O_6$	Glucose
$CH_4$	Methan
$CO_2$	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
H	Wasserstoff
$H_2CO_3$	Kohlensäure
$H_2O$	Wasser
$H_3O^+$	Oxonium / Protoniertes Wasser
$K_2O$	Kaliumoxid
KCl	Kaliumchlorid
$KNO_3$	Kaliumnitrat
MgO	Magnesiumoxid
$Na_2SiO_3$	Natriumsilicate
NADP	Nicotinsäureanid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat
NADP <sup>+</sup>	Nicotinsäureanid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat oxidiert
NADPH	Nicotinsäureanid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat reduziert
$NaH_2PO_4$	Natriumdihydrogenphosphat
$NaNO_3$	Natriumnitrat
NaOH	Natriumhydroxid
$NH_4$	Ammonium
Ni	Nickel
$NO_3$	Nitrat
$O_2$	Sauerstoff
P	Phosphor
$P_2O_5$	Phosphorpentoxid
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVC	Polyvinylchlorid
RuBisCo	Ribulose-1,5-bis-phosphat-carboxylase-oxygenase

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristische Kenngrößen eines Flachplatten-Airlift Reaktors[9].....	9
Tabelle 2: Charakteristische Kenngrößen von Rohrreaktoren[9] .....	11
Tabelle 3: Energiegehalt der Mikroalgenbiomasse bezogen auf den Heizwert herstellbarer Endenergieträger[12][11] .....	21
Tabelle 4: Anforderungsliste für einen Photobioreaktor im Labormaßstab .....	24
Tabelle 5: Bewertungskriterien für den Photobioreaktor-Typen.....	25
Tabelle 6: Gewichtungsanalyse der Bewertungskriterien .....	25
Tabelle 7: Punkte Definition für die Nutzwertanalyse .....	28
Tabelle 8: Nutzwertanalyse der Photobioreaktor-Typen für den Laborstand .....	29
Tabelle 9: Technische Daten der ausgewählten Algenkulturen [30][28] .....	31
Tabelle 10: Technische Daten des verwendeten Leuchtmittels Firma Bioledex .....	33
Tabelle 11: Technische Daten des Plattenreaktormodells.....	36
Tabelle 12: Technische Daten Hezelement der Firma Schego [33].....	40
Tabelle 13: Technische Daten Membranen-Pumpe der Firma EHEIM [19][20] .....	41
Tabelle 14: Technische Daten Thermoelement der Firma JUMO [23].....	42
Tabelle 15: Technische Daten pH-Elektrode der Firma Greisinger [22].....	43
Tabelle 16: Zusammenfassung der Anschaffungs- und Betriebskosten .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Energiewandlungskette der Energieträger[9] .....	3
Abb. 2: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2021)[21].....	4
Abb. 3: Schematischer Querschnitt einer Mikroalgenzelle[9].....	6
Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Flachplatten-Airlift Reaktors[9].....	10
Abb. 5: Schnittdarstellung eines Wasserbett-Reaktors[9].....	10
Abb. 6: Lichtkollektor eines Rohrreaktors der Firma Roquette Klötz GmbH & Co. KG[34]....	11
Abb. 7: Lichtkollektor eines Tannenbaum-Rohrreaktors der Firma Gicon[5].....	12
Abb. 8: Prozessbausteine der Kultivierung von Mikroalgen in drei Phasen .....	14
Abb. 9: Charakteristische Wachstumskurve von Mikroalgen in einem Photobioreaktor[10]..	15
Abb. 10: Spezifische Wachstumsrate in Abhängigkeit der Photonenflussdichte von Chlamydomonas reinhardtii[10] .....	16
Abb. 11: Die spez. Wachstumsrate der Algenzelle, im Zusammenhang mit dem prozentualen Partialdruck des Kohlenstoffdioxids.[10].....	17
Abb. 12: Funktionsweise Tellerseparator mit zyklischer Entleerung der Firma Winkelhorst Trenntechnik GmbH [35].....	18
Abb. 13: Funktionsweise der Bandfiltration [5] .....	19
Abb. 14: Prozesskette für die Weiterverarbeitung von Algenbiomasse zu verschiedenen Endenergieträgern .....	21
Abb. 15: Einbindungsmöglichkeit von Photobioreaktoren in Kreisprozesse[16].....	22
Abb. 16: Labor Rohrreaktor xCUBIO der Firma BBI Biotech GmbH [37] .....	26
Abb. 17: Plattenreaktor der Firma Subitec GmbH[32] .....	27
Abb. 18: Rührreaktor der Firma IKA – Werke GmbH & Co. KG[15].....	28
Abb. 19: Aufbau und Inhaltsstoffe Chlorella vulgaris und Scenedesmus spinosus[3] .....	30
Abb. 20: Modell eines Plattenreaktors für die Bestimmung der Anlagenkomponenten .....	32
Abb. 21: Anlagenschema des Plattenreaktor-Modells .....	33
Abb. 22: Photonenflussdichte im Zusammenhang mit dem Bestrahlungsabstand.....	36
Abb. 23: Energiebilanz bei der Kultivierung von Mikroalgenbiomasse mit einer Systemtemperatur von 30°C und Begasung durch Umgebungsluft.....	46

# 1 Einleitung

Im Rahmen der Lehre an der HAW Hamburg werden den Studierenden Lerninhalte der verschiedenen Themengebiete anhand von Laborversuchen nähergebracht. Das Wahlmodul „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ bietet den Studierenden die Möglichkeit den Einsatz von biogenen Rohstoffen technisch und wirtschaftlich zu bilanzieren. Hierbei werden verschiedene Verfahrensvarianten vorgestellt, welche sich mit der thermischen Nutzung, sowie der Gewinnung der dafür benötigten Biomasse beschäftigen.

Weltweit gibt es über 30.000 bekannte Mikroalgenarten. Aufgrund der steigenden Nahrungsmittel Nachfrage und dem Bedarf an regenerativen Kraftstoffen steckt ein hohes Potenzial in diesen. Im Bereich der Pharmazie werden aus Algenzellen Inhaltsstoffe für Medikamenten gewonnen und die Krebsforschung weiterentwickelt. Dabei wird die Bilanz der Kultivierungsverfahren, durch die höherpreisigen Produkte begünstigt. Die Vorteile der Mikroalgenkultivierung liegen im Anbauverfahren. Mikroalgen können in Großanlagen kultiviert werden, wodurch verfügbare Anbauflächen optimal genutzt werden. Dabei wird mit steigender Biomassekonzentration die Gesamte solare Strahlung für die Photosynthese genutzt. Im Vergleich zu höheren Pflanzen spielen Umwelteinflüsse, sowie Jahreszeiten Wechsel nur eine untergeordnete Rolle. Neben dem schnellen Wachstumsverhalten sind die Inhaltsstoffe der Algenzellen für die Biokraftstoff und Biogas Herstellung geeignet. Algenzellen besitzen dabei artenabhängig hohe Anteile an Lipiden und Kohlenhydraten, welche zu Biogas, Ethanol und Biodiesel aufbereitet werden können. Die Gewinnung von Wasserstoff, als Nebenprodukt der Photosynthese, ist unter speziellen Kultivierungsbedingungen ebenfalls möglich. Die Herausforderungen bei der Kultivierung von Mikroalgen sind es neben dem optimalen Versorgen der Algenzelle mit Lichtenergie und Nährstoffen, eine positive wirtschaftliche Bilanz zu erzeugen. Dies wird durch hohe Anschaffungskosten und den zusätzlichen Leistungseintrag von Pumpen erschwert. Mikroalgenreaktoren finden aktuell noch wenig Anwendung im Bereich der biogenen Energiegewinnung.

Ziel dieser Arbeit ist es einen Photobioreaktor für die Anwendung im Labormaßstab zu entwickeln. Abweichend zu den aktuell am Markt etablierten Algenfarmen soll hierbei die biogene Energiebereitstellung im Vordergrund stehen und nicht die Qualität der Biomasse zur Anwendung in Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie. Dabei sollen Grundlagen der Kultivierung, sowie Einflussfaktoren auf das Wachstumsverhalten recherchiert werden. Ebenfalls sind die Kultivierungsverfahren zu beschreiben und Anlagenkomponenten für den Versuchsstand zu definieren.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Entwicklung eines Photobioreaktors erläutert. Es wird auf den aktuellen Stand der Technik und die Nutzung von Mikroalgen als biogene Energiequelle eingegangen. Hierfür ist zunächst der Einfluss von Biomasse als Nutzenergie beschrieben und welche Bedeutung erneuerbare Energiequellen für das Ökosystem haben. Anschließend ist die Mikroalge als nachwachsender Energieträger definiert, sowie Mikroalgenarten und ihre Eigenschaften werden vorgestellt. Weiterhin sind Photobioreaktor-Typen und ihre Kultivierungsprozesse beschrieben. Abschließend sind Prozessbausteine zur Kultivierung im Satzverfahren definiert und die Prozessschritte von Rohbiomasse in Endenergie werden aufgeführt.

### 2.1 Biomasse als Nutzenergie

Die Nutzung von Energie auf der Erde resultiert aus den Primärenergieströmen, der Planetengravitation bzw. Bewegungsenergie, der dadurch beeinflussten Gezeitenenergie und der Erdwärme und Sonnenenergie. Durch das Zusammenspiel dieser Energieströme, innerhalb der Erdatmosphäre, resultieren die Primärenergiequellen. Zu den Primärenergiequellen zählen unter anderem die solare Strahlung, die Windenergie, die Wasserkraft, die Erdwärme und die Biomasse.[9]

Die regenerative Energiequelle Biomasse beinhaltet sämtliche organische Materie und ist mit Bezug auf die Energiewandlungskette in drei Kategorien unterteilt:

- Primäre Biomasse, stellt die gespeicherte Strahlungsenergie in Form von organischer Materie zur Verfügung. Diese entsteht mithilfe von Pflanzen, welche im natürlichen Prozess der Photosynthese die solare Strahlung in organische Materie speichern. Der Prozess der Photosynthese ist in Abschnitt 2.2 beschrieben.
- Sekundäre Biomasse, nutzt nur indirekt die Sonnenenergie, durch das Weiterverarbeiten der primären Biomasse in biologischen Organismen. Das Resultat bilden tierische Ausscheidungen und Exkremente, welche die verbleibende Energie zur Verfügung stellen.
- Tertiäre Biomasse, umfasst die Erzeugnisse der technischen Weiterverarbeitung von Primär- und Sekundärbiomasse. Zu ihnen zählen unter anderem Zellstoffe, Holzmöbel und Bekleidung.

Biomasse wandelt sich, durch die Konstante der Zeit, von einem regenerativen zu einem fossilen Energieträger durch Verrottung um. Die Grenze zwischen diesen beiden Energieträgern bildet der Torf, welcher in Deutschland zu den fossilen Energieträgern zählt.[9]

#### 2.1.1 Energiewandlungskette

Für die Bereitstellung von Nutzenergie sind meist ein oder mehrere technische Umwandlungen nötig. Um die Energie einem Stoff („Träger“), bei einem Umwandlungsgrad zuordnen zu können, sind diese als Primär-, Sekundär- und Endenergieträger definiert. Die Zuordnung der Energieträger zu den Energieinhalten ist in Abb. 1 dargestellt.

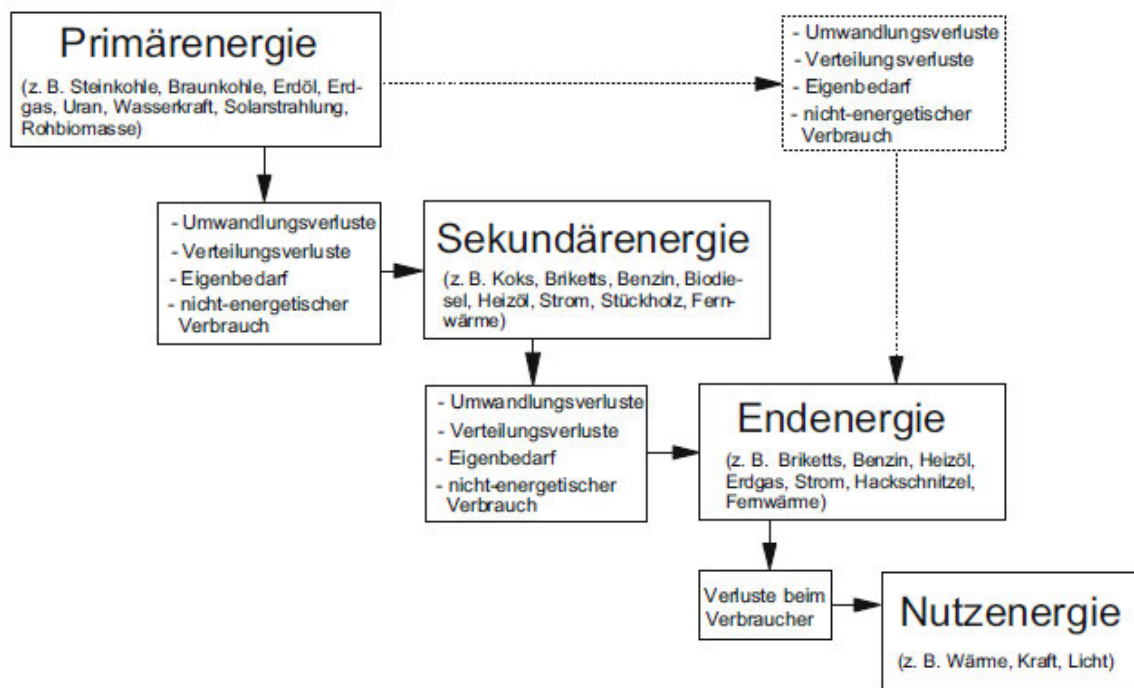


Abb. 1: Energiewandlungskette der Energieträger[9]

Energieträger der Primärenergie haben keine technische Umwandlung erfahren und liegen in ihrer natürlichen Rohform vor. Bei der Weiterverarbeitung in Zwischenerzeugnisse der Sekundärenergie oder dem direkten Umwandeln in Endenergie treten Verluste auf, welche sich negativ in der Energiebilanz des jeweiligen Energieträgers widerspiegeln. Aus der Endenergie wird, durch Verbrauch des Energieträgers, Nutzenergie in Form von Wärme, Kraft oder Licht gezogen, dieser Verbrauch ist ebenfalls verlustbehaftet und variiert je nach technischem Verfahren.[9]

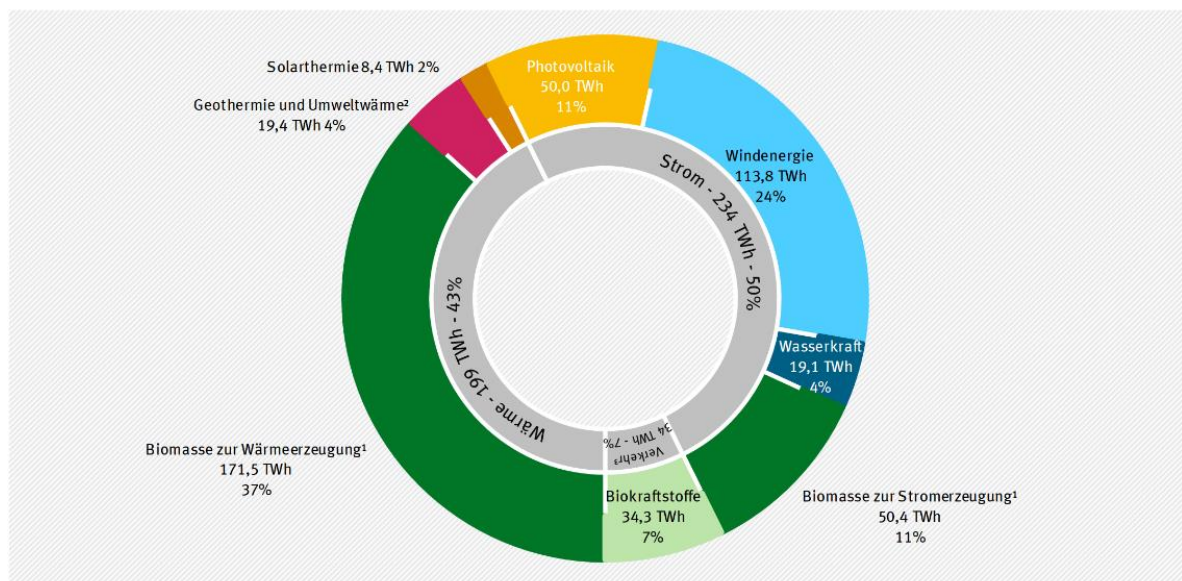
### 2.1.2 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland lag im Jahr 2021 insgesamt bei 12.193 Petajoule, mit einem Anteil von 16% durch erneuerbare Energien. Vergleichsweise lag der Primärenergieverbrauch im Jahr 1990 bei 14.905 Petajoule mit einem Anteil erneuerbarer Energien von nur 1,3%. Durch den immer schneller voranschreitenden Klimawandel hat sich die deutsche Bundesregierung eine sukzessive Reduzierung des Energieverbrauchs, sowie einen Ausbau der erneuerbaren Energien zur Aufgabe gemacht.[31]

Die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern lag im Jahr 2021 bei 467,3 Terawattstunden und ist in Abb. 2 dargestellt. Hierbei überwiegen die Nutzenergieverbräuche von Strom mit 50% und Wärme mit 43% deutlich gegenüber dem für Verkehr mit nur 7%. Bei der Energiebereitstellung für den Verkehr handelt es sich um den Anteil verwendeter Biokraftstoffe. Den größten Anteil an den erneuerbaren Energien besitzt die Biomasse, welche mit 37% an der Wärmeerzeugung beteiligt ist, 11% der Stromerzeugung ausmacht und die 7% der Kraftstoffproduktion bereitstellt. Durch die geografische Lage von Deutschland ist der Ausbau von Wasserkraft nur sehr begrenzt möglich. Eine Erhöhung der erneuerbaren Energiebereitstellung ist über Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie und Biomasse zu realisieren. Durch den hohen thermischen Energiebedarf in der Industrie, ist Biomasse eine der wichtigsten Energiequellen der Zukunft und bietet ein großes Anwendungsgebiet für Mikroalgen.[21]

## Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2021)

Gesamtenergiebereitstellung: 467,3 Terawattstunden [TWh]



<sup>1</sup> mit biogenem Anteil des Abfalls

<sup>2</sup> Stromerzeugung aus Geothermie etwa 0,2 TWh (nicht separat dargestellt)

<sup>3</sup> Verbrauch von EE-Strom im Verkehr etwa 4,9 TWh

Abweichungen bedingt durch Rundungen

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat  
Stand 02/2022

Abb. 2: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2021)[21]

### 2.1.3 Klimawandel und Auswirkungen auf die Energiebereitstellung

Im Zuge der Industrialisierung im 19. Jahrhundert hat sich die Verbrennung fossiler Energieträger stark erhöht und somit auch die Emission klimarelevanter Treibhausgase in die Erdatmosphäre. Durch das schnelle Freisetzen der über Millionen Jahre gespeicherten Mengen an Kohlenstoffdioxid, hat sich die Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen um mehr als 40% in den vergangenen 150 Jahre erhöht. Diese Messergebnisse konnten über Eisbodenproben und die Kohlenstoffaufnahme-fähigkeit von Pflanzen deutlich nachgewiesen werden. Dabei haben Kohlenstoffdioxid mit etwa 60% den qualitativ höchsten Einfluss. Weitere Klimagase sind Methan und Lachgas, welche hauptsächlich in der Landwirtschaft und Viehzucht entstehen.[43]

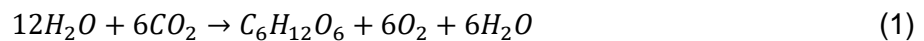
Die Konzentrationserhöhung von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre erschwert die Transmission des Wärmestrahlungsanteils der Sonnenstrahlung und erhöht somit die Temperatur auf der Erde. Ein Begrenzen der Temperaturerhöhung um 2 bis 4 Kelvin ist nur möglich durch ein Reduzieren der Treibhausgasemission. Eine Erhöhung von 2 bis 4 Kelvin gilt als die Grenze der beherrschbaren Abweichung, der ohne den Einfluss der Industrialisierung entstanden wäre. Folgen des Temperaturanstieges sind vor allem Abweichungen der Niederschlagsverteilung, Verrückung von Klima- und Vegetationszonen, sowie der daraus resultierenden Verschlechterung der Landwirtschaft und somit der Nahrungsmittelversorgung. Der Einfluss auf die erhöhte Kohlenstoffdioxid Konzentration in den Ozeanen und die Abweichungen des pH-Wertes, durch Bildung von Kohlensäure, sind noch nicht erkennbar.[43]

Auf Grundlage dieser Beziehungen hat die deutsche Bundesregierung, neben der Reduktion des Primärenergieverbrauchs und dem Ausstieg aus der Braunkohle im Januar 2021 erstmals den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid aus fossilen Brennstoffen bepreist. Die Kosten von 25 Euro pro freigesetzter Tonne Kohlenstoffdioxid erhöhen sich sukzessive auf 55 Euro bis zum Jahr 2025. Die daraus resultierenden Kosten wirken sich positiv auf die Bilanz regenerativer Energie aus.[24]

## 2.2 Funktionsbeschreibung der Photosynthese

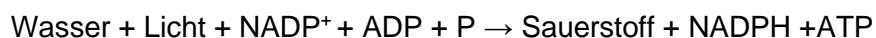
Algen gehören zu den autotrophen Pflanzen, welche sich durch Zellteilung vermehren. Die benötigte Energie zur Zellteilung bezieht die Algenzelle aus der Zellatmung. Bei der Zellatmung handelt es sich um einen biochemischen Prozess, der im Inneren der Algenzelle stattfindet. In diesem Prozess nutzt die Alge den Energieträger Glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ), unter Freisetzung von Sauerstoff ( $O_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ), für die Zellteilung. Die Glucose ist dabei ein Reaktionsprodukt der Photosynthese, welche nachfolgend genauer erläutert ist.[6]

Die Photosynthese beschreibt den Prozess der Energiewandlung aus Solarer Energie, Wasser und Kohlenstoffdioxid der Umgebungsluft in Glucose. Weitere Reaktionsprodukte der Photosynthese sind Sauerstoff ( $O_2$ ) und Wasser. Die Reaktionsgleichung der Photosynthese ist in Gleichung (1) dargestellt.[6]



Die Gesamtreaktion der Photosynthese ist in Licht- und Dunkelreaktion unterteilt. Die Lichtreaktion beschreibt die Aufnahme der solaren Strahlungsenergie zum Spalten von Wasserstoff und die Dunkelreaktion das Binden von Kohlenstoffdioxid, mithilfe der Wasserstoffatome zu Glucose.[6]

Innerhalb der Lichtreaktion nimmt die Algenzelle solare Strahlung auf, dies geschieht über Lichtsammelkomplexe innerhalb der Thylakoidmembranen, die Strahlung wird anschließend in die Reaktionszentren der Photosysteme weitergeleitet werden. Für die Wasserstoffspaltung werden jeweils vier Lichtquanten innerhalb der Photosysteme benötigt. Durch die Oxidation des Wassers werden vier Elektronen, Wasserstoff und das Nebenprodukt Sauerstoff freigesetzt. Die Elektronen werden zusammen mit den Wasserstoffprotonen auf ein  $NADP^+$ -Molekül (Nicotinsäureanid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat) übertragen. Das  $NADP^+$ -Molekül reagiert, durch die Aufnahme der Wasserstoffprotonen und freigesetzten Elektronen, zu  $NADPH/H^+$ . Durch die mehrstufige Elektronenübertragung besitzt das  $NADPH$  ein hohes Redoxpotential. Dieses wird innerhalb der Dunkelreaktion zur Reduktion des Kohlenstoffdioxids genutzt. Neben dem  $NADPH$  wird in der Lichtreaktion ATP (Adenosintriphosphat) gebildet, welches als ein universeller Energieträger in Pflanzenzellen definiert ist. Bei der ATP handelt es sich um eine mechanisch-chemische Bindung, welche beim Durchtreten der Thylakoidmembran entsteht. Das ATP bildet sich aus ADP und freien Phosphat-Ionen aus der Umgebung der Zelle. Die teilweise ausformulierte Lichtreaktion lautet wie folgt:[6]



Die Dunkelreaktion (Calvin-Zyklus) nutzt das Reduktionsmittel  $NADPH$  und die Energiequelle ATP, um Kohlenstoffdioxid aus dem Gasförmigen in Kohlenstoffbindung wie Glucose zu reduzieren. Zusätzlich zu den Erzeugnissen der Lichtreaktion, benötigt die Dunkelreaktion eine große Zahl von Enzymen die als Katalysatoren dienen. Für die Bindung von Kohlenstoffdioxid ist das Enzym RuBisCo (Ribulose-1,5-bis-phosphat-carboxylase-oxygenase) entscheidend. Die Kohlenstoffbindungen durchlaufen zyklisch die Dunkelreaktion (Calvin-Zyklus), wobei ein Teil der Kohlenstoffbindungen abgeführt wird. Je nach Entnahmephase im Zyklus entstehen verschiedene Bindungen, wie zum Beispiel Glukose. Nachfolgend die teilweise ausformulierte Dunkelreaktion:[6]





## 2.3 Mikroalgen als nachwachsender Energieträger

Mikroalgen als nachwachsender Energieträger, befinden sich in den meisten Fällen noch in der Forschung und finden nur wenig Anwendung in der Industrie. Die Ausnahme bildet hierbei die Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie, in der eine höhere Bepreisung der Endprodukte den wirtschaftlichen Vorteil bringt. Durch die Auswahl der Algenart, sowie Nährstoffzufuhr, wird Biomasse mit hohem Protein-, Kohlenhydrat- und Lipidgehalt erzeugt. Auch die direkte Freisetzung von Kohlenwasserstoffen oder Wasserstoff ist als Nebenprodukt der Photosynthese möglich. Bei der Kultivierung von bestimmten Mikroalgenarten können Lipiderträge von bis zu 70 % erreicht werden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Triacylglyceride, dessen Hauptfettsäuren für die Produktion von Biodiesel relevant sind.[16] Bei der optimalen Kultivierung von Mikroalgen können Tages-Wachstumsraten von bis zu drei erreicht werden. Dafür ist die Alge mit einem Überschuss an Kohlenstoffdioxid, sowie Nährstoffen und optimalen Lichtverhältnissen zu versorgen. Für eine optimale Bestrahlung der Alge wird in Photobioreaktoren auf ein turbulentes Strömungsverhalten gesetzt, welches die Ausrichtung der Algenzelle zur Lichtquelle verbessert. Die Zusammensetzung der Nährstofflösung ist von der Algenart abhängig. Im Zuge der Kohlenstoffaufnahme durch Photosynthese werden Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphate aufgenommen, welches durch Nitrat in der Nährlösung realisiert wird. Weitere wichtige Bestandteile für den Stoffwechsel sind Mikroelemente wie Kalium und Magnesium. Für die Umsetzung der Nährstoffe werden etwa 25% der durch Photosynthese erzeugten Energie benötigt.[9]

In Abb. 3 ist der schematische Querschnitt einer Mikroalgenzelle abgebildet. Die Hauptbestandteile bilden der Zellkern, eine Anzahl aus Chloroplasten und das Mitochondrium welche von Cytoplasma umgeben sind. Diese sind für einen Proteinanteil von ca. 50% der trockenen Biomasse verantwortlich. Der hohe Proteingehalt ist für die Nahrungsmittelindustrie von hoher Bedeutung. Weitere Bestandteile von Grünalgen-Biomasse sind Kohlehydrate, wie Zellulose und Stärke, sowie ca. 10% Fettgehalt (Lipide). Der prozentuale Anteil des Fettgehalts lässt sich über eine reduzierte Stickstoffzufuhr auf bis zu 60% steigern. Innerhalb der Chloroplasten sind Membranen zu Thylakoid-Stapel angeordnet, welche das Photosystem darstellen. Das Pyrenoid beinhaltet das Kohlenstoffdioxid bindende Enzym Rubisco und befindet sich ebenfalls innerhalb der Chloroplasten.[9] Weitere Inhaltsstoffe sind Pigmente und Vitamine, welche im Bereich der Nahrungsergänzungsmittel und für pharmazeutische Produkte von Bedeutung sind.[3]

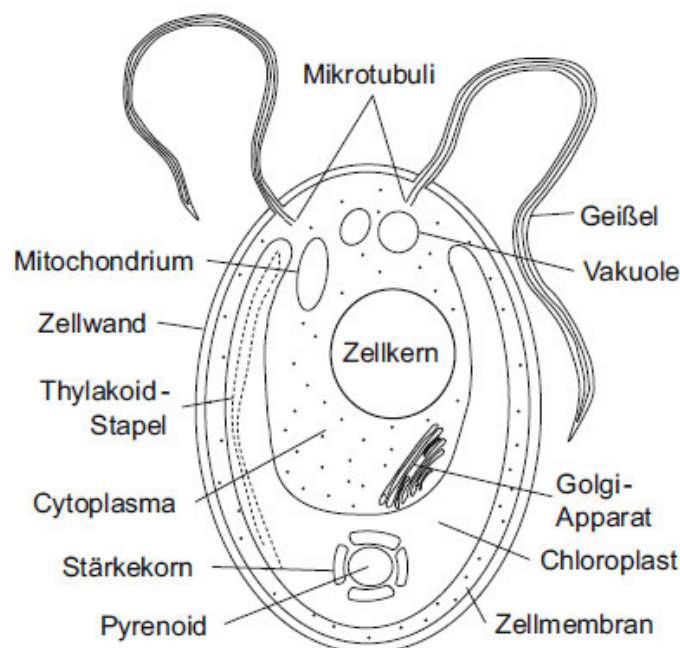


Abb. 3: Schematischer Querschnitt einer Mikroalgenzelle[9]



## 2.4 Mikroalgenarten und ihre Eigenschaften

Weltweit sind etwa 35.000 Mikroalgenarten bekannt, wobei von einer deutlich höheren Anzahl noch unerforschter Arten ausgegangen werden kann.[4] Der Anteil an Mikroalgen, welcher in Industrie und Forschung zu Einsatz kommt, ist hauptsächlich auf hohe Wachstumsraten ausgelegt und besitzen hohe Lipid und Kohlehydrat Anteile. Diese werden in Süß- und Salzwasser kultiviert, was von der Algenart abhängig ist. Durch Anpassung der Nährstoffzufuhr, sowie dem genetischen Manipulieren der Photosynthese Reaktion, werden verschiedene Ausscheidungsprodukte erzielt. Ein Beispiel ist die Bildung von Wasserstoff als Nebenprodukt der Photosynthese. Nachfolgend sind einige Hauptgattungen der Grünalgen mit technischer Nutzung vorgestellt.

Algenarten der Grünalge (Chlorobionta) zeichnen sich durch Ihre genetische Nähe zu höheren Pflanzen, Moosen und Farnen aus. Durch die Evolution haben sich mehrere verschiedene Algenarten der Grünalge entwickelt. Nachfolgend sind einige energetisch relevante Arten aufgeführt:[9]

- Chlamydomonas lässt sich durch ihre gutes Kreuzungsverhalten einfach genetisch anpassen, wodurch diese zu den wichtigsten Modellalgenarten zählt. Die Chlamydomonas zeichnet sich durch ein schnelles Wachstumsverhalten, Widerstandsfähigkeit gegen Konzentrationsunterschiede der Nährlösung und Kultivierungstemperatur aus. Ihr Haupteinsatzgebiet ist die Forschung zur Wasserstoffproduktion und Herstellung von Biomasse.[9]
- Chlorella ist eine Grünalge mit einem hohen Wachstumspotential und einer hohen Anpassungsfähigkeit, wodurch sich die Anforderungen an Nährlösung und Reaktoren reduzieren. Die Chlorella wird industriell in der Nahrungsmittelproduktion bereits eingesetzt und Kulturen dieser Alge sind leicht erhältlich.[9]
- Scenedesmus Algenzellen schließen sich zu flachen Aggregationsverbänden von 2 – 32 Zellen zusammen. Sie werden in Süßwasser kultiviert und zeichnen sich durch ihren hohen Lipidanteil aus.[7]
- Botryococcus zeichnet sich durch die Abgabe von langkettigem Kohlenwasserstoff aus, welches in Biodiesel umgewandelt wird. Hierbei werden die Kohlenwasserstoffe, ohne eine Ernte der Zellen, an die Nährlösung abgegeben. Die Botryococcus weist ein geringes Wachstumsverhalten auf.[9]
- Eustigmatophyceen ist eine Grünalgenart, welche sich in Brack- oder Salzwasser kultivieren lässt. Die Alge zeichnet sich durch hohe Wachstumsraten aus und wird für die Herstellung von Biodiesel erforscht.[9]

Neben den Grünalgen zählten früher auch Bakterien zu den Mikroalgen. Diese besitzen ähnliche Eigenschaften, wie Mikroalgen und sind für die biogene Energiegewinnung ebenfalls zu Nutzen. Nachfolgend sind Hauptgattungen der Cyanobakterien („Blualge“) beschrieben.

Die Cyanobakterien besteht aus widerstandsfähigen prokaryotischen Zellen (ohne Zellkern) mit einem hohen Proteingehalt. Diese werden als Trockenmasse mit einem Proteingehalt von bis zu 80% in Massenkulturen industriell gezüchtet. Durch den prokaryotischen Zellaufbau der Cyanobakterien ist eine genetische Manipulation erleichtert. Diese werden für die Forschung von Biokraftstoffen verwendet. Dabei scheiden genetisch manipulierten Cyanobakterien unter angepasster Nährlösung Bioethanol aus, welches ohne eine Ernte der Alge entnommen wird. Eine Gewinnung von Wasserstoff ist unter ähnlichen Bedingungen ebenfalls möglich. Zu den wichtigsten Blualgenarten gehören die Spirulina, die Synechococcus und die Synechocystis.[9]

## 2.5 Photobioreaktor-Typen

Photobioreaktoren werden für die Kultivierung von Mikroalgen eingesetzt, um Algenarten sortenrein und unter Ausschluss von Umgebungseinflüssen zu Züchten. Systemkomponenten und Geometrie sind dabei von Standortfaktoren, Biomassequalität, Investitions- und Betriebskosten abhängig. Die Reaktortypen sind dabei in offene und geschlossene Systeme zu unterscheiden. Diese werden in der Literatur durch folgende Leistungskriterien verglichen:

- Volumetrische Produktivität ( $P_V$ ): Beschreibt das erzeugte Volumen an getrockneter Biomasse im Verhältnis zur Produktionszeit. Eine hohe volumetrische Produktivität zeichnet eine Kultivierung mit hoher Wachstumsrate aus. Unter Laborbedingungen ist bei mittleren Biomassekonzentrationen ein  $P_V$ -Wert von  $1\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  üblich.[9]
- Flächenproduktivität ( $P_A$ ): Die Flächenproduktivität ist abhängig von der Strahlungsquelle, bei solarer Strahlung ist dies in Mitteleuropa auf  $4320\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  begrenzt. Der Ausnutzungsgrad von der Lichtenergie durch die Algenzelle, auch Photokonversionseffizienz (PCE, siehe nachfolgend) genannt, liegt bei 5% und limitiert die Flächenproduktivität auf  $30\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ . Vergleichsweise haben kohlenhydratreiche Algen einen Energiegehalt von ca.  $20\text{MJ}/\text{kg}$  und Algenarten mit hohem Lipidgehalt ca.  $27\text{MJ}/\text{kg}$ . Werte von durchschnittliche  $20\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  bis zu  $50\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  bei optimalen Kultivierungsverhältnissen sind üblich.[9]
- Photokonversionseffizienz (PCE): Der PCE-Wert stellt das Verhältnis von produzierter Biomasse zum Ausnutzungsgrad der Lichtenergie dar. Die Höhe des PCE-Wertes ist dabei abhängig von der gewählten Bilanzgrenze des Systems. Für Bilanzgrenzen über den Lichtkollektor hinaus sinkt der PCE-Wert, da Wirkungsgrade von Pumpen oder Lichtverluste einbezogen werden. Systemabhängige PCE-Werte sind  $0,01\text{MJ}/\text{MJ}$  bei „Open Pond“ Systemen,  $0,05\text{MJ}/\text{MJ}$  bei Outdoor-Reaktoren und  $0,1\text{MJ}/\text{MJ}$  innerhalb des Labors.[9]
- Biomassekonzentration: Die Biomassekonzentration gibt das Verhältnis zwischen Substrat und Algenzellen an. Hohe Biomassekonzentrationen haben einen Einfluss auf die Lichttransmission und die partielle Verfügbarkeit der Lichtenergie im Bioreaktor. Durch erhöhte Biomassekonzentrationen sinkt das prozentuale Filtrationsvolumen pro gewonnene Biomasse. Durchschnittliche Werte sind dabei systemabhängig und liegen bei  $1\text{g}/\text{L}$  bei Open Pond Systemen und bei  $5\text{g}/\text{L}$  innerhalb geschlossener Photobioreaktoren.[9]

Die Kultivierung von Mikroalgen in offenen Becken (Open Ponds) unterteilt sich in zwei wesentlichen Prozessen, die durchmischten und die nicht durchmischten Photobioreaktoren. Bei beiden Prozessen befindet sich die Algensuspension in großflächig verlegten, schlangenförmigen Becken, welche in direktem Kontakt mit der Atmosphäre stehen. Innerhalb des durchmischten Prozesses (Raceway-Ponds) ist die Algensuspension durch ein Schaufelrad in permanente Bewegung versetzt, wodurch die partielle Lichtverfügbarkeit gesteigert wird. Die Algensuspension ist in beiden Systemen über die solare Strahlung mit Lichtenergie versorgt, sowie über die Umgebungsluft mit Kohlenstoffdioxid. Wesentliche Vorteile dieser Bioreaktoren sind die einfache Bauform, die leichte Betriebsweise und der geringe mechanische Energieeintrag. Die Herausforderungen sind geringe Wachstumsraten, der hohe Platzbedarf und hohe Kontaminationsrisiken. Weiterhin limitieren die Umgebungseinflüsse die Kultivierung von nicht widerstandsfähigen Algenarten.[13]

Die geschlossenen Systeme zur Kultivierung von Mikroalgen werden Photobioreaktoren genannt. Diese unterscheiden sich in Geometrie und genutzter Strahlungsquelle voneinander, weiterhin wird unterschieden in geschlossene und halbgeschlossene Systeme. Hierbei besteht der Lichtkollektor aus transparentem Material und steht in keinem direkten Kontakt mit der Atmosphäre. Der Lichtenergie-Eintrag ist über solare Strahlung oder eine künstliche Lichtquelle realisiert. Die Photobioreaktoren sind dabei in die Kategorien Airlift-Reaktoren und Rohr-Reaktoren unterteilt. Wesentlicher Unterschied der Reaktortypen ist die Umwälzung der Algensuspension. Bei den Airlift-Reaktoren wird die Umwälzung der Algensuspension über

den Gaseintrag realisiert. Innerhalb von Rohrreaktoren durch zusätzlichen Leistungseintrag einer Umwälzpumpe. Die Geometrien der einzelnen Reaktortypen unterscheiden sich dabei stark. Eine Auswahl an Photobioreaktor-Typen ist nachfolgend genauer definiert. Wesentliche Vorteile bei der Kultivierung innerhalb von Photobioreaktoren, sind die erhöhte Flächenproduktivität, das geringe Kontaminationsrisiko und die höhere Biomassekonzentration. Die Hauptherausforderungen sind dabei die hohen Installationskosten, die Überwachung der Anlagenparameter und die Wirtschaftlichkeit bei zusätzlichem Energieeintrag durch Pumpen und Lichtquellen.[13][9]

### 2.5.1 Airlift-Plattenreaktoren

Plattenreaktoren bestehen aus transparenten Kunststoffflächen/-beuteln aus Polyethylen (PE), Polymethylmethacrylat (PMMA, Acrylglas) oder Polyvinylchlorid (PVC), welche durch eine Hilfskonstruktion in Plattenform gehalten werden. Neben der solaren Strahlung als Energiequelle, wird als einziges Hilfstriebwerk eine Gas-Pumpe benötigt. Als Auslegungsfaktor wird das Oberflächen- zu Grundflächenverhältnis definiert, dabei steigt die maximal mögliche Biomassekonzentration mit abnehmender Schichtdicke der Platten. Eine Erweiterung der Anlagengröße ist durch das Zusammenstellen mehrerer Plattenmodule skalierbar. Die Begasung der Algensuspension erfolgt gezielt vom Boden des Plattenreaktors, wodurch sich eine laminare Durchströmung einstellt und unter Nutzung des Flash-Light-Effekts höher Wachstumsraten erzielt werden. Der Energieeintrag durch die Gas-Pumpe ist vom hydrostatischen Druck der Algensuspension abhängig und steigt mit zunehmender Bauhöhe des Plattenreaktors. In Tabelle 1 sind die charakteristische Kenngrößen von Plattenreaktoren zusammengeführt.

Kenngröße	Wert	Einheit
Länge	2 - 4	m
Höhe	1 - 2	m
Schichtdicke	0,02 - 0,05	m
Begasungsrate	0,1 - 0,2	$L_{\text{Gas}} / (L_{\text{Medium}} \cdot \text{min})$
Kohlenstoffdioxidanteil der Begasung	5 - 10	%
Photokonversionseffizienz (PCE)	3 - 4	%
Volumetrischer Leistungseintrag ( $P_A$ )	50 - 100	$W / m^3$
Biomasse-Konzentration	2 - 4	$kg / m^3$
Volumetrische Produktivität ( $P_V$ )	0,4 - 0,8	$kg / (m^3 \cdot d)$

Tabelle 1: Charakteristische Kenngrößen eines Flachplatten-Airlift Reaktors[9]

Neben der einfachen Bauweise des Plattenreaktors, ergeben sich einige technische Herausforderungen. Über die Suspensionsoberfläche besteht ein indirekter Kontakt zur Atmosphäre, wodurch eine kontaminationsarme Biomassenproduktion eingeschränkt ist. Die Schichtdicke in Kombination mit der laminaren Durchströmung macht den Plattenreaktor für hohe Biomassekonzentrationen ungeeignet. Durch Bildung von Sedimenten und Belägen auf der Reaktorwand, ist der Strahlungseintrag begrenzt.[9][5]

Alternative Flachplatten-Airlift Reaktoren beeinflussen das Strömungsverhalten der Algensuspension durch Stromstörer (Baffles). Die angepasste Geometrie führt zu einer besseren Durchmischung zwischen angestrahlter und Lichtquellen abgewandter Reaktorseite. Die Begünstigung des Flash Light Effect führt zu höheren Wachstumsraten. Abb. 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Flachplatten-Airlift Reaktors.[9][5]

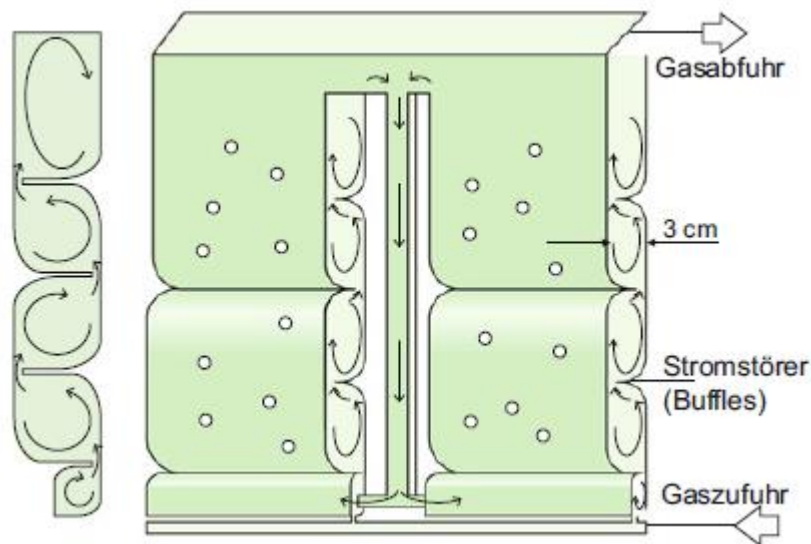


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Flachplatten-Airlift Reaktors[9]

Die Algensuspension am Reaktorboden ist in zwei Kammern aufgeteilt. Durch die Begasung stellt sich eine horizontale Durchströmung des Reaktors ein, welche über ein Rohr zurückgeführt wird. Bauhöhen von bis zu drei Metern sind bei dieser Reaktorvariante möglich.[9][5]

Eine weitere Plattenreaktor Variante ist der Wasserbett-Reaktor, welcher in Abb. 5 dargestellt ist. Die Algensuspension befindet sich in Reaktorschläuchen, welche innerhalb eines Wasserbeckens montiert sind. Das Wasserbecken dient als thermischer Speicher und reguliert Temperaturunterschiede der Umgebung. Die Reaktorschläuche haben eine Aufbauhöhe von ca. 30 cm und benötigen somit größere Aufstellflächen.[9]

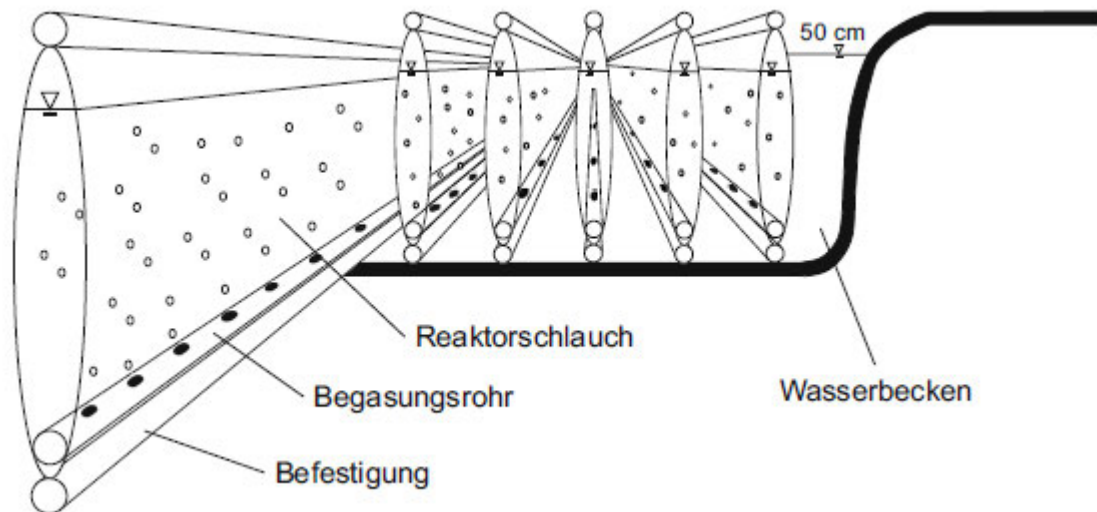


Abb. 5: Schnittdarstellung eines Wasserbett-Reaktors[9]

Die zuvor beschriebenen Plattenreaktoren stellen nur eine Auswahl der möglichen Geometrien dar. Neben den Plattenreaktoren gibt es Säulenreaktoren, welche auf dem Airlift-Prinzip basieren und eine Umwälzung der Algensuspension durch die Kohlenstoffdioxid Einspeisung realisieren.

## 2.5.2 Rohrreaktoren

Rohrreaktoren sind aus transparenten Glas- oder Kunststoffrohren gefertigt und werden schlangenförmig in „Zäunen“ angeordnet. Der Rohrdurchmesser ist dabei auf maximal 50 mm begrenzt, um erhöhte Strömungswiderstände und reduzierten Lichteintrag, durch entstehende Dunkelzonen, zu vermeiden. Über eine Kreiselpumpe wird eine turbulente Strömung innerhalb der Rohrleitung erzeugt, um den Lichteintrag und Gasdurchmischung hochzuhalten. Weiterhin reduziert die turbulente Durchströmung eine Ablagerung von Sedimenten an der Rohrwand. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dabei mit 0,1 – 1 m/s über den Rohrquerschnitt gleichbleibend verteilt. Die Kohlenstoffdioxidzufuhr und bedarfsweise Nährstoffzufuhr erfolgt über einen Versorgungsbehälter. Über die Länge der Rohrleitung stellen sich unterschiedliche Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Wasserstoff ein, welche die Wachstumsrate negativ beeinflussen und die Rohrleitungslänge limitieren. Für ein besseres Konzentration Verhältnis wird bei Großanlagen Kohlenstoffdioxid angereicherte Umgebungsluft verwendet. In Tabelle 2 sind charakteristische Kenngrößen von Rohrreaktoren dargestellt.[9]

Kenngröße	Wert	Einheit
Begasungsrate	0,1 - 0,2	$L_{\text{Gas}} / (L_{\text{Medium}} \cdot \text{min})$
Kohlenstoffdioxidanteil der Begasung	10 - 100	%
Fließgeschwindigkeit	0,1 - 1	m / s
Photokonversionseffizienz (PCE)	4 - 6	%
Volumetrischer Leistungseintrag ( $P_A$ )	150 - 400	W / m <sup>3</sup>
Biomasse-Konzentration	2 – 4	kg / m <sup>3</sup>
Volumetrische Produktivität ( $P_V$ )	0,8 – 1,5	kg / (m <sup>3</sup> · d)

Tabelle 2: Charakteristische Kenngrößen von Rohrreaktoren[9]

Bei Rohrreaktoren handelt es sich um ein geschlossenes System, das über eine kontrollierte Zufuhr, der Betriebsmedien über einen Versorgungsbehälter von der Atmosphäre getrennt ist. Die erzeugte Biomassequalität ist hoch und durch Anpassen der Systemparameter ist ein Betrieb nahe der optimalen Wachstumsrate möglich. Die Herausforderung bei der Kultivierung in Rohrreaktoren sind die hohen Energieeinträge beim Erzeugen des Strömungsfeldes.[9][5]

In Abb. 6 ist ein Glasrohrreaktor der Firma Roquette Klötze GmbH & Co. KG dargestellt, welcher im Bereich der Nahrungsmittelproduktion von Mikroalgen eingesetzt wird. Der Reaktor ist innerhalb eines Gewächshauses aufgestellt, um thermische Einträge/Verluste zu verringern. Rohrreaktoren aus Glas reduzieren die Belag-Bildung (Fouling) und wirken sich positiv auf das Strömungsverhalten aus. Diese werden im Bereich der Lebensmittel- und Kosmetikproduktion eingesetzt.[5]



Abb. 6: Lichtkollektor eines Rohrreaktors der Firma Roquette Klötze GmbH & Co. KG[34]



In Abb. 7 ist ein Tannenbaum-Rohrreaktor der Firma Gicon abgebildet, bei der die Rohrleitung aus Kunststoff hergestellt ist. Durch die abgestufte zylindrische Anordnung der Rohrleitung erhöht sich die angestrahlte Oberfläche des Lichtkollektors. Der Querschnitt ist durch ein innenliegendes Rohr reduziert und reduziert dadurch die Dunkelreaktionsbereiche der Algensuspension. Weiterhin ist die Systemtemperatur über den innenliegenden Kühlkreislauf regelbar. Der Lichteintrag ist über die solare Strahlung realisiert und ist bei Bedarf durch LED (Leuchtdiode) Leuchtmittel erweiterbar.[5]



Abb. 7: Lichtkollektor eines Tannenbaum-Rohrreaktors der Firma Gicon[5]

## 2.6 Kultivierungsprozesse von Mikroalgen

Die Kultivierung von Mikroalgen unterteilt sich in drei verschiedenen Prozessen, welche nachfolgend dargestellt sind. Die Prozessbausteine Temperatur, pH-Wert, Photonenflussdichte, Biomassekonzentration und Nährstoffversorgung unterscheiden sich innerhalb des Prozesses vor allem in der Art der Verfügbarkeit und sind in Abschnitt 2.7 genauer definiert. Die optimalen Betriebsparameter sind dabei meist Algenarten abhängig und stehen im direkten Zusammenhang mit der Wachstumsrate des anzubauenden Organismus.

Das Satzverfahren, auch Batch-Prozess genannt, bezeichnet einen Kultivierungsprozess, bei dem der Bioreaktor mit einem konstanten Substratvolumen befüllt ist. Über den gesamten Prozess findet keine Volumenänderung des Systems statt. Das Satzverfahren wird mit dem Einbringen einer Startkultur initialisiert, die benötigten Prozessbausteine sind vollumfänglich im Substrat vorhanden. Die Stoffströme innerhalb der bilanziellen Darstellung sind der Zu- und Abgasstrom, sowie der Volumenaufschlag der Startkultur. Nach der Kultivierung ist die gesamte Substratmenge inkl. der Biomasse zu entnehmen und der Reaktor zu reinigen. Eine Sonderform des Satzverfahrens ist der Betrieb mit Zellrückhaltung, bei dem ein Teil der Algensuspension nach der Erntephase im Bioreaktor verbleibt. Die verbleibende Algensuspension wird mit Substrat auf das Bioreaktorvolumen angereichert und dient als Startkultur für den nachfolgenden Prozessdurchlauf.[5]

Das Zulaufverfahren, auch Fed-Batch-Prozess genannt, ist eine besondere Art des Satzverfahrens und unterscheidet sich durch eine Zufuhr einzelner Prozessbausteine während der Kultivierung. Hierbei werden Stoffströme wie beispielsweise Nährstoffe und Kohlenstoffdioxid dem Prozess sukzessive nachgeführt. Ziel ist es die Substratverfügbarkeit im optimalen Betriebspunkt zu halten und der Biomassekonzentration anzupassen.[5]

Eine Alternative zu den Batch-Prozessen ist eine Kultivierung unter kontinuierlicher Zufuhr sämtlicher Betriebsmedien, sowie der gleichzeitigen Entnahme von Algensuspension. Innerhalb kontinuierlicher Prozesse sind Betriebsparameter, die Substrat- und Biomassekonzentration und das Flüssigkeitsvolumen konstant, wodurch sich das System in einem quasistationären Zustand befindet. Der kontinuierliche Prozess ist in die Betriebsweisen, Chemostat und Turbidostat zu unterscheiden. Innerhalb des Chemostat-Prozesses ist die Wachstumsrate der Algenzelle über die Durchflussrate einzustellen. Die Durchflussrate ist dabei durch die maximale Wachstumsrate begrenzt. Zu hohe Durchflussraten führen zum Ausgewaschen der Mikroalgen aus dem Bioreaktor. Die Kultivierung innerhalb eines turbulenten Strömungsfeldes ist im kontinuierlichen Prozess über die Trübung der Algensuspension geregelt und ermöglicht eine genauere Durchflussrateneinstellung nahe dem Auswaschpunkt.[5]

## 2.7 Prozessbausteine zur Kultivierung im Satzverfahren

Nachfolgend sind die Prozessbausteine zur Kultivierung von Mikroalgen in Bioreaktoren dargestellt, welche beim Satzverfahren bzw. Zulaufverfahren benötigt werden. Die Anforderungen an die Nährstoffversorgung, die solare Strahlung und die Kohlenstoffversorgung, sind dabei ähnlich einem kontinuierlichen Prozess.

Die Kultivierung von Mikroalgen ist in drei Phasen unterteilt, welche die Prozessschritte von einer Mikroalgenkultur bis zur Gewinnung der Biomasse beschreiben. Während der Ladephase wird der Photobioreaktor mit einer Startkultur der Mikroalgenart beladen. Hierfür wird eine kleine Anzahl von Mikroalgenzellen in ein Gemisch aus Wasser und Nährstoffen gegeben. Die Algenzellen vermehren sich während der Wachstumsphase durch Zellteilung. Innerhalb der Wachstumsphase wird der Mikroalge Kohlenstoffdioxid und intervallweise solare Strahlung zugeführt. Für hohe Biomassekonzentrationen ist die Nährstoffzufuhr während der Ladephase kontinuierlich nachzuführen, um ein Hemmen des Stoffwechsels zu vermeiden. Über den pflanzlichen Prozess der Photosynthese erhöht sich die Mikroalgenkonzentration innerhalb des Bioreaktors exponentiell. Weitere Prozessbausteine sind die Strömungsgeschwindigkeit und die Systemtemperatur, welche durch den Bioreaktortyp variieren. Abschließend werden die Mikroalgen in der Erntephase dem Bioreaktor entnommen und wie in Abschnitt 2.8 beschrieben, in die gewünschte Endenergieform umgewandelt. Hierbei ist die Trennung der Biomasse vom hohen Restwasseranteil die energetisch größte Herausforderung. In Abb. 8 werden die Prozessbausteine während der Prozessschritte dargestellt und nachfolgend genauer beschrieben.

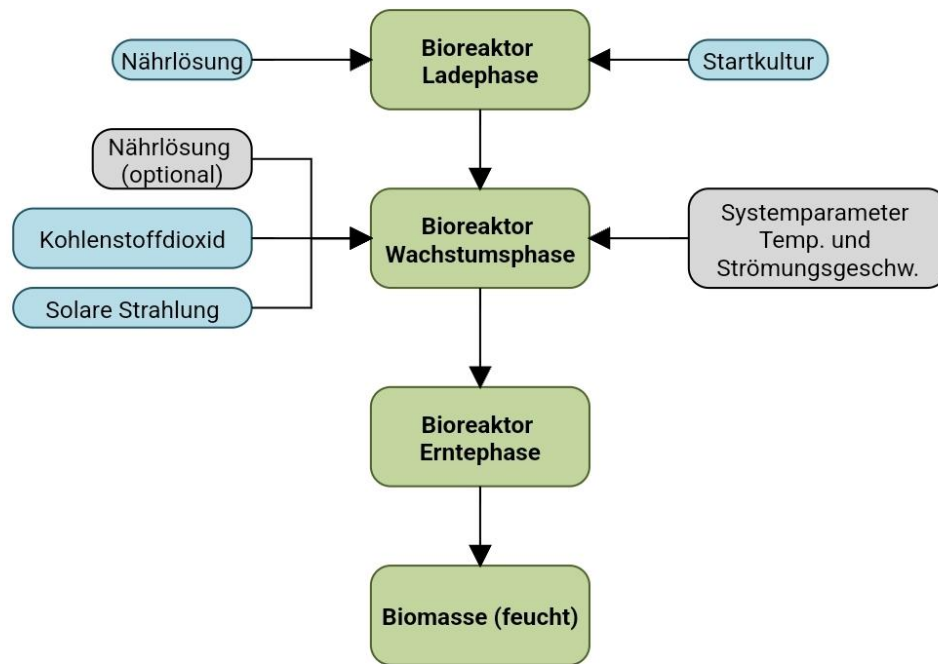


Abb. 8: Prozessbausteine der Kultivierung von Mikroalgen in drei Phasen

Hauptbestandteil der Nährlösung ist Algenartenabhängig Süß-, Salz- oder Brackwasser. Neben Spurenelementen, beinhaltet die Nährlösung Stickstoffe (z.B.  $\text{NH}_4^+$  oder  $\text{NO}_3^-$ ) und Phosphate ( $\text{PO}_4^-$ ), welche die Algenzelle während der Photosynthese aufnimmt. Für eine hohe Wachstumsrate ist die Nährstoffkonzentration im Wasser entscheidend. Zu hohe Nährstoffkonzentrationen reduzieren allerdings die Wachstumsrate und Nährsalze sind während der Wachstumsphase zuzuführen. Die Nährsalze liegen dabei meist in gelöster Form vor und werden durch Speisepumpen dem System zugeführt. Die Zusammensetzung der Nährstoffe nimmt direkten Einfluss auf die gebildeten Inhaltsstoffe der Algenzelle. Dabei werden verschiedene prozentuale Verteilungen von Proteinen, Kohlehydraten und Lipiden über die Nährstoffauswahl eingestellt. Die genaue Zusammensetzung der Nährlösung ist dabei Algenarten abhängig und wird unter verschiedenen Kultivierungsbedingungen erforscht.

Die natürliche Energiequelle der Photosynthese ist die solare Strahlung, die in der Natur teilweise als diffuse oder direkte Strahlung zur Verfügung steht. Bei Photobioreaktoren findet der Strahlungseintrag einseitig über den Lichtkollektor statt. Dieser erhöht die Aufnahmefähigkeit der Algensuspension durch Vergrößerung der bestrahlten Oberfläche, wodurch die Wachstumsrate gesteigert wird. Die Geometrie des Lichtkollektors ist dabei variabel und abhängig von der Strahlungsquelle, sowie der verwendeten Anlagenkomponenten. Der Einsatz von künstlichen Lichtquellen ermöglicht eine konstante Bestrahlung des Lichtkollektors und eine Anpassung der Strahlungsintensität, sowie des Strahlenspektrums. Durch eine zunehmende Biomassekonzentration reduziert sich die Licht-Transmission durch den Lichtkollektor und die Wachstumsrate sinkt. Eine charakteristische Wachstumskurve in Abhängigkeit der Lichttransmission ist in Abb. 9 dargestellt.



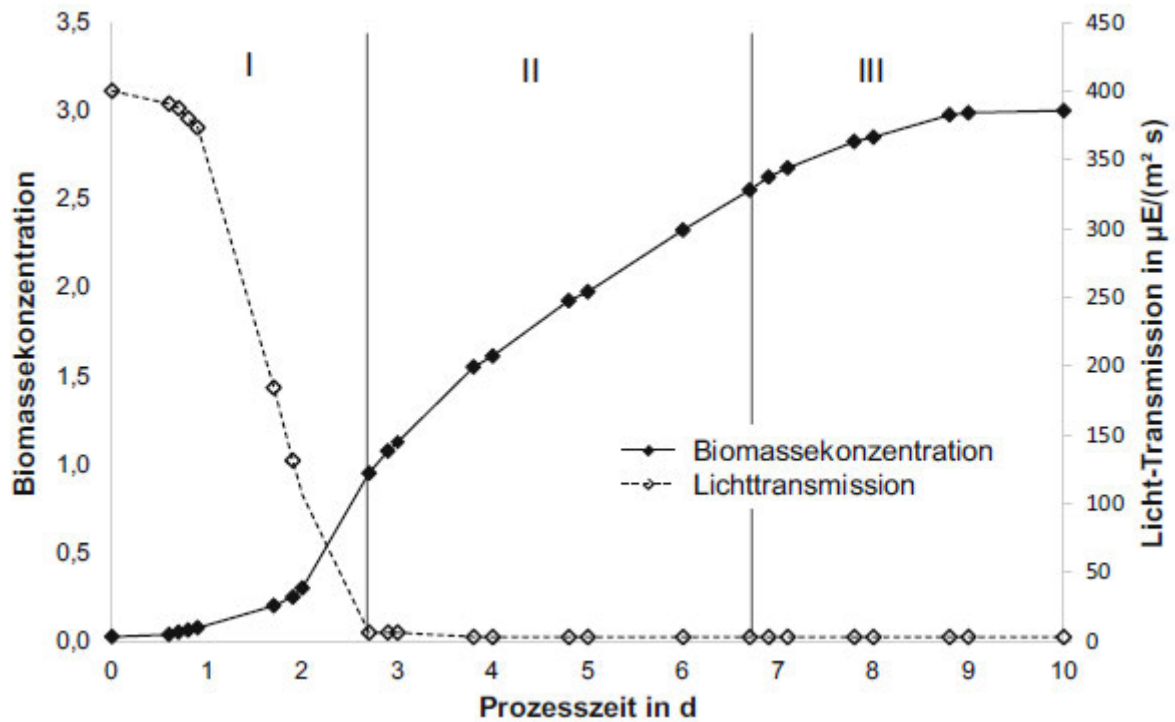


Abb. 9: Charakteristische Wachstumskurve von Mikroalgen in einem Photobioreaktor[10]

Hierbei lässt sich das Wachstum in drei Phasen unterteilen, welche abhängig von der Licht-Transmission sind. In Phase eins ist das Algenwachstum exponentiell, da die Algen gleichmäßig mit Licht versorgt werden. Das Algenwachstum linearisiert sich in Phase zwei, durch die reduzierte Lichtverfügbarkeit an der lichtquellenabgewandten Seite. Bis in Phase drei das Algenwachstum nur noch stark limitiert möglich ist.[9]

Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR – Photosynthetic Activ Radiation) umfasst einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm. Dabei ist der Rotlichtbereich zwischen 660 nm – 700 nm am energetisch Effizientesten, durch die bessere Aufnahmefähigkeit des Chlorophylls in diesem Bereich. Die PAR wird durch die Photonenflussdichte (PPFD – Photosynthetic Photon Flux Density) mit der Einheit  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bemessen und mit einem PAR-Sensor („Lichtquantenzähler“, Photosynthetisch aktive Strahlung) ermittelt. Die durch solare Strahlung erzeugte PPFD erreicht in Europa ein Maximum von ca. 2000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Die Aufnahmefähigkeit der Algenzelle ist auf einen geringeren Wert begrenzt. Zu hohe PPFD-Werte wirken Wachstums inhibierend, da keine Dunkelzonen für Zellatmung vorhanden sind. Dies wird in der Natur durch den Nacht- Tagzyklus kompensiert. In Abb. 10 ist der optimale Arbeitspunkt einer Charakteristischen Grünalge dargestellt. Dabei ist die Kurve der spezifischen Wachstumsrate in drei Bereiche zu unterteilen. Im ersten Bereich ist der Wirkungsgrad am größten, da durch geringen Lichteintrag hohe Wachstumsraten erzielt werden. Der Optimale Arbeitspunkt befindet sich bei ca. 250  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Durch Einbringen weiterer Lichtenergie erhöht sich die Wachstumsrate im zweiten Bereich weiter, dabei sinkt die Steigung der Wachstumskurve ab und geringere Wirkungsgrade werden erzielt. Bei mehr als ca. 1700  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  beginnt der dritte Bereich, in dem sich der Lichtenergieeintrag negativ auf die Wachstumsrate auswirkt.[9]

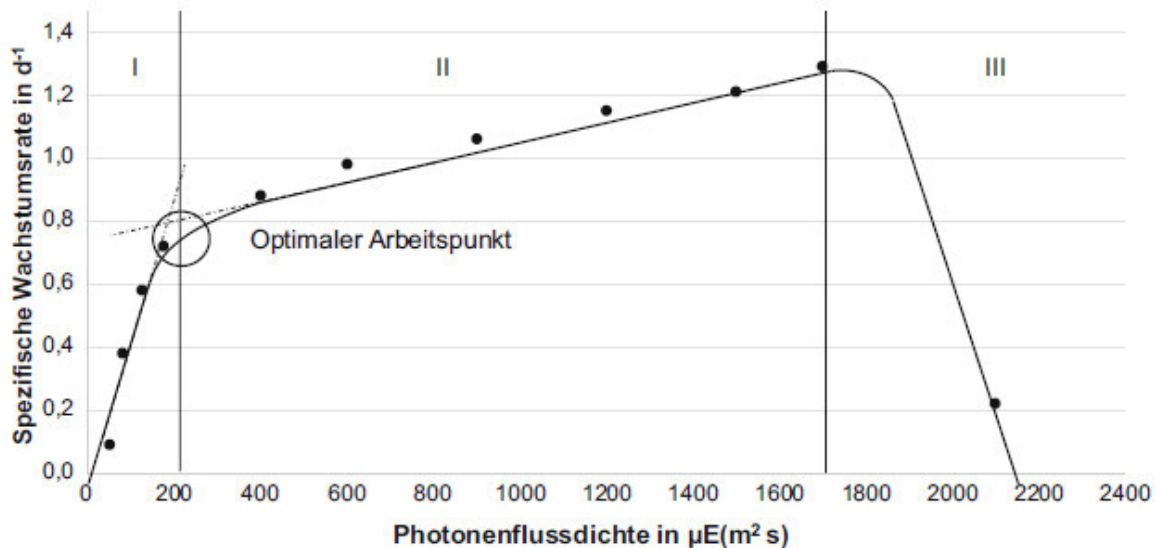


Abb. 10: Spezifische Wachstumsrate in Abhängigkeit der Photonenflussdichte von *Chlamydomonas reinhardtii*[10]

Die eingetragene PPFd ist dabei in auf die Oberfläche des Bioreaktors und die spezifische PPFd auf der Algenzelle zu unterscheiden. Durch Transmissionsverluste beim Durchdringen der Reaktoroberfläche entstehen Verluste. Die überschüssigen absorbierten Photonen werden dabei in Wärme dissipiert. Eine höhere Photonaufnahmefähigkeit ist durch erhöhte Mischzeiten der Algensuspension zu erreichen. Dabei werden überschüssige Photonen durch die Geißeln der Algenzelle in Dunkelbereiche getragen und die spezifische PPFd erhöht. Dieser Effekt ist als „Flash Light Effect“ bekannt.[9]

Neben Licht benötigt die Algenzelle Kohlenstoffdioxid, welches innerhalb der Dunkelreaktion aus der Umgebung reduziert wird. Die Kohlenstoffdioxid Löslichkeit ist dabei von Druck und Temperatur abhängig, wobei mit steigender Temperatur die Löslichkeit abnimmt und mit höherem Druck zunimmt. Der theoretische minimale Kohlenstoffdioxid Bedarf, sowie die Temperatur ist dabei Algenarten abhängig. Hierbei haben Algenarten mit hohem Kohlehydratanteil einen Bedarf von ca. 1,8 kg/kg und Algenarten mit einem hohen Lipidgehalt benötigen ca. 3 kg/kg. Im Mittel wird der Bedarf mit 2 kg/kg beschrieben, was einer Einspeisung von 2g CO<sub>2</sub>/(l·d) für 1g Biomasse/(l·d) entspricht. Weiterhin ist die Wachstumsrate durch die Aufnahmefähigkeit der Algenzelle abhängig vom Partialdruck des Kohlenstoffdioxids, innerhalb der Algensuspension. In Abb. 11 ist zu erkennen, dass ein geringer Partialdruck bezogen auf den Atmosphärendruck, zu geringeren spezifischen Wachstumsraten führt und durch eine mechanische Zufuhr von Kohlenstoffdioxid zu optimieren ist.[9]

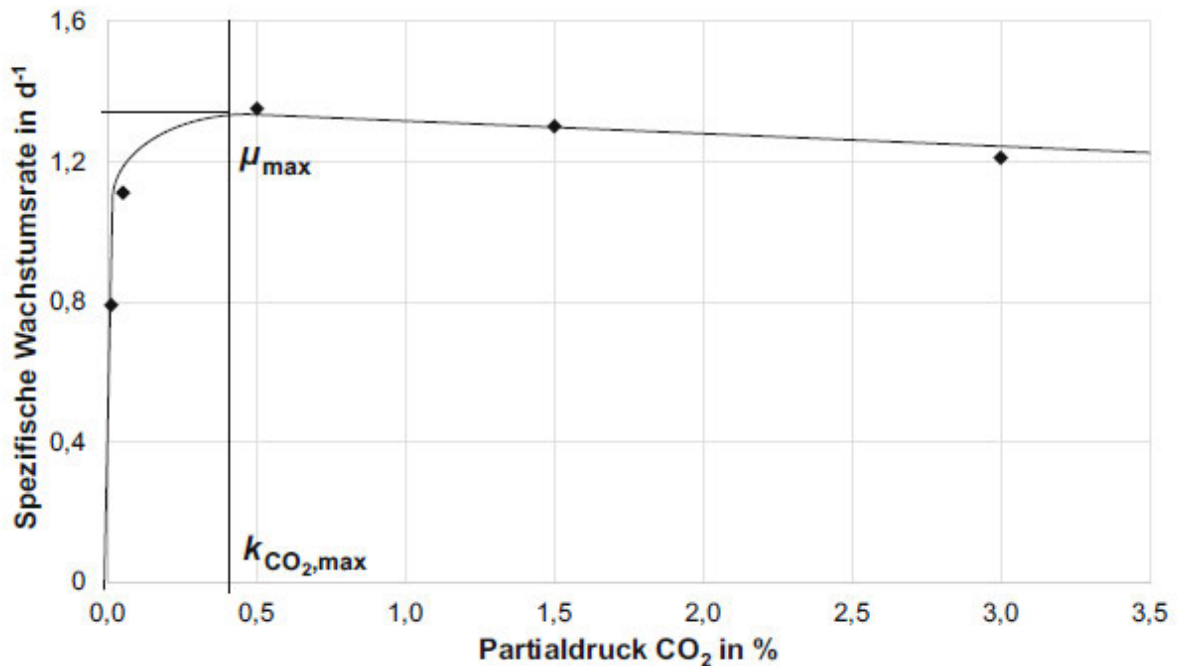


Abb. 11: Die spez. Wachstumsrate der Algenzelle, im Zusammenhang mit dem prozentualen Partialdruck des Kohlenstoffdioxids.[10]

Die zugeführte Kohlenstoffdioxidmenge ist dabei an die Wachstumsverhältnisse anzupassen, um den Verlust im Abgas zu minimieren und lässt sich über den pH-Wert der Algensuspension bestimmen. Das Überschüssige Kohlenstoffdioxid bindet sich mit dem Wasser der Algensuspension zu Kohlensäure ( $H_2CO_3$ ) und senkt den pH-Wert. Der reduzierte pH-Wert wirkt sich Wachstumsinhibierend auf die Algenzelle aus. Der Lösungsgrad ist dabei Algenarten abhängig und variiert zwischen 7-9. Eine Schwankungsbreite von  $\pm 0,5$  ist dabei durch eine alkalische Stoffzufuhr einzustellen.[44]

Weiterhin ist das Wachstumsverhalten der Mikroalgen von den Systemparametern Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Allgemein wachsen Mikroalgen in einem Temperaturbereich zwischen 12 und 30 °C, wobei der optimale Betriebspunkt von der Algenart abhängig ist und sich im oberen Drittel der Bemessungstemperatur befindet.[4] Das Strömungsverhalten ist dabei von dem Bioreaktorsystem abhängig. Hierbei wird in offenen Becken ein laminares Strömungsfeld und in Photobioreaktoren eine turbulente Strömung erzeugt. Das turbulente Strömungsfeld bietet die Vorteile im Bereich der Kohlenstoffdioxid Aufnahme die partielle Verfügbarkeit zu erhöhen und begünstigt die Lichtaufnahme durch Auftreten des „Flash Light Effect“.[9]

## 2.8 Umwandlung der Rohbiomasse in Endenergie

Bei der Kultivierung von Mikroalgen im Satzverfahren steigt die Biomassekonzentration mit der Kultivierungszeit und der Prozess wird über die Ernte der Algensuspension beendet. Wie in Abschnitt 2.6 beschrieben, verbleibt bei der Prozessführung mit Zellrückhaltung ein Teil der Algensuspension im Bioreaktor und dient als Startkultur für den folgenden Prozess. Für Sonnenlicht betriebenen Bioreaktoren mit Zellrückhaltung ist ein Erntezeitpunkt kurz vor der Dunkelphase zu wählen. Über die Dunkelphase steigt die Biomassekonzentration der zurückgehaltenen Algensuspension an, so dass innerhalb der Lichtphase mehr Lichtquanten aufgenommen werden.[38][9]

Die bei der Ernte entnommene Algensuspension ist durch Sedimentation in einer Zentrifuge oder durch Filtration in Biomasse und Substrat zu trennen. Nach dem Trennen besitzt die

Biomasse eine breiige Konsistenz, welche als „Slurry“ bezeichnet wird. Das Slurry ist ein Zwischenprodukt, welches Endenergie abhängig weiterverarbeitet werden muss. Die Herausforderung bei der Trennung von Biomasse und Substrat sind der geringe Dichteunterschied, sowie der hohe Wasseranteil der Algensuspension. Dabei liegt der Feststoffgehalt der Algensuspension in geschlossene Reaktoren bei bis zu 6 g pro Liter, was der 10fachen Menge an Wasser gegenüber der klassischen Fermentationstechnik entspricht. Weiterhin sinkt die Dichte der Mikroalgen mit steigendem Lipidgehalt ab, wodurch eine Trennung in Zentrifugen erschwert wird. Weniger herausfordernd ist die Größe der Mikroalgenzellen, welche zwischen 5 – 10 µm variiert. Unter industrieller Anwendung werden Energiemengen von ca. 2 MJ/m<sup>3</sup> bei der Filtration und ca. 5-10 MJ/m<sup>3</sup> bei der Trennung in Zentrifugen benötigt, was einen Hauptanteil der Prozessenergie darstellt.[38][9]

### 2.8.1 Sedimentation und Zentrifugation

Die Sedimentation und Zentrifugation sind Trennverfahren, welche aufgrund unterschiedlicher Dichten der festen und flüssigen Phasen eine Trennwirkung erzielen. Das Grundprinzip der Sedimentation ist das Absetzen von Partikeln größerer Dichte am Boden des Separators, aufgrund der Schwerkraft. Die Sedimentationsgeschwindigkeit ist dabei von der Partikelgröße, sowie der Dichtedifferenz der zu trennenden Stoffe abhängig. Bei geringeren Dichtedifferenzen sinkt die Sedimentationsgeschwindigkeit, so dass eine Sedimentation von Biomasse nur bedingt möglich ist. Die Verwendung von Zentrifugen verringert die Sedimentationszeit um das 1000- bis 10.000-fache, durch die aus der Rotation resultierende Zentrifugalkraft. Durch das Einbringen von Lamellen oder Tellern innerhalb der Zentrifuge erhöht sich die Klärfläche. Die Klärfläche beschreibt die Summe der Flächen im Spalt zwischen den Lamellen/Tellern, in denen die Separation stattfindet. Die Größe der Klärfläche hat direkten Einfluss auf die Sedimentationsgeschwindigkeit. Weiterhin ist die Sedimentationsgeschwindigkeit abhängig von dem Partikeldurchmesser und die Durchflussrate sinkt bei geringeren Partikelgrößen. Es gibt verschiedene Arten von Zentrifugen, wobei die in Laboren am häufigsten eingesetzte Röhrenzentrifuge die geringste Klärfläche aufweist. Für die Biogene-Zellernte ist die am häufigsten eingesetzte Zentrifuge der Tellerseparator, aufgrund der großen Klärfläche und dem geringen Dichteunterschied des Trennmediums. Abb. 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Tellerseparators, welcher zyklisch zu betreiben ist. Die Separator-Trommel ist geteilt und wird über eine Kolbenventil und einen Klobenschieber selbsttätig entleert.[5]

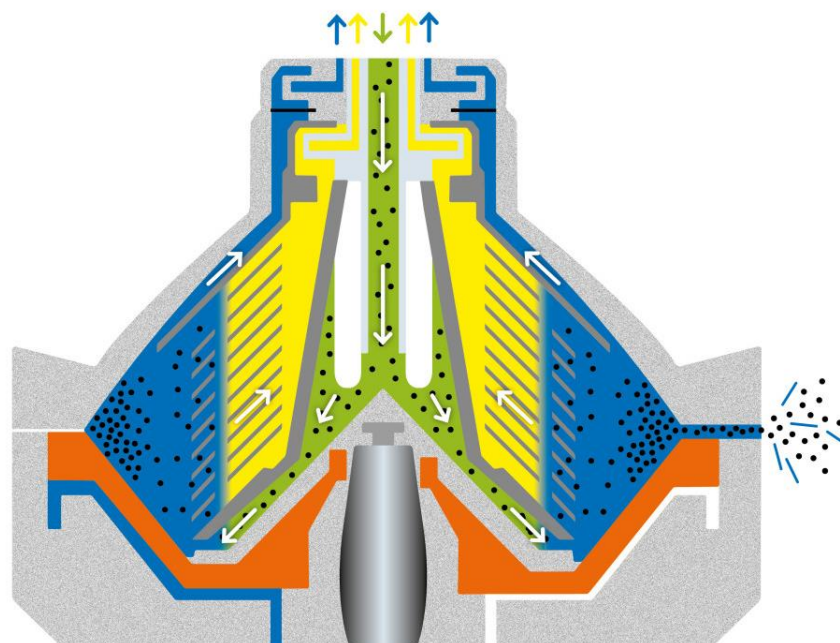


Abb. 12: Funktionsweise Tellerseparator mit zyklischer Entleerung der Firma Winkelhorst Trenntechnik GmbH [35]

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der Durchflussmenge verfügbarer Tellerseparatoren ist diese Verfahrenstechnik für den Laborstand ungeeignet.

## 2.8.2 Filtration

Die Filtration ist definiert als das Abtrennen von Partikeln aus einer Flüssigkeit mithilfe von porösen Gebilden. Bei geringen Dichteunterschieden zwischen flüssiger und fester Phase ist die Filtration besser geeignet als eine Abtrennung durch Zentrifugen. Weiterhin ist die Filtration für geringere Stoffmengen besser geeignet und der Energieaufwand ist niedriger. Die verschiedenen Filterverfahren sind in ihre Abscheidungsmechanismen zu unterteilen. Bei der Siebfiltration werden Filtermedien wie Siebe, Vliese oder Gewebe verwendet, welche kleiner gleich der Partikelgröße sind. Die Siebfiltration ist bei geringen Substratvolumen sinnvoll und findet in der Industrie zur Vorfiltration Anwendung. Ein weiteres Filtrationsprinzip ist die Oberflächenfiltration, bei welcher ein Filtermittel die Separierung der Phasen vornimmt. Ein Stützmaterial aus Gewebe hält dabei das Substrat über eine Anlaufphase zurück, in der nur eine geringe Filterleistung erzielt wird. Das in der Anlaufphase durchgelassene Substrat ist dem Prozess rückzuführen. Die Oberflächenfiltration ist aufgrund des durchlaufbedingten Druckanstieges im batch-Betrieb zu betreiben. Über die Filtrationsdauer nimmt die Partikeldichte auf der Filtrationsfläche zu, wodurch der Druck ansteigt. Bei Erreichen eines systemabhängigen maximal Druckes ist der Filter zurück zu Spülen. Ein kontinuierlicher Betrieb ist durch Bewegung des Stützmaterials möglich. Für die Abtrennung von kleinen bis mittlern Partikeln ist die Tiefenfiltration anzuwenden, bei dem ein kugelförmiges Filtermittel zum Einsatz kommt. Die Kugeldurchmesser sind dabei identisch zu wählen und werden auf das Stützmaterial angeschwemmt. Die Partikel des zu filternden Substrates lagern sich in den Hohlräumen zwischen dem Filtermittel ab. Mit steigendem Filterdruck kommt es zum Durchbruch der Filterschicht und der Filter ist zurück zu Spülen. In der Industrie kommen viele verschiedene Filtersysteme zum Einsatz. In Abb. 13 ist ein kontinuierlich betriebener Bandfilter abgebildet. Dabei wird die Suspension auf der linken Seite des Bandfilters auf das umlaufende Filtertuch gegeben. Über einen Unterdruck wird die flüssige Phase aus der Suspension getrennt und ein Filterkuchen bildet sich auf dem Filtertuch. Der Filterkuchen wird am rechten Ende des Bandfilters durch Abschälen entnommen. Vor der Entnahme des Filterkuchens können weiter Prozessschritte wie Trockensaugen, Auswaschen oder Dämpfen durchgeführt werden.[5]

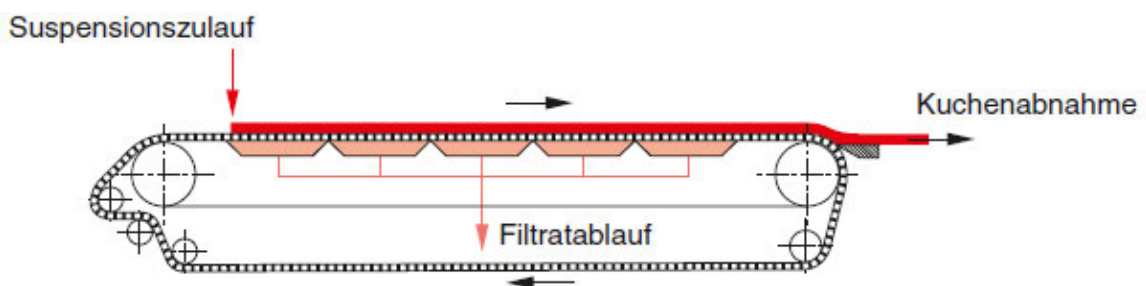


Abb. 13: Funktionsweise der Bandfiltration [5]

Das durch Zentrifugation und Filtration gewonnene Zwischenprodukt besitzt teilweise eine zu hohe Restfeuchte, um direkt als Energieträger genutzt zu werden. Eine weitere Reduzierung der flüssigen Phase ist durch Auspressen des Filterkuchens in einer Bandpresse zu realisieren. Die vorbehandelte Zellsuspension (Slurry) wird durch L-Profilwalzen und nachfolgend flächig aufliegende Presswalzen entwässert. Durch Verwendung eines Filtertuches im Bereich der Presswalzen wird der Restfeuchtegehalt weiter reduziert. Nachfolgende Zellaufschlussverfahren zerstören die Zellwand der Algenzelle und ermöglichen die Gewinnung intrazellulärer Produkte. Die dadurch gewonnenen Lipide werden zu Biokraftstoffen weiterverarbeitet.[5]

Eine weitere Prozesstechnik zur Abtrennung der flüssigen Phase sind Trocknungsverfahren, welche hauptsächlich in der Lebensmittel- und Kosmetikproduktion zum Einsatz kommen. Die wesentlichen Trocknungsverfahren sind Gefriertrocknen, bei dem der Wasseranteil der



Biomasse direkt vom festen in den gasförmigen Zustand überführt wird. Die Sprühtrocknung durch zerstäuben der Biomassesuspension in einen Heißgasstrom. Bei der Wirbelschicht-trocknung wird mit Durchströmung von Betriebsgasen eine Konvektionstrocknung der Bio-masse erzielt. Abschließend die Walzentrocknung durch dampfbeheizte Walzen, auf dessen Oberfläche ein dünner Biomassefilm getrocknet wird. Aufgrund des Anwendungsgebietes in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie wird auf eine ausführliche Erläuterung verzichtet.[5]

### 2.8.3 Endenergie Formen

Die Nutzung von Mikroalgen für die biogene Energiegewinnung nimmt zu. Durch ihre ca. fünf-mal höhere Photosynthese-Leistung ist die Mikroalge den höheren Pflanzen überlegen und ermöglicht eine deutlich höhere Biomasseproduktion. Eine Kultivierung in Photobioreaktoren ermöglicht eine ganzjährige Produktion unabhängig von Tageszyklen. Für die Gewinnung von Endenergieträgern, werden eine Vielzahl an Algenarten und Kreuzungen erforscht. Eine wesentliche Herausforderung ist dabei die Prozesskosten von Endenergieträgern, der Algen-biomasse gegenüber fossilen Brennstoffen zu minimieren. Nachfolgend sind die Prozess-schritte der Endenergieträger von Algenbiomasse beschrieben.

Die vorentwässerte Mikroalgenbiomasse (Slurry) lässt sich in verschiedenen Verfahrensschrit-ten in die Endenergieträger Methan, Ethanol und Bio-Diesel aufbereiten. Eine Ausnahme bildet dabei Wasserstoff, welcher als Nebenprodukt der Photosynthese im Kultivierungsprozess an-fällt und dem Abgasstrom des Photobioreaktors zu entnehmen ist. Für die Gewinnung von Methan, Ethanol und Bio-Diesel sind weitere Prozessschritte nötig, welche in Abb. 14 darge-stellt sind. Durch Zugabe von Mikroalgenbiomasse in Biogasanalgen wird über einen Fermen-tationsprozess Methangas freigesetzt, welches anschließend als Endenergieträger für Brenn-stoffzellen, Blockheizkraftwerke und zur Einspeisung ins Gasnetz genutzt wird. Für die Pro-duktion von Bio-Diesel ist der Lipidgehalt der Algenzelle entscheidend. Die Lipide werden durch Zellaufschluss von der Restbiomasse der Algenzelle getrennt und zu Bio-Diesel synthe-tisiert. Nebenprodukte der Bio-Dieselproduktion ist u.a. Glycerin, welches in der Chemischen Industrie zum Einsatz kommt. Weiterhin ist Glycerin durch Fermentation zu Ethanol synthe-tisierbar. Bio-Diesel wird im Bereich der Automobilindustrie als Kraftstoff verwendet. Neben der Bio-Dieselproduktion werden Lipide der Mikroalgenzelle auch in der Pharmazie-, Chemie- und Nahrungsmittelindustrie verwendet. Die beim Zellaufschluss teilweise verbleibende Restbio-masse ist Biogasanlagen zur Methangas Produktion zuzuführen. Eine Produktion von Ethanol durch Fermentation der Mikroalgenbiomasse ist ebenfalls üblich. Dabei ist der Kohlehydrat Anteil der Algenzelle entscheidet. Nach der Fermentation wird durch Destillieren Ethanol ge-wonnen. Dieser besitzt ca. 60% der Energiedichte von Benzin und wird als additiv dem Benzin beigeführt oder in Ethanol optimierten Ottomotoren also Hauptbestandteil verbrannt.[3][9]

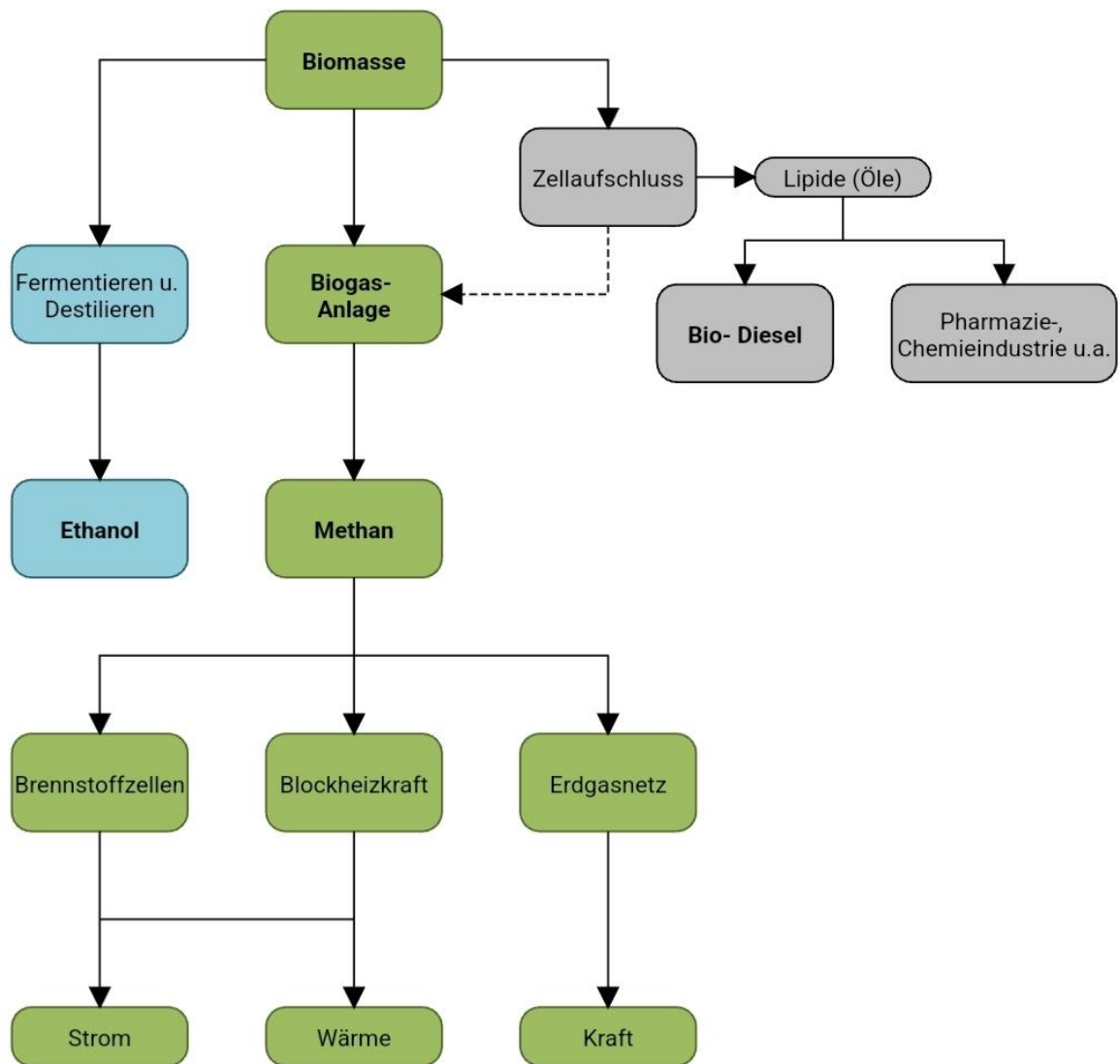


Abb. 14: Prozesskette für die Weiterverarbeitung von Algenbiomasse zu verschiedenen Endenergieträgern

In Tabelle 3 sind die Heizwerte von Endenergieträgern der Mikroalgenbiomasse, sowie der Energiegehalt trockener Algenbiomasse aufgeführt. Um einen Bezug zu fossilen Brennstoffen herzustellen ist der Energiegehalt von Steinkohle und Diesel mit abgebildet. Der Energiegehalt von Methan, Wasserstoff und Ethanol ist dabei unabhängig vom Primärenergieträger.

Brennstoff	Heizwert in MJ/kg
<b>Festbrennstoffe</b>	
Biomasse Mikroalgen	20 - 27
Steinkohle	31,50
<b>Gasförmige Brennstoffe</b>	
Methan	49,95
Wasserstoff	119,61
<b>Flüssig Brennstoffe</b>	
Ethanol	26,9
Bio-Diesel	37
Diesel	41,64

Tabelle 3: Energiegehalt der Mikroalgenbiomasse bezogen auf den Heizwert herstellbarer Endenergieträger[12][11]

Weitere Anwendungsbereiche der Mikroalgenbiomasse sind die Abwasseraufbereitung und die Biosorption von Schwermetallen. Auch die Einbindung von Photobioreaktoren in Kreisprozessen wird untersucht. Der in Abb. 15 dargestellte Kreisprozess des Fraunhofer IGB ermöglicht die Nutzung von Kohlenstoffdioxid aus Verbrennungsprozessen oder biotechnologischen Prozessen. Nach der Erntephase werden dabei die Wertstoffe der Algenzelle extrahiert und die Restbiomasse durch eine Biogasanlage weiterverwertet.[16]

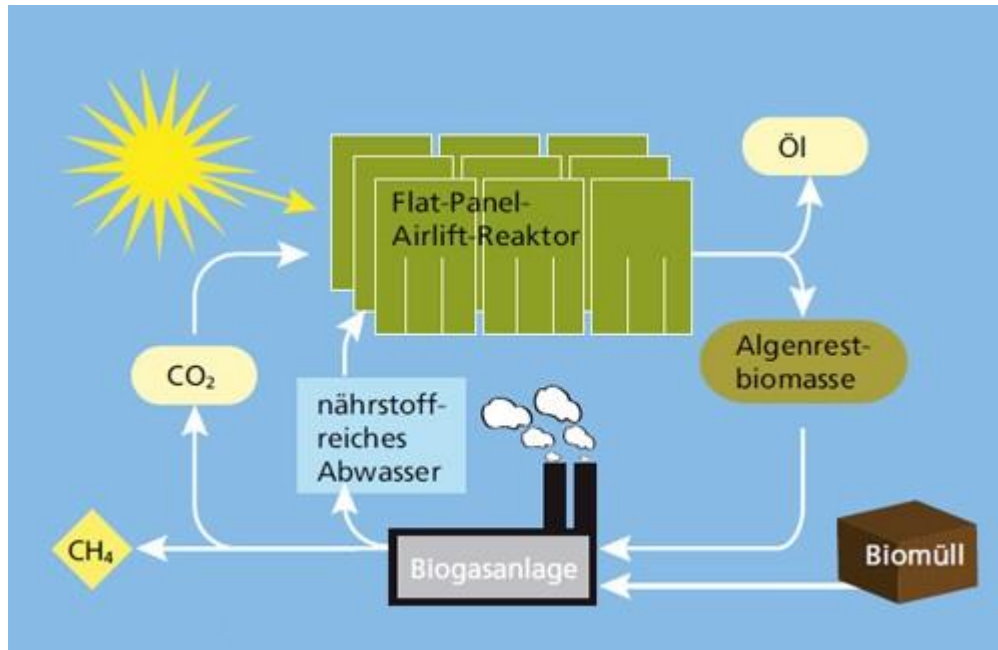


Abb. 15: Einbindungsmöglichkeit von Photobioreaktoren in Kreisprozesse[16]



## 3 Anforderungen und Bewertungskriterien

In diesem Abschnitt sind die Anforderungen an einen Photobioreaktor im Laborbetrieb definiert und teilweise kurz erläutert. Weiterhin sind die Bewertungskriterien zur Auswahl von Anlagenkomponenten dargestellt und einer Gewichtung zugeordnet.

### 3.1 Anforderungen an den Photobioreaktor

Die Anforderungen sind in einer Anforderungsliste zusammengefasst und in Forderungen (F) und Wünsche (W) unterteilt. Dabei sind Forderungen zwingend zu erfüllen und Wünsche nach Möglichkeit zu berücksichtigen. Den Wünschen ist eine Gewichtung von 1 bis 4 zugeteilt, wobei eine höhere Zahl einer höheren Berücksichtigung zuzuordnen ist. Einige der in Tabelle 4 dargestellten Anforderungen sind nachfolgend genauer beschrieben.

#### **Durchmischungsrate**

Die Durchmischung des Bioreaktors nimmt Einfluss auf die Verteilung der Hell- und Dunkelzyklen innerhalb der Algensuspension. Bei Durchmischungsraten ab einer Sekunde steigt die Lichtaufnahmefähigkeit der Alge unter Nutzung des Flash-Light-Effekts, wodurch die Wachstumsrate steigt. Zudem begünstigt eine schnelle Durchmischung den Stofftransport, wodurch Kohlenstoffdioxid der Algenzelle schneller zur Verfügung steht und Reaktionsnebenprodukte wie Sauerstoff schneller abgeführt werden. Eine erhöhte Durchmischungsrate reduziert ebenfalls die Bildung von Ablagerungen durch Biofouling an der Reaktorwand.

#### **pH-Wert**

Der pH-Wert der Algensuspension ist dauerhaft über einen Sensor zu erfassen und über eine LabVIEW Oberfläche abzulesen. Dieser muss in einem Bereich zwischen 7 und 9 liegen.

#### **Begasungsrate**

Die Kohlenstoffdioxid Versorgung muss an den Bedarf der Algen angepasst werden und durch die Umgebungsluft dem System zugeführt werden. Der Bedarf ist dabei Algenarten abhängig und liegt zwischen 1,8 - 3 kg Kohlenstoffdioxid pro 1 kg Biomasse. Die Begasungsmenge muss zwischen  $0,1$  und  $0,2 \text{ l}_{\text{Gas}} / (\text{l}_{\text{Medium}} \cdot \text{min})$  anpassbar sein.

#### **Photonenflussdichte auf der Reaktoroberfläche**

Der Lichteintrag in den Photobioreaktor muss durch eine Transparente Reaktorhülle über künstliche Lichtquellen realisiert werden, um eine Reproduzierbarkeit des Prozesses zu gewährleisten. Die Reaktoroberfläche muss einseitig mit einer minimalen Photonendichte von  $250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bestrahlt werden. Eine Änderung der Photonendichte muss einstellbar sein.

#### **Wartungsarme Anlagenkomponenten**

Der Laborstand soll die Lerninhalte der Vorlesung veranschaulichen und wird nicht dauerhaft betreiben. Die Anlagenkomponenten sind längeren Standzeiten ausgesetzt und müssen dabei möglichst wartungsfrei bleiben, um ein kurzfristiges Inbetriebnehmen zu gewährleisten.

#### **Digitale Erfassung von Anlagenparametern und Bilanzgrößen**

Für den Prozess wichtige Anlagenparameter, sowie Bilanzgrößen müssen über Sensoren erfasst werden und in LabVIEW dargestellt werden. Dabei müssen die Sensordaten über die autonome Wachstumsphase aufgezeichnet und sinnvoll dargestellt werden.

#### **Anschaulichkeit Prozessablauf**

Der Prozessablauf ist neben einem Fließbild durch eine übersichtliche Anzeige von Anlagenparametern in LabVIEW darzustellen.

## Anforderungsliste für einen Photobioreaktor im Labormaßstab

NR.	F/W	Beschreibung der Anforderung	Wert
<b>Prozess</b>			
01	W3	Möglichst hohe volumetrische Produktivität	
02	W3	Möglichst geringer volumetrischer Leistungseintrag	
03	W3	Möglichst hohe Durchmischungsrate	$\geq 1 \text{ s}$
04	F	Prozess muss im Satz- oder Zulaufverfahren betrieben werden.	
05	F	Die Begasungsrate muss variabel einstellbar sein und aus der Umgebungsluft zugeführt werden.	$0,1 - 0,2 \text{ L}_{\text{Gas}} / (\text{L}_{\text{Medium}} \cdot \text{min})$
06	W3	Möglichst ein Kohlenstoffdioxidanteil der Begasung	5 - 10%
07	F	pH-Wert der Algensuspension	7 - 9
08	F	Prozessdauer	$\leq 2 \text{ Wo.}$
09	F	Photonenflussdichte	$\geq 250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
10	F	Leuchtmittel Lichtspektrum	400 - 700 nm
11	F	Systemtemperatur	20 - 30 °C
<b>Laborstand</b>			
12	F	Aufstellfläche	$\leq 4 \text{ m}^2$
13	F	Befüll/Entnahme Öffnung	$\geq 2 \text{ cm}^2$
14	F	Anlagenvolumen	6-15 l
15	F	Transparente Reaktorhülle	
16	W2	Möglichst wartungsarme Anlagenkomponenten verwenden	
17	W2	Möglichst autonomer Betrieb innerhalb der Wachstumsphase	
18	F	Auswertungszeit nach Prozessdurchlauf	$\leq 1 \text{ Std.}$
19	F	Digitale Erfassung von Anlagenparametern und Bilanzgrößen	
20	F	Stationärer installierter Versuchsstand	
21	F	Umgebungstemperatur	15 - 25 °C
22	F	Stromversorgung mit Wechselstrom	230 V
23	W4	Möglichst anschaulicher Prozess	
24	W4	Möglichst ergonomische Bedienung	
<b>Algenart</b>			
25	W3	Möglichst hohe Wachstumsraten	
26	W3	Möglichst hohe Anpassungsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit der Algenzellen	
27	F	Startkulturen müssen verfügbar sein	
<b>Kosten</b>			
28	F	Anschaffungskosten	$\leq 5000 \text{ €}$
29	F	Jährliche Betriebs- und Wartungskosten	$\leq 1000 \text{ €}$

Tabelle 4: Anforderungsliste für einen Photobioreaktor im Labormaßstab

### 3.2 Bewertungskriterien für Anlagenkomponenten

Für die Auswahl von Photobioreaktor-Typen und einzelnen Anlagenkomponenten sind Bewertungskriterien erforderlich, welche aus der Anforderungsliste abgeleitet sind. Die Bewertungskriterien sind in Tabelle 5 dargestellt.

Nr.	Bewertungskriterien
01	Wartungsaufwand
02	Plastizität
03	Photo Conversion Efficiency
04	Volumetrischer Leistungseintrag
05	Volumetrische Produktivität

Tabelle 5: Bewertungskriterien für den Photobioreaktor-Typen

Die Bewertungskriterien besitzen eine unterschiedliche Gewichtung bei der Entscheidungsfindung. In Tabelle 6 ist die Gewichtungsanalyse der Bewertungskriterien abgebildet, dabei sind die einzelnen Bewertungskriterien gegeneinander aufgeführt und mit einer prozentualen Gewichtung bewertet. Hierbei ist jeweils das horizontale Kriterium mit dem vertikalem verglichen und bei höherer Wertigkeit mit einer „1“ und bei minderer Wertigkeit mit einer „0“ bewertet. Anschließend ist die Summe von vergebenen „1“ für jede Zeile gebildet und durch die insgesamt vergebene Anzahl von „1“ dividiert. Die Gewichtung (G) der Bewertungskriterien ist mit Gleichung (72) in Prozent bestimmt. Die Nutzwertanalyse wird auf Basis der VDI 2225 Blatt 3 durchgeführt.

$$G = \frac{\sum \text{Horizontal "1"}}{\sum \text{Gesamt "1"}} \cdot 100 \quad (2)$$

Gewichtungsanalyse	Wartungsaufwand	Plastizität	Photo Conversion Efficiency	Volumetrischer Leistungseintrag	Volumetrische Produktivität	Summe	Gewichtung in %
Wartungsaufwand		0	1	1	1	3	30
Plastizität	1		1	1	1	4	40
Photo Conversion Efficiency	0	0		0	1	1	10
Volumetrischer Leistungseintrag	0	0	1		0	1	10
Volumetrische Produktivität	0	0	0	1		1	10
						10	100

Tabelle 6: Gewichtungsanalyse der Bewertungskriterien

## 4 Photobioreaktor-Typen für den Laborstand

Nachfolgend sind Laborreaktoren verschiedener Hersteller beschrieben und dargestellt. Es wird Bezug auf die Verfügbarkeit von Anlagenkomponenten genommen und ein Reaktorsystem für den Laborstand ausgewählt.

### 4.1 Verfügbare Laborreaktoren

Die Verfügbarkeit von fertigen Laborreaktoren oder einzelner Anlagenkomponenten ist sehr gering. Nachfolgend ist eine Auswahl der verfügbaren Systemlösungen aufgeführt und beschrieben. Dabei ist der Rührreaktor eine Sonderform der Photobioreaktoren, welcher aufgrund des erschwerten Strahlungseintrages wenig industrielle Anwendung findet.

Der xCUBIO der Firma BBI Biotech GmbH ist ein Rohrreaktor für die Kultivierung von Mikroalgen im Labor-Maßstab. Mit einem Reaktorvolumen von ca. 5 Litern ist er für die Mikroalgenforschung 2015 entwickelt worden. Der Lichtkollektor des Photobioreaktors besteht aus einem 9 m langem Glasrohr mit einer Dicke von 20 mm. Dieses ist in eine Spiralform um die LED-Beleuchtungsquelle angebracht. Das Strahlungsspektrum der LED ist in vier getrennte Wellenlängen einzustellen mit variabler Beleuchtungszeit. Ein nebenstehender Systemschrank ermöglicht die Überwachung und Regelung verschiedener Systemparameter. In einem Innenliegenden Systembehälter ist die Kohlenstoffdioxid - Dosierung der Algensuspension, sowie die Temperierung und der Sauerstoffaustausch geregelt. Über den Systembehälter werden ebenfalls sensorisch die Systemparameter erfasst und diese durch eine digitale Anzeige dargestellt. Eine Magnetgekuppelte Kreiselpumpe ermöglicht hohe Durchflussraten.[37] Der Photobioreaktor ist in Abb. 16 dargestellt.



Abb. 16: Labor Rohrreaktor xCUBIO der Firma BBI Biotech GmbH [37]

Der LS28 ist eine Plattenreaktor der Firma Subitec GmbH mit einem Kultivierungsvolumen von 28 Litern. Er besteht aus einem Plattenförmigen Lichtkollektor, welcher einseitig mit einer dimmbaren LED-Einheit bestrahlt wird. Die LED-Einheit liefert eine maximale Photonenflussdichte von  $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bei einer Leistung von 500W. Über eine Bestrahlungsfläche von  $900 \cdot 1300 \text{ mm}$  ist ein Lichtspektrum von 400-700 nm verfügbar. Der Plattenreaktor ist mit einer Belüftungsmembran und einer Probenentnahmeeinheit ausgestattet. Eine Begasung der Algensuspension erfolgt über Umgebungsluft, welche mit reinem Kohlenstoffdioxid angereichert wird, und ist über Druckregler einstellbar. Zudem besitzt der Laborstand eine Temperaturkontrolle zur Einhaltung der Kultivierungsbedingungen. Eine Überwachung der Systemparameter

erfolgt durch eine Temperatursonde und eine pH-Sonde. Die aufgenommenen Systemparameter werden gespeichert und über ein Touchdisplay dem Anwender dargestellt. Der Laborstand ist in Kultivierungsvolumen von 6-, 28- und 180-Litern verfügbar und in Abb. 17 dargestellt.[32]



Abb. 17: Plattenreaktor der Firma Subitec GmbH[32]

In Rührreaktoren wird die Algensuspension durch ein mechanisch angetriebenes Rührwerk durchmischt und die eingetragene Rührleistung dissipiert vollständig in Wärme. Dabei ist eine wesentliche Herausforderung die homogene Durchmischung der Algensuspension. Einen Einfluss auf das Durchmischungsverhalten hat die Form und Anordnung der Rührblätter, sowie das Verwenden von Strömungsstörern in der Reaktorkammer. Rührreaktoren werden im Zulaufverfahren betrieben, wobei ein Teilvolumen mit einer Startkultur und Nährlösung befüllt wird. Mit zunehmender Biomassekonzentration wird unter weiterer Nährstoffzugabe auf das Endvolumen aufgefüllt. Eine Kultivierung im Satzverfahren oder im kontinuierlichen Prozess bilden die Ausnahme.[5]

Der in Abb. 18 dargestellte Algaemaster 10 control, der Firma IKA – Werke GmbH & Co. KG, ist ein Labor-Rührreaktor. Er besteht aus einem Doppelwandigen Reaktorgefäß mit einem Kultivierungsvolumen von 10 Litern. Die Bestrahlung der Algensuspension erfolgt durch außenstehende LED-Leuchtpanels, welche an der Bodenplatte fixiert werden. Die Anzahl der LED-Panels ist dabei zwischen 1-4 erweiterbar. Im Deckel des Reaktors befinden sich Messfühlerdurchführungen, sowie Anschlussbuchsen zur Einbringung von Kulturmedien. Das Rührwerk ist in einem Drehzahlbereich zwischen 10 und 100 U/min einstellbar und die Rührblätter höhenverstellbar. Zur Überwachung der Systemparameter sind eine Temperatursonde (PT-100) und eine pH-Sonde verbaut. Eine Ausgabe bzw. Einstellung der Systemparameter ist über eine Steuereinheit mit Datenausgabe an zwei Anzeigedisplays möglich. Die Zugabe von Nährlösung und Stellmittel ist über zwei Schlauchpumpen zuzuführen. Eine Begasung der

Algensuspension erfolgt über zwei Gas-Durchflussmesser. Zur Entnahme der Messdaten stehen eine USB und eine RS232 Schnittstelle zur Verfügung.[15]



Abb. 18: Rührreaktor der Firma IKA – Werke GmbH & Co. KG[15]

## 4.2 Auswahl Reaktortyp für den Laborstand

Die Anschaffungskosten der verfügbaren Bioreaktoren überschreiten die Anforderungen um ein Vielfaches und werden in der Auswahl nicht berücksichtigt. Eine Auswahl des Photobioreaktor-Typs für den Versuchsstand, wird über eine Nutzwertanalyse nach VDI 2225 Blatt 3 getroffen. Grundlage der Nutzwertanalyse bilden die im Abschnitt 3.2 gewichteten Bewertungskriterien.

Die Bewertung erfolgt über eine Punktevergabe der einzelnen Bewertungskriterien von null bis vier. In Tabelle 7 sind die Definitionen der Punkte aufgeführt.

Punkte	Definition
4	ausgezeichnet
3	gut
2	durchschnittlich
1	schlecht
0	untragbar

Tabelle 7: Punkte Definition für die Nutzwertanalyse

Die Summe der in Tabelle 8 dargestellten Nutzwertanalyse ergibt sich, aus dem Gewichtungsfaktor des Bewertungskriteriums und der vergebene Punkteanzahl.



Nr.	Bewertungskriterien	Gewichtungs- faktor	Bewertung Plattenreaktor		Bewertung Rohrreaktor	
01	Wartungsaufwand	0,3	3	0,9	2	0,6
02	Plastizität	0,4	4	1,6	3	1,2
03	Photo Conversion Efficiency	0,1	2	0,2	3	0,3
04	Volumetrischer Leistungseintrag	0,1	3	0,3	2	0,2
05	Volumetrische Produktivität	0,1	2	0,2	3	0,3
	Summe			<b>3,2</b>		<b>2,6</b>

*Tabelle 8: Nutzwertanalyse der Photobioreaktor-Typen für den Laborstand*

Der Plattenreaktor ist der am besten geeignete Photobioreaktor-Typ für den Laborstand. Dies äußert sich durch eine höhere Bewertung in Wartungsaufwand und Plastizität, welcher die höchste Gewichtung zugesprochen wurde. Durch die Plattenform des Reaktors ist die Begasung der Algensuspension sichtbar und das Strömungsverhalten ist zu erkennen. Weitere Anlagenkomponenten sind ebenfalls direkt im Plattenreaktor verbaut. Bei Rohrreaktoren findet eine Abtrennung zwischen bestrahltem Lichtkollektor und Reaktionsbecken statt, wodurch der Prozess uneinsichtiger ist.

## 5 Mikroalgenarten und Nährstoffe

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, gibt es eine Vielzahl verschiedener Algenarten, welche für die Kultivierung zur Auswahl stehen. Aus den Anforderungen des Laborstandes reduziert sich die Auswahl auf widerstandsfähige Algenarten mit einer hohen Wachstumsrate zur Kultivierung im Satzverfahren bzw. Zulaufverfahren. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Verfügbarkeit von Startkulturen. In der Industrie verwendete Algenkulturen werden durch Kreuzen verschiedener Algenarten über mehrere Versuchsreihen anwendungsbezogen gezüchtet und stehen nicht zur Verfügung. Hauptunterschiede liegen dabei in der Zusammensetzung der Algenzellen, hinsichtlich Proteine, Kohlenhydrate und Lipidanteile. Nachfolgend werden verfügbare Algenarten vorgestellt und auf ihr Anwendungsfeld eingegangen. Eine Auswahl der Nährlösungszusammensetzung wird vorgestellt und geeignete Kaufoptionen dargelegt.

### 5.1 Auswahl Algenart für den Laborstand

Bei den verfügbaren Algenkulturen handelt es sich meist um Algenarten, die im Bereich der Nahrungsmittelindustrie oder Verbesserung der Wasserqualität von Aquarien zum Einsatz kommen. Hierfür stehen die Algen hauptsächlich in Getrockneter oder bereits Weiterverarbeiteter Form, in Kapseln und Pulvern zur Verfügung. Die Verfügbarkeit von lebenden Kulturen ist stark limitiert, weil Firmen ihre erforschten Algenkreuzungen nicht zur Verfügung stellen.

Für den Versuchsstand werden die Algenarten *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus spinosus* empfohlen. Die Kultivierung der Grünalgen in Süßwasser erleichtert die Anwendung im Labor. In Abb. 19 sind die Algenarten unter einem Mikroskop betrachtet dargestellt und die energetisch relevanten Inhaltsstoffe aufgeführt.

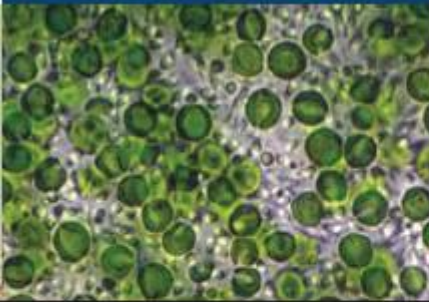
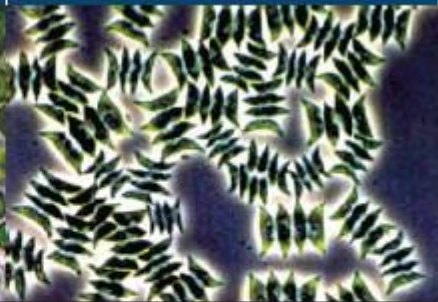
CHLORELLA	SCENEDESMUS
	
51-58 % Protein	8-12 % Protein
12-17 % Kohlenhydrate	21-32 % Kohlenhydrate
14-25 % Lipide	16-40 % Lipide

Abb. 19: Aufbau und Inhaltsstoffe *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus spinosus*[3]

Die *Chlorella vulgaris* Algenzellen zeichnen sich durch ihre Kugelform aus. Sie besitzen einen hohen Proteingehalt und mittlere Lipidanteile, wodurch diese für die Nahrungsmittel und Aminosäuren Gewinnung interessant ist. Durch eine stickstoffarme Kultivierung unter Phosphatlimitierung ist der Lipidanteil von *Chlorella vulgaris* zu erhöhen.[27] Die *Scenedesmus spinosus* Algenzellen setzen sich zu einem flachen Verband zusammen und besitzen einen hohen Lipid- und Kohlenhydrate-Anteil. Weiterhin besitzen diese keine Geißeln wodurch der Flashlight-Effect reduziert wird. Das Wachstumsverhalten ist in Laborversuchen zu untersuchen.[7]



Bei den empfohlenen Algenkulturen der Firma Planktino handelt es sich um Lebendkulturen. Diese werden innerhalb Deutschlands verschickt, wodurch das Risiko eines „Absterbens“ auf dem Transportweg minimiert wird. In Tabelle 9 sind technische Daten und die Produktangaben zusammengefasst.

Beschreibung	Chlorella vul.	Scenedesmus sp.	Einheit
Kosten	16,99	17,99	€
Kultur Volumen	1000	1000	ml
Zellgröße	2-8	10-15	µm
Lagerungstemperatur	4 - 6	4 - 6	°C
Haltbarkeit	4 - 6	4 - 6	Wochen

Tabelle 9: Technische Daten der ausgewählten Algenkulturen [30][28]

Herstellerbedingt gibt es keine Angaben über die verwendete „Start“-Kulturmenge, bezogen auf das Anlagenvolumen des Photobioreaktors. Das Mischverhältnis zwischen „Start“-Kulturmenge und Wasser-/Nährstoffgemisch ist im Labor experimentell zu bestimmen.

## 5.2 Nährlösung

Für die Nährstoffversorgung von Mikroalgen gibt es keine fertigen Rezepte. Die Zugabe von Nährstoffen ist Algenarten abhängig und ergibt sich aus dem Stoffwechsel, während der Photosynthese. Weitere Einflussfaktoren sind Bestrahlungsstärke und Kohlestoffdioxid Eintrag, sowie Kultivierungstemperatur.

In einer Versuchsreihe der Universität Hamburg wurde das Wachstumsverhalten von Scenedesmus obliquus und Chlorella vulgaris untersucht. Bei der Scenedesmus obliquus handelt es sich um eine artverwandte Mikroalge der Scenedesmus spinosus. Diese wurden mit einer Nährstoffzusammensetzung aus Flory Basisdünger 1 und Zugabe von Kaliumnitrat ( $KNO_3$ ) kultiviert. Der Flory Basisdünger setzt sich aus 14 % Phosphorpentoxid ( $P_2O_5$ ), 38 % Kaliumoxid ( $K_2O$ ) und 5 % Magnesiumoxid ( $MgO$ ) zusammen. Dabei wurden 2 g/l Flory Basisdünger 1 und 3,22 g/l Kaliumnitrat dem Kulturmedium beigemischt. In Laborversuchen ist die Nährstoffzusammensetzung, in Bezug auf das Wachstumsverhalten, zu untersuchen und ist für den Laborstand zu optimieren.[8]

Alternativ ist der fertig gemischte Phytoplanktondünger der Firma Planktion, für die Kultivierung von Mikroalgen zu verwenden. Diese bestehen aus einer allgemeinen Nährstoffzusammensetzung für Meeresalgen und basiert auf der Rezeptur Guillard f/2. Bestandteile des f/2 Düngers sind 75 g/l Natriumnitrat ( $NaNO_3$ ), 5 g/l Natriumdihydrogenphosphat ( $NaH_2PO_4$ ) und 30 g/l Natriumsilicate ( $Na_2SiO_3$ ), welche mit 950 ml destilliertem Wasser vermischt werden. Die Dosierempfehlung von Firma Planktion liegt bei 1 ml Dünger pro Liter Kulturmedium. Für 9,20 Euro sind 250 ml des Düngers erhältlich.[29][17]

## 6 Auswahl von Systemkomponenten

In diesem Abschnitt werden die Systemkomponenten für einen Airlift – Plattenreaktor beschrieben und ausgewählt. Grundlage für die Auswahl und Berechnung der Systemkomponenten ist das in Abb. 20 dargestellte Modell des Airlift – Plattenreaktor.

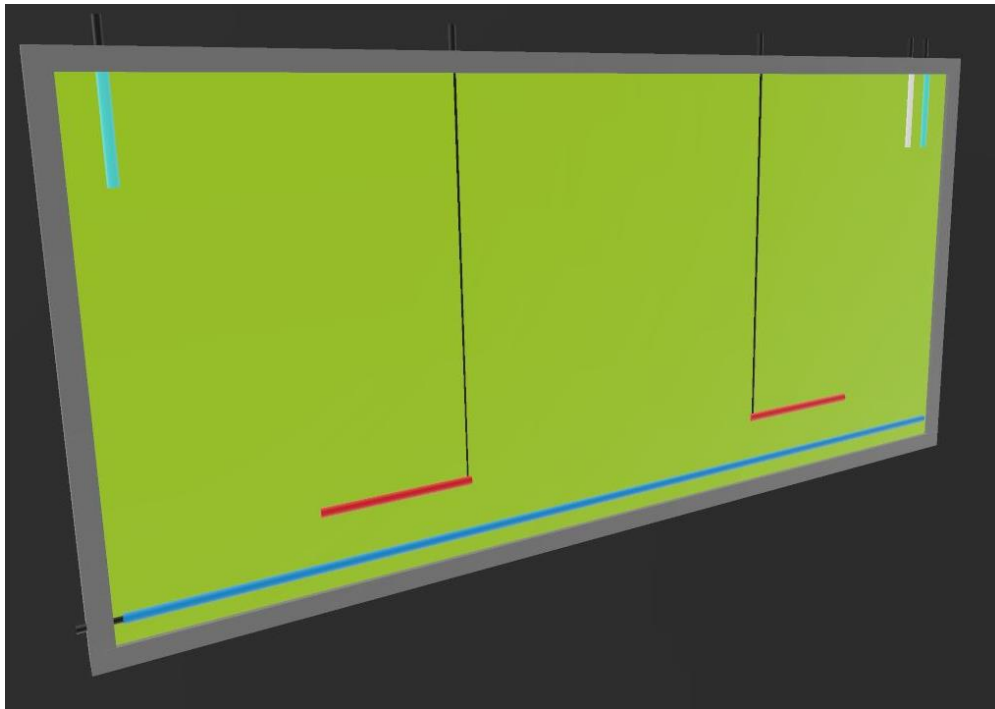


Abb. 20: Modell eines Plattenreaktors für die Bestimmung der Anlagenkomponenten

Die Hülle des Plattenreaktormodells besteht aus transparentem Polymethylmethacrylat (PMMA, Acrylglas) mit einer Wanddicke von 3 mm und ist nach oben geöffnet. Der Plattenreaktor besitzt eine 1000 · 500 mm großen Bestrahlungsfläche mit einer schichtdicke von 30 mm, wodurch sich ein maximal mögliches Füllvolumen von 15 Litern ergibt. Für eine bessere Stabilität der PMMA-Hülle, ist diese mit einem grau dargestellten U-Profil eingefasst. Der Deckel des U-Profils ist mit Durchführungen für Messinstrumente, Spannungsversorgung und Entgasungsöffnungen versehen, sowie einer Probenentnahmestelle. Über die Probenentnahmestelle ist ebenfalls die pH-Wert-Regulierung durch alkalische Stoffzufuhr einzustellen. Die dunkelblau dargestellte Begasungslanze ermöglicht eine Kohlenstoffdioxid Versorgung der Algensuspension über die gesamte Plattenreaktorlänge, durch ihre bodennahe Installation wird die Durchmischung begünstigt. Für eine gleichmäßige Systemtemperatur sind zwei rot dargestellte Heizelemente oberhalb der Begasungslanze vorgesehen, um die Wärmeverluste über den Betrieb auszugleichen und die Systemtemperatur herzustellen. Eine Überwachung der Systemtemperatur erfolgt über zwei Temperatursensoren, in hellblau dargestellt. Die Erfassung des pH-Wertes erfolgt über eine hellgrau dargestellte pH-Elektrode, welche am U-Profil befestigt ist. Weiterhin sind Kabelführungen sowie Positionshalter in schwarz dargestellt. Die Ernte der Algensuspension ist über Ablassventile auf der Außenseite des Plattenreaktors durchzuführen, welche in diesem Modell nicht dargestellt sind.

## 6.1 Anlagenschema

In Abb. 21 ist das Anlagenschema des zuvor beschriebenen Plattenreaktor-Modells dargestellt.

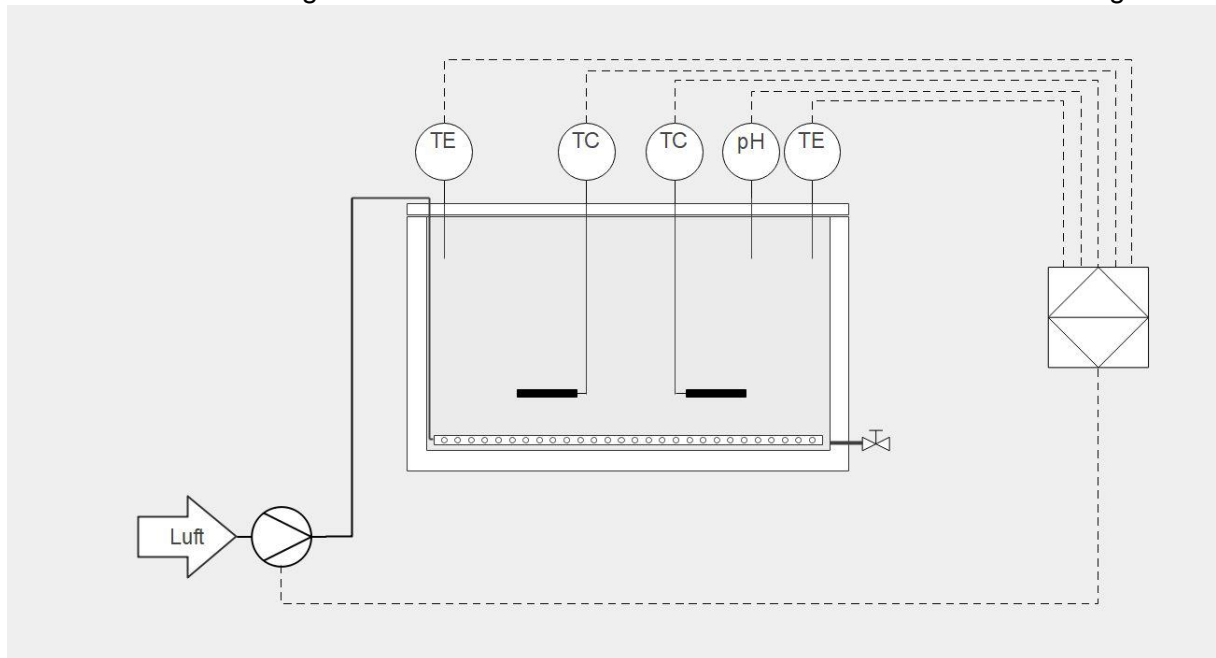


Abb. 21: Anlagenschema des Plattenreaktor-Modells

## 6.2 Auswahl Strahlenquelle

Für die Bestrahlung der Reaktoroberfläche wird eine röhrenförmige LED (Light Emitting Diode, Lichtdiode) der Firma Bioledex verwendet. Die röhrenförmigen Leuchtmittel werden über eine Hilfskonstruktion auf der Rückseite des Plattenreaktors horizontal installiert. Eine Auswahl relevanter technischer Daten ist in Tabelle 10 dargestellt, weitere Anlagendaten sind dem Datenblatt aus dem Anhang zu entnehmen.[18] Die Auswahl des Leuchtmittels ist aufgrund der Anforderungen des Laborstandes erfolgt. Dabei ist die geringe Abweichung des Lichtspektrums im unteren Bereich zu vernachlässigen. Eine Bestrahlung im optimalen Arbeitspunkt bei  $250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  ist in der untenstehenden Berechnung nachgewiesen. Durch eine Veränderung der Leuchtmittelanzahl, sowie des Bestrahlungsabstandes ist der PPFD-Einfluss auf das Algenwachstum zu untersuchen.

Technische Daten	Wert	Einheit
Kosten	22,90	€ / Stück
Länge	900	mm
Durchmesser	29	mm
Lichtspektrum	410 - 710	nm
Abstrahlwinkel	160	°
Leistung	12	Watt
Lichtstrom	1100	lm
Schutzart	IP65	
Spannungsversorgung	220-240	Volt

Tabelle 10: Technische Daten des verwendeten Leuchtmittels Firma Bioledex

Nachfolgend eine überschlägige Berechnung der auf die Algensuspension wirkenden Photonflussdichte.

Die bestrahlte Reaktoroberfläche einer Lampe ( $l_{Lampe} = 0,9m$ ) lässt sich über die Winkelfunktion berechnen. Aus dem Einstrahlwinkel ( $\alpha = 160^\circ$ ) und dem gewählten Bestrahlungsabstand ( $h_{Lampe} = 0,018 m$ ), sowie der Bestrahlungslänge ( $b_{bestrahlt}$ ) resultiert diese zu:

$$A = 2 \cdot b_{bestrahlt} \cdot l_{Lampe} \quad (3)$$

$$b_{bestrahlt} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h_{Lampe} \quad (4)$$

$$A_{bestrahlt} = 2 \cdot \tan\left(\frac{160^\circ}{2}\right) \cdot 0,018 m \cdot 0,9 m \quad (5)$$

$$A_{bestrahlt} = 0,1837 m^2 \quad (6)$$

Die Strahlungsintensität ( $I_A$ ) ergibt sich aus der Strahlungsleistung ( $P_{Lampe} = 12 W$ ) der Lampe und der bestrahlten Oberfläche zu:

$$I_A = \frac{P_{Lampe}}{A_{bestrahlt}} \quad (7)$$

$$I_A = \frac{12 W}{0,1837 m^2} = 65,3063 W \cdot m^{-2} \quad (8)$$

Die Photonenenergie ( $E$  in Joule) wird über die Einstein'sche Gleichung nachfolgend bestimmt und vereinfacht über die Mittelwertbildung des Strahlungsspektrums einbezogen. Nach Einstein ergibt sich die Photonenenergie aus Multiplikation der Lichtgeschwindigkeit ( $c = 2,998 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ ) mit dem Planck'schen Wirkungsquantum ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ ) und Division der Bestrahlten Wellenlänge ( $\lambda$ ).[42]

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (9)$$

$$E_{410} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s \cdot 2,998 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}}{410 \cdot 10^{-9} m} \quad (10)$$

$$E_{410} = 4,8480 \cdot 10^{-19} J \quad (11)$$

Analog dazu:

$$E_{710} = 2,7795 \cdot 10^{-19} J \quad (12)$$

Mittelwertbildung für zu:

$$E_{mittel} = \frac{E_{710} + E_{410}}{2} \quad (13)$$

$$E_{mittel} = 3,8238 \cdot 10^{-19} J \quad (14)$$

Die Photonenanzahl pro Sekunde bezogen auf die Oberfläche ergibt sich aus:

$$N_P = \frac{n}{\Delta t \cdot A} = \frac{I_A}{E_{mittel}} \quad (15)$$

$$N_P = \frac{65,3063 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{3,8238 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \quad (16)$$

$$N_P = 1,7078 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17)$$

Der Photonenflussdichte ( $E_{Pf\ mittel}^*$ ) auf der Oberfläche ergibt sich durch Einbeziehen der Avogadro Konstanten ( $N_A = 6,0221 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )[42] zu:

$$E_{Pf\ mittel}^* = \frac{N_P}{N_A} \quad (18)$$

$$E_{Pf\ mittel}^* = \frac{1,7078 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}{6,0221 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \quad (19)$$

$$E_{Pf\ mittel}^* = 2,8358 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (20)$$

Umgerechnet in  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ergibt sich eine gemittelte Photonenflussdichte von:

$$E_{Pf\ mittel}^* = 283,58 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (21)$$

Unter Berücksichtigung der Transmissionsverluste von PMMA ( $\tau_{PMMA} = 0,92$ )[26] ergibt sich[42]:

$$E_{Pf\ mittel} = \tau_{PMMA} \cdot E_{Pf\ mittel}^* \quad (22)$$

$$E_{Pf\ mittel} = 0,92 \cdot 283,58 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (23)$$

$$E_{Pf\ mittel} = 260,8936 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (24)$$

Somit ergibt sich eine mittlere PPFd von ca. 260  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  welche von der ausgewählten Strahlungsquelle bei einem Abstand von 18 mm auf die Algensuspension wirkt. Diese kann durch den Bestrahlungsabstand variiert werden und ist in Abb. 22 dargestellt. Über die von einem Leuchtmittel einseitig angestrahlte Reaktorfläche ( $500\text{mm} \cdot 1000\text{mm}$ ) und dem Einstrahlwinkel ergibt sich die benötigte Leuchtmittelanzahl. Für Bestrahlungsabstände von 20 – 15 mm werden 3, für Bestrahlungsabstände von 14 – 12 mm 4 und für Bestrahlungsabstände zwischen 11 – 10 mm 5 Leuchtmittel benötigt. Das Verhältnis zwischen Bestrahlungsabstand und Photonenflussdichte ist in Abb. 22 dargestellt, die zugehörige Wertetabelle befindet sich im Anhang.

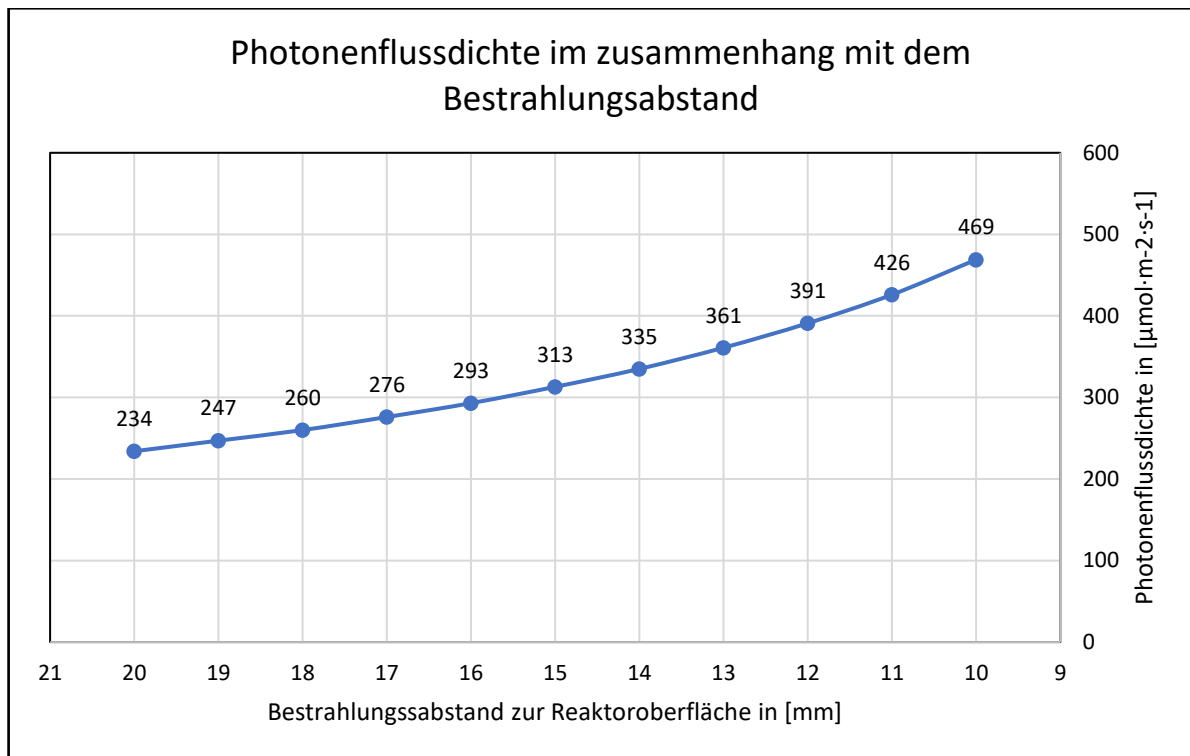


Abb. 22: Photonenflussdichte im Zusammenhang mit dem Bestrahlungsabstand

Zur Überprüfung der errechneten PPFd sind Messungen mit einem PAR – Sensor auf der Reaktoroberfläche notwendig. Die Verteilung der auftreffenden Photonen ist über die Fläche nicht gleichmäßig. Die PPFd ist axial zur Strahlenquelle am höchsten und reduziert sich in den Randbereichen der angestrahlten Fläche.

### 6.3 Auswahl Wärmequelle

Grundlage für die Auswahl einer Wärmequelle für den Laborstand ist die Berechnung der Wärmeverluste. Die Wärmeverluste werden dabei anhand des zuvor beschriebenen Plattenreaktormodells bestimmt. Ein Wärmeeintrag durch den Stoffwechsel der Mikroalgen ist dabei zu vernachlässigen, da dieser mit der Biomassekonzentration ansteigt und in der Anlaufphase keinen Einfluss hat. Der Wärmeeintrag durch das Leuchtmittel ist aufgrund von nicht permanenter Einschaltzeiten ebenfalls zu vernachlässigen. In Tabelle 11 sind die Abmessungen und die Anzahl der Heizelemente aufgeführt.

Technische Daten	Wert	Einheit
Länge $l$	1000	mm
Höhe $h$	500	mm
Breite $b$	30	mm
Material Stärke $t$	3	mm
Heizelemente	2	Stück

Tabelle 11: Technische Daten des Plattenreaktormodells

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik findet eine Wärmeübertragung von einem Körper höherer zu einem Körper niedriger Temperatur statt. Die Wärmeübertragung über die Systemgrenze wird als Wärmeverlust bezeichnet.[39] Die Wärmeübertragung ist dabei in drei Übertragungsarten Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmekonvektion, zu unterscheiden. Die Wärmeleitung beschreibt den Transport von Wärme durch Diffusion in Festkörpern oder Fluiden. Ein Austausch von Wärme durch elektromagnetische Strahlung wird als

Wärmestrahlung bezeichnet. Die konvektive Wärmeleitung beschreibt den Transport von Masse, Impuls und die in strömenden Flüssigkeiten transportierte Energie. Konvektive Wärmeleitung ist dabei in erzwungene und freie Konvektion zu unterscheiden.[40]

Die Oberfläche des rechteckigen Plattenreaktors setzt sich aus der Front und der Rückwandung, sowie den beiden Außenwänden und dem Reaktorboden zusammen. Für die Berechnung der Wärmeverluste wird von einem geschlossenen Plattenreaktor ausgegangen mit einem Deckel, der dieselben Abmessungen wie der Boden hat. Für die weiteren Berechnungen wird von einem vollständig gefülltem Plattenreaktor ausgegangen, unter Vernachlässigung des U-Profil Rahmen. Die Oberfläche des Plattenreaktors berechnet sich wie folgt:

$$A_{Front} = l \cdot h \quad (25)$$

$$A_{Seite} = h \cdot b \quad (26)$$

$$A_{Boden} = l \cdot b \quad (27)$$

$$A_{Ges} = 2 \cdot A_{Front} + 2 \cdot A_{Seite} + 2 \cdot A_{Boden} \quad (28)$$

$$A_{Ges} = 2 \cdot 1m \cdot 0,5m + 2 \cdot 0,5m \cdot 0,3m + 2 \cdot 1m \cdot 0,3m \quad (29)$$

$$A_{Ges} = 1,9 \text{ m}^2 \quad (30)$$

Für die nachfolgende Berechnung der Wärmeverluste wird das System im stationären Fall betrachtet, es gibt keine zeitlich abhängige Zustandsänderung. Dem folgend ist der Wärmeübergangskoeffizient Luft ( $\alpha_L$ ) für den konvektiven Wärmeübergang auf der ebenen Reaktorwand berechnet[41]:

$$\alpha_L = \frac{Nu \cdot \lambda_{Luft}}{l} \quad (31)$$

Über die dimensionslose Grashof-Zahl ( $Gr$ ) wird die Auftriebsströmung im Erdschwerefeld ( $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) berücksichtigt. Mithilfe des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $\beta$ ) idealer Gase und der charakteristischen Länge ( $l = 1m$ ) des Plattenreaktors, lässt sich diese über den Temperaturunterschied ( $T_{Wasser} = 303,15 \text{ K}$ ;  $T_U = 293,15 \text{ K}$ ) und die kinematische Viskosität der Luft ( $\nu = 153,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) bei Umgebungstemperatur mit folgender Formel errechnet:[41]

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{Wasser} - T_U) \cdot l^3}{\nu^2} \quad (32)$$

Mit:

$$\beta = \frac{1}{T_U} = \frac{1}{293,15 \text{ K}} = 3,4112 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \quad (33)$$

Zu:

$$Gr = \frac{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 3,4112 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot (303,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}) \cdot (1 \text{ m})^3}{(153,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})^2} \quad (34)$$

$$Gr = 1,4237 \cdot 10^9 \quad (35)$$

Über die Prandtl-Zahl ( $Pr$ ) lässt sich das Verhältnis zwischen kinematischer Viskosität und der Temperaturleitfähigkeit ( $a = 214,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) der Umgebungsluft wie folgt darstellen[41]:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (36)$$

$$Pr = \frac{153,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}{214,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (37)$$

$$Pr = 0,7140 \quad (38)$$

Das Strömungsverhalten lässt sich wie folgt ermitteln[41]:

$$Gr \cdot Pr = 1,4237 \cdot 10^9 \cdot 0,7140 \quad (39)$$

$$Gr \cdot Pr = 1,0165 \cdot 10^9 \quad (40)$$

Für  $Gr \cdot Pr < 4 \cdot 10^9$  ergibt sich ein laminares Strömungsverhalten, somit ermittelt sich die Nusselt-Zahl ( $Nu_L$ ) zur Beschreibung des Wärmeübergangs zwischen fester Reaktorfläche und der strömenden Luft auf der Oberfläche aus[41]:

$$Nu_L = C \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (41)$$

mit der durch Interpolation ermittelten Konstanten  $C = 0,516$  zu:

$$Nu_L = 0,516 \cdot (1,4237 \cdot 10^9 \cdot 0,7140)^{0,25} \quad (42)$$

$$Nu_L = 92,1358 \quad (43)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient der laminar überströmten Reaktoroberfläche ergibt sich mithilfe der Wärmeleitfähigkeit von Luft ( $\lambda_{Luft} = 0,02569 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) bei Umgebungstemperatur zu[41]:

$$\alpha_L = \frac{92,1358 \cdot 0,02569 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{1 \text{ m}} \quad (44)$$

$$\alpha_L = 2,3669 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (45)$$

Der Wärmestrom ( $\dot{Q}_V$ ) durch die Reaktorwand lässt sich wie folgt bestimmen:[41]

$$\dot{Q}_V = k \cdot A_{Ges} \cdot (T_{Wasser} - T_U) \quad (46)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient ( $k$ ) ermittelt sich über den Wärmeübergangskoeffizienten des ruhenden Wassers ( $\alpha_W = 450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )[36], der Reaktorwanddicke und dessen Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_s = 0,184 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), sowie des errechneten Wärmeübergangskoeffizienten der Umgebungsluft zu[41]:



$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_W} + \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\lambda_S} + \frac{1}{\alpha_L} \quad (47)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_W} + \frac{t}{\lambda_{PMMA}} + \frac{1}{\alpha_L} \quad (48)$$

$$k = \left( \frac{1}{450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,003 \text{ m}}{0,184 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{1}{2,3669 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} \right)^{-1} \quad (49)$$

$$k = 2,2674 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (50)$$

Eingesetzt in:

$$\dot{Q}_V = 2,2674 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1,9 \text{ m}^2 \cdot (303,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}) \quad (51)$$

Ergibt einen Wärmestrom von:

$$\dot{Q}_V = 43,0806 \text{ W} \quad (52)$$

Die Wärmeverluste ( $\dot{Q}_{fK}$ ) durch frei Konvektion errechnen sich ausfolgendem formellen Zusammenhang:[41]

$$\dot{Q}_{fK} = \alpha_L \cdot A_{Ges} \cdot (T_{Wasser} - T_U) \quad (53)$$

$$\dot{Q}_{fK} = 2,3669 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1,9 \text{ m}^2 \cdot (303,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}) \quad (54)$$

$$\dot{Q}_{fK} = 44,9711 \text{ W} \quad (55)$$

Die Wärmeverluste durch Strahlung werden über die Stefan-Boltzmann Konstanten ( $\sigma_S = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) unter Berücksichtigung des Transmissionsverhaltes des Wandmaterials ( $\tau_{PMMA} = 0,92$ )[26], sowie des Emissionsgrads von Wasser ( $\varepsilon_{Wasser} = 0,95$ ) errechnet. Dabei wird die Reaktor Umgebung als grauer Körper angesehen und der Strahlungsaustausch wie folgt errechnet[41]:

$$\dot{Q}_{str} = \tau_{PMMA} \cdot \varepsilon_{Wasser} \cdot \sigma_S \cdot A_{Ges} \cdot (T_{Wasser}^4 - T_U^4) \quad (56)$$

$$\dot{Q}_{str} = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot 1,9 \text{ m}^2 \cdot (303,15^4 \text{ K} - 293,15^4 \text{ K}) \quad (57)$$

$$\dot{Q}_{str} = 99,8469 \text{ W} \quad (58)$$

Die gesamten Wärmeverluste setzen sich aus der Konvektion auf der Oberfläche und der Wärmestrahlung zusammen:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{fK} + \dot{Q}_{str} \quad (59)$$

$$\dot{Q}_{ges} = 44,9711 \text{ W} + 99,8469 \text{ W} \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{ges} = 144,8180 \text{ W} \quad (61)$$

Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors bei der Auslegung von 1,3 ergibt sich ein Wärmeverlust von 188,25 Watt. Bei Verwendung von zwei Heizelementen ergibt sich eine benötigte Heizleistung von 94,13 Watt.

Für die Überwindung der Wärmeverluste und dem Erwärmen der Algensuspension werden zwei Titanummantelte Heizelemente der Firma Schego verwendet. Die zylindrischen Heizelemente haben eine Einzelleistung von 100W und decken somit den Wärmeverlust des Plattenreaktors ab. Ein verbauter PTC-Widerstand (Kaltleiter) schützt das Heizelement vor Überhitzen, bei zu großen Wärmegradienten. Eine Schutzklasse von IP68 ermöglicht eine dauerhafte Montage der Heizelemente in der Reaktorkammer. Dazu sind die Heizelemente mit der mitgelieferten Hilfskonstruktion (Saugnäpfe) an der Reaktorwandung zu fixieren. In Tabelle 12 sind die technischen Daten des Heizelementes dargestellt, weitere Angaben sind dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Technische Daten	Wert	Einheit
Bezeichnung	PTC-Heizer/Titanrohr	
Kosten	93,20	€ / Stück
Länge $l$	250	mm
Durchmesser	12	mm
Leistung	100	Watt
Spannungsversorgung	230	Volt
Schutzklasse	IP 68	

Tabelle 12: Technische Daten Heizelement der Firma Schego [33]

#### 6.4 Auswahl einer Pumpe zur Begasung

Aus den Anforderungen des Laborstandes ergibt sich eine Begasungsrate von 0,1 bis 0,2 Liter Gas pro Liter Anlagenvolumen in der Minute. Bezogen auf das Anlagenvolumen des Plattenreaktormodells ergibt sich ein Volumenstrom von 90 bis 180 Liter pro Stunde. Der durch Umgebungsluft dem System zuzuführen wird.

Die benötigte Begasungsrate ist durch die Membranen-Pumpe EHEIM air200 der Firma EHEIM GmbH & Co. KG zu gewährleisten. Eine maximale Förderleistung von 200 Liter pro Stunde ist durch Kopplung der zwei Auslässe zu erreichen. Die Förderleistung der einzelnen Auslässe ist an der Pumpe separat einstellbar. Auf die Überwachung der Förderleistung mit einem Durchflussmesser wird an dieser Stelle verzichtet, da innerhalb einer Recherche kein geeignetes Modell gefunden werden konnte. Durchflussmesser in der geeigneten Größenordnung sind auf flüssige Medien ausgelegt. In der nachfolgenden Tabelle 13 sind die technischen Daten der Membranen-Pumpe dargestellt.

Technische Daten	Wert	Einheit
Bezeichnung	EHEIM air200	
Kosten	35,29	€ / Stück
Förderleistung	200	l/h
Förderhöhe	2	m
Leistung	3,5	Watt
Spannungsversorgung	230	Volt
Schlauch Durchmesser	6	mm
Höhe	150	mm
Breite	92	mm
Tiefe	76	mm

Tabelle 13: Technische Daten Membranen-Pumpe der Firma EHEIM [19][20]

Die Begasung der Algensuspension ist über den Druckschlauch der Membran-Pumpe durchzuführen. Dieser ist am Boden des Plattenreaktors zu befestigen und in gleichbleibenden kurzen Abständen mit Austrittsöffnungen zu versehen. Das Ende des Druckschlauchs ist zu verschließen, um ein gleichmäßiges Strömungsverhalten im Plattenreaktor sicherzustellen. Die Verwendung von alternativen Materialien und Geometrien der Begasungslanze, sowie das Strömungsverhalten beim Austritt sind in nachfolgenden Arbeiten zu untersuchen.

Durch die Verwendung von Luft als Begasungsmedium ergibt sich ein Kohlenstoffdioxid Anteil von 0,0354 % [2], welcher unter dem gewünschten Wert aus den Anforderungen liegt. Bei einer maximalen Begasungsrate von 180 Liter in der Stunde ergibt sich eine Kohlenstoffdioxid ( $\rho=1,8292 \text{ kg/m}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$  [40]) Menge von 0,1165 Gramm in der Stunde. Der benötigte Kohlenstoffdioxidanteil ist dabei von der Biomassekonzentration abhängig und liegt in der Literatur zwischen 5 und 10 %. Ein Anreichern der Umgebungsluft mit reinem Kohlenstoffdioxid ist unter Verwendung von elektronischen Massendurchflussreglern und einem Druckminderer möglich. Die Ausgewählte Membran-Pumpe ist unter diesen Umständen weiter zu verwenden. Durch eine Konzentrationserhöhung des Kohlenstoffdioxids kann es unter Bildung von Kohlensäure zu einer negativen pH-Wert Änderung kommen. Eine entsprechende Zudosierung von Natriumhydroxid (NaOH) hebt den pH-Wert wieder, dabei ist die zudosierte Menge abhängig vom Anlagenvolumen. Eine Anreicherung der Umgebungsluft wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

## 6.5 Ernte der Biomasse

Für die Ernte der Algensuspension ist diese über das bodennahe Ablassventil dem Photobio-reaktor-Modell zu entnehmen. Dabei ist ein Teil der Algensuspension als „Start“-Kultur für nachfolgende Versuchsreihen zu separieren. Anschließend ist die Mikroalgenbiomasse vom Wasser zu trennen. Ein praktikabler Ansatz ist die Verwendung von Filterpapieren mit geeigneter Porengröße. Neben der Filtration ist das Trennen der festen und flüssigen Phase durch Zentrifugen zu untersuchen. Aus der Literatur sind dabei Tellerzentrifugen zu nutzen, welche sehr kostenintensiv sind und meist für hohe Durchsätze ausgelegt sind. Dem entgegen wirkt der geringe Lipidgehalt der *Chlorella vulgaris* Zellen und die Größe der *Scenedesmus spinosus* Zellen. Eine Abtrennung in herkömmlichen, kosten günstigen Zentrifugen, ist zu untersuchen.

Eine anschließende Weiterverwendung der Restfeuchten Mikroalgenbiomasse (Slurry) in Endenergieträger ist durch weitere Laborstände zu untersuchen.

## 6.6 Systemüberwachung

Die Überwachung des Wachstumsverhaltens ist während der Versuchsdurchführung durch regelmäßige Probenentnahmen möglich. Dabei sind die Proben in regelmäßigen Abständen (z.B. Täglich), über eine Probenentnahmestelle im Reaktordeckel, zu entnehmen. Die Auswertung erfolgt über das Trockengewicht der Mikroalgen, unter Berücksichtigung der „Start“-Kultur Masse. Eine Abtrennung der flüssigen Phase ist durch Filtration oder Zentrifugation zu realisieren. Weiterhin ist die Trocknung der Proben in Thermoschränken oder unter Wärmelampen möglich.

Neben der Entnahme von Proben ist die Transmission der Strahlung durch den Reaktor ein Indikator für das Wachstumsverhalten. Mit einem PAR-Sensor ist die Photonenflussdichte, auf der Strahlungsquellen abgewandten Seite, zu messen. Mit steigender Biomassekonzentration nimmt die transmittierte Photonenflussdichte ab und über Vergleichsmessungen ist das Wachstumsverhalten zu dokumentieren.

### 6.6.1 Verwendete Messmittel

Nachfolgend werden die benötigten Messmittel, für den Betrieb des Laborreaktors beschrieben und fest installierte Messmittel ausgewählt.

#### **Elektrische Temperaturmessfühler**

Die elektrische Erfassung von Temperaturen ist durch Widerstandsthermometer und Thermoelemente möglich. Bei Widerstandsthermometern handelt es sich um einen metallischen Körper, welcher mit steigender Temperatur seinen elektrischen Widerstand erhöht. Der metallische Körper besteht in den meisten Fällen aus Platin und ist von einem gasdichten Hüllrohr aus Metall oder Quarz umschlossen. Durch Messen mit einer konstanten Spannung verhält sich der Strom indirekt proportional zur Temperatur. Dabei ist der Widerstand so ausgelegt, dass er bei 0°C einen Wert von ca. 100 Ohm bemisst.

Thermoelemente bestehen aus einem Thermopaar zwei verschiedener Metalle, welche an einem Ende miteinander verschweißt sind. Ein identisches Thermopaar dient als Vergleichsmessstelle und ist unter konstanter Temperatur zu halten. Durch einen Temperaturanstieg an der Messspitze des Thermoelements entsteht eine elektrische Spannung an der Vergleichsmessstelle. Bei Thermoelementen verhält sich die elektrische Spannung proportional zur Temperaturdifferenz. Die verwendeten Metallpaare geben den Messbereich der Thermoelemente an. Unter Laborbedingungen angewendete Metallpaare sind z.B.: Eisen/Konstantan im Messbereich von ca. -100 bis 800 °C und Chrom-Nickel/Nickel von ca. -100 bis 1200°C.[25]

Für den Laborstand wird ein Thermoelement vom Typ-K (Chrom-Nickel/Nickel) empfohlen. In Tabelle 14 sind die technischen Daten des Thermoelements dargestellt. Weitere Informationen sind dem technischen Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Technische Daten	Wert	Einheit
Modell	Fühler-Typ K	
Kosten	65,99	€ / Stück
Messbereich	-200 – 1200	°C
Fühler Länge	100	mm
Spitzendurchmesser	3	mm
Sensor / Thermopaar	NiCr – Ni	

Tabelle 14: Technische Daten Thermoelement der Firma JUMO [23]

## Elektrometrische pH-Messung

Die pH-Messung von wässrigen Lösungen erfolgt mittels kombinierter Glaselektroden, welche eine Einstabmesskette darstellen. Die Glaselektrode besteht dabei aus zwei Rohren, einem innenliegenden Rohr und einem Mantelrohr. Im inneren Rohr befindet sich eine Ableitelektrode, die von einer Puffer-Bezugslösung umgeben ist und einer Glasmembran an der Spitze. Das innere Rohr ist von einem Mantelrohr umgeben, in welchem sich ein Bezugselektroden-system befindet. Das Bezugselektroden-system bildet sich aus einem Silberdraht, Silberchlorid und ist von einer Elektrolytlösung umgeben. Eine Abtrennung zwischen dem inneren Rohr und dem Mantelrohr ist im Bereich der Glasmembran durch ein Diaphragma gewährleistet. Für eine Messung ist die Glaselektrode mit Glasmembran und Diaphragma in die Lösung zu tauchen. Über die Glasmembran gelangen  $H^+$ -Ionen der zu messenden Lösung in die Pufferbezugslösung. Die Glasmembran bildet bei Kontakt mit der Lösung eine unsichtbare Quellschicht, durch welche größenbedingt nur für  $H^+$ -Ionen gelangen. Aufgrund der  $H^+$ -Konzentrationsunterscheide entsteht eine elektrische Spannung, welche über das Ableitsystem und die Bezugselektrode an einen Messverstärker geleitet wird. Die Messung von Säuren führt, aufgrund von hohen  $H_3O^+$ -Ionen Konzentrationen, zu einer positiven elektrischen Spannung. Eine Messung von alkalischen Lösungen, aufgrund der geringen  $H_3O^+$ -Ionen Konzentrationen, zu einer negativen elektrischen Spannung. Die abgegebenen Spannungen von Glaselektroden finden im Bereich zwischen +400 und -400 mV statt.[25]

Für den Laborstand wird eine pH-Elektrode der Firma Greisinger empfohlen. In Tabelle 15 sind technische Daten der pH-Elektrode aufgeführt. Weitere Informationen sind dem technischen Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Technische Daten	Wert	Einheit
Modell	G101	
Kosten	129,99	€ / Stück
Messgröße	pH	
Messbereich	0 – 14 0 – 80	pH °C
Spitzendurchmesser	6	mm
Elektrolyt	3	mol/l KCL
Diaphragma	2	Keramik
Anwendungsbereich	Suspensionen u.a.	

Tabelle 15: Technische Daten pH-Elektrode der Firma Greisinger [22]

## PAR-Sensor

Die Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) beschreibt die elektromagnetische Strahlung eines Lichtspektrums, welche von phototropen Organismen bei der Photosynthese benötigt wird. Diese liegt bei Mikroalgen in einem Bereich von 400 – 700 nm. Die Photonenflussdichte (PPFD) beschreibt dabei die Leistung der Photosynthetisch aktiven Strahlung. Diese setzt sich aus der Anzahl der Photonen eines Lichtstrahls bezogen auf die Fläche und Zeiteinheit, multipliziert mit der Energie eines Photons zusammen. Die Photonenflussdichte wird in  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  angegeben. Eine Messung der Photonenflussdichte erfolgt durch Bestrahlen einer definierten Metalloberfläche (Kathode), welche sich in einem Vakuum befindet. Das auftreffende Licht lösen Elektronen aus, welche zu einer Anode gelangen. Aus dem entstehenden Stromfluss wird die Photonenflussdichte ermittelt und vom Messgerät ausgegeben. Die Messsonde ist dabei frei beweglich und ermöglicht Messungen an verschiedenen Positionen.[42]

## 6.6.2 Steuerung und Regelung

Die Ausgabe der Messwerte und Anpassung der Systemparameter erfolgt durch eine Kombination aus einer computergestützten Regelung mit LabVIEW und einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS).

Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist ein Gerät, welches zur Steuerung und Regelung von Anlagenkomponenten eingesetzt wird. Dieses besteht aus einer Zentraleinheit, einem Speicher und Eingabe- und Ausgabeeinheiten. Die Ein- und Ausgabeeinheiten sind dabei modular erweiterbar. Die Programmierung der SPS erfolgt über das Hinterlegen des Programmcodes im Speicher oder über eine direkte Verbindung zu einem separaten Computer. Eine direkte Verbindung mit einem Computer ermöglicht neben der schnellen Programmänderung ebenfalls die digitale Ausgabe der Anlagenparameter.[1] Für den Versuchsstand wird die Programmieroberfläche LabVIEW benutzt, welche sich durch ein Bausteinsystem grafisch programmieren lässt. Über LabVIEW lassen sich Daten und Signale erfassen, analysieren, speichern und darstellen. Das Programm wird dabei in Frontpandel und Blockdiagramm unterteilt. Im Frontpandel sind Bedien- und Anzeigeelemente dargestellt, welche mit Funktionen belegt werden. Das Blockdiagramm beinhaltet Anschlüsse, Funktionen, Konstanten, Strukturen und Verbindungen, die zur Datenverarbeitung dienen. Die Programmierung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.[14]

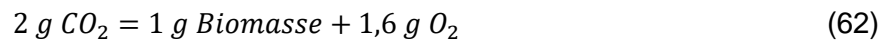
Für das Plattenreaktor Modell werden neben den Anschlüssen der Zentraleinheit, wie Datenschnittstelle und Spannungsversorgung Ein- und Ausgänge für die Anlagenkomponenten benötigt. Die Eingangssignale der Thermoelemente und der p-H Elektrode sind an drei Messverstärkern anzuschließen, welche mit der SPS verbunden sind. Über die SPS werden die 7 Ausgänge für die Heizelemente, die Leuchtmittel und die Begasung einzeln angesteuert. Die Spannungsversorgung der Anlagenkomponenten ist über Schütze mit einer Ausgangsspannung von 230V geschaltet.

## 7 Energie Bilanz und Kosten

In diesem Abschnitt werden die stofflichen und energetischen Bilanzen des Plattenreaktor-Modells dargestellt. Die Bilanzgrößen werden dabei aus der Literatur entnommen oder resultieren aus den technischen Daten der ausgewählten Anlagenteilen.

### 7.1 Stoffliche Bilanz Mikroalge

Aus der Photosynthese Reaktion resultiert eine theoretische Stoffbilanz der Mikroalgen. Unter der Annahme, dass die gesamte Kohlenstoffdioxidmenge von den Mikroalgenzellen aufgenommen wird und unter Vernachlässigung der Nährstoffzufuhr ist die Stoffbilanz in Gleichung (72) dargestellt. [3]



Bei einer kontinuierlichen Begasung mit Raumluft ergibt sich eine theoretische Biomasseproduktion. Der Produktionszeitraum von einer Woche wird nachfolgend betrachtet.

$$168 \text{ h} \cdot 0,1165 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} CO_2 = 9,786 \text{ g Biomasse} + 15,6576 \text{ g } O_2 \quad (63)$$

### 7.2 Energie Bilanz auf Basis der stofflichen Bilanz

Bezogen auf den Energiegehalt der Mikroalgen ergibt sich aus der Stoffbilanz die Energiemenge. Dabei variiert der Energiegehalt abhängig vom Lipidgehalt der Biomasse. Für die nachfolgende Berechnung wird bei Biomasse aus *Chlorella vulgaris* ein Energiegehalt von  $20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  und bei *Scenedesmus spinosus* von  $27 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  angenommen.

*Chlorella vulgaris*:

$$9,786 \text{ g Biomasse} \cdot 20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} = 195,72 \text{ kJ} \quad (64)$$

*Scenedesmus spinosus*:

$$9,786 \text{ g Biomasse} \cdot 27 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} = 264,22 \text{ kJ} \quad (65)$$

Die ermittelte Biomassemenge, aus der Stoffbilanz, ist größer als in der Literatur beschrieben. Die Literatur bezieht sich dabei auf Photobioreaktoren im industriellen Maßstab. Die Biomasseproduktion im Laborreaktor ist durch Versuche zu ermitteln.

Nachfolgend ist die Energiebilanz im konstanten Betrieb mit *Scenedesmus spinosus* dargestellt und eine Systemtemperatur von  $30^\circ\text{C}$  wird angenommen. Der Strahlungseintrag erfolgt über drei Lampen in einem Abstand von 18 mm. Die Prozessenergie ( $E_{eff.}$ ) ergibt sich aus der Summe der Energieeinträge der Beheizung ( $E_{Wärme}$ ), der Beleuchtung ( $E_{Licht}$ ) und der Begasung ( $E_{Begasung}$ ). Diese werden von der Biomasse-Energie ( $E_{Biomasse}$ ) abgezogen. Unter Vernachlässigung der Messtechnik und Übertragungsverlusten ergibt sich die Energiebilanz wie folgt:

$$E_{eff.} = E_{Biomasse} - \sum E_{Anlage} \quad (66)$$

$$E_{eff.} = E_{Biomasse} - (E_{Wärme} + E_{Licht} + E_{Begasung}) \quad (67)$$

bei einer Kultivierungsdauer von einer Woche:

$$\sum E_{Anlage} = (188,25 \text{ W} \cdot 168 \text{ h} + 36 \text{ W} \cdot 168 \text{ h} + 3,5 \text{ W} \cdot 168 \text{ h}) \quad (68)$$

mit:

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} \quad (69)$$

ergibt:

$$E_{eff.} = 264,22 \text{ kJ} - (113853,6 \text{ kJ} + 2116,8 \text{ kJ} + 21772,8 \text{ kJ}) \quad (70)$$

$$E_{eff.} = -137478 \text{ kJ} = -38,19 \text{ kWh} \quad (71)$$

Für Biomasse aus *Chlorella vulgaris* ergibt sich analog ein Energieverlust von 38,21 kWh. Der größte Energieverlust resultiert aus der Wärmeleistung. Eine Kultivierung bei Umgebungstemperatur reduziert den Energieverlust auf 6,56 kWh bzw. 6,51 kWh, weshalb industriell genutzte Bioreaktoren durch solare Bestrahlung oder Prozessabwärme betrieben werden. Der Temperatureinfluss auf das Wachstumsverhalten ist im Labor zu untersuchen.

Der Wirkungsgrad ergibt sich zu:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{264,22 \text{ kJ}}{137743,2 \text{ kJ}} \cdot 100\% \quad (72)$$

$$\eta = 0,19\% \quad (73)$$

Bei Verwendung von *Chlorella vulgaris* ergibt sich analog ein Wirkungsgrad von 0,14%. Die Energieströme sind in Abb. 23 durch ein Sankey-Diagramm dargestellt.

### Energiebilanz von Mikroalgen im Sankey Diagramm

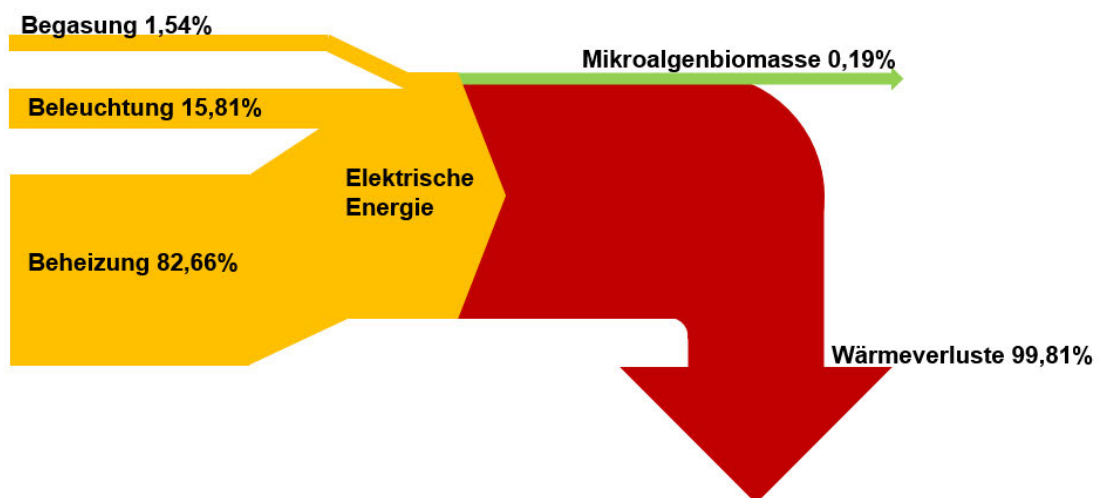


Abb. 23: Energiebilanz bei der Kultivierung von Mikroalgenbiomasse mit einer Systemtemperatur von 30°C und Begasung durch Umgebungsluft



### 7.3 Kosten

Die Kosten der ausgewählten Anlagenkomponenten sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Beschreibung	Anzahl	Kosten
<b>Anschaffungskosten</b>		
Lichtquelle	5	114,50€
Thermoelement	2	186,40 €
Pumpe	1	35,29 €
PAR - Sensor	1	
Temperaturfühler	2	131,98 €
pH -Sensor	1	129,99 €
Summe		598,16 €
<b>Betriebskosten</b>		
Chlorelle vul.	1 Liter	16,99 €
Scenedesmus sp.	1 Liter	17,99 €
Nährstoffe	250 ml	9,20 €
Summe		34,98 €

*Tabelle 16: Zusammenfassung der Anschaffungs- und Betriebskosten*

Für den Bau des Versuchsstandes verbleibt ein Budget von 4401,84 €, welches für weitere Anlagenkomponenten zur Verfügung steht. Die Materialkosten für den Bau des Plattenreaktors, sowie benötigtes Kleinmaterial überschreiten festgelegten Anschaffungskosten nicht. Besonders kostenintensive Bauteile der Steuerungstechnik sind gegeben falls aus außerbetrieb genommenen Laborständen zu übernehmen.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Aufgrund des voranschreitenden Klimawandels steigt der Bedarf an biogenen Energieträgern global. Durch eine Bepreisung des Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes in Deutschland werden wirtschaftliche Anreize geschaffen, regenerative Energiequellen zu nutzen und den Ausstoß durch fossile Brennstoffe zu minimieren. Mikroalgen bieten ein hohes Potenzial für die biogene Brennstoffproduktion und werden seit längerer Zeit erforscht. Herausforderung ist dabei die Energiebilanz beim Kultivieren in Photobioreaktoren. Der zusätzliche Energieeintrag durch Pumpen für die Durchmischung und Zufuhr von Prozessmedien wirkt sich dabei negativ auf die Energiebilanz aus.

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Photobioreaktor für den Laborbetrieb entworfen worden, welcher eine Bilanzierung des Wachstumsprozesses von Mikroalgen ermöglicht. Durch variabel einstellbare Anlagenparameter kann das Wachstumsverhalten bei verschiedenen Kultivierungsbedingungen untersucht werden. Hauptbestandteile der Arbeit sind die Grundlagen der Kultivierung von Mikroalgen zusammenzustellen, verschiedene Laborsysteme zu ermitteln und Anforderungen zu definieren. Eine Identifikation geeigneter käuflicher Anlagenkomponenten, der notwendigen Messtechnik und die Auslegung eines Systems.

Das Mikroalgenwachstum ist von der Algenart abhängig. Grünalgen sind meist einzellige Mikroorganismen, welche sich durch Zellteilung vermehren. Im Prozess der Photosynthese bildet die Algenzelle Glucose aus Wasser, Kohlenstoffdioxid und Strahlungsenergie. Die Glucose dient der Algenzelle als Energieträger zum Wachstum. Während der Photosynthese nimmt die Mikroalgenzelle Nährstoffe (Stickstoffe und Phosphate) auf. Inhaltsstoffe der Algenzelle sind Proteine, Lipide und Kohlehydrate, wobei der prozentuale Anteil von Mikroalgenart und Nährstoffversorgung abhängig ist. Die Proteinanteile sind für die Nahrungsmittelindustrie von großer Bedeutung. Lipid- und Kohlehydratanteile können in Aufbereitungsprozessen zu Ethanol, Biodiesel und Methan weiterverarbeitet werden. Eine Wasserstoffgewinnung als Nebenprodukt der Photosynthese ist bei einigen Algenarten ebenfalls möglich. Die Kultivierung erfolgt in Photobioreaktoren, welche in Airlift-Plattenreaktoren und Rohrreaktoren unterschieden werden. Ziel ist es, durch Oberflächenvergrößerung den Strahlungseintrag zu erhöhen und die Mikroalgen gezielt mit Nährstoffen und Kohlenstoffdioxid zu versorgen. Wesentliche Unterschiede liegen dabei in der Durchmischung der Algensuspension und der Geometrie. Airlift-Plattenreaktoren bestehen aus einem plattenförmigen Kultivierungsraum, in dem die Algenzelle mit Nährstoffen versorgt wird und eine Durchmischung über die Begasung erfolgt. In Rohrreaktoren werden die Mikroalgen in einer Rohrschlange kultiviert, Nährstoff- und Begasungseintrag erfolgt in einem separaten Reaktorraum und die Durchmischung wird durch eine Pumpe erzeugt. Neben den Reaktortypen wird die Kultivierung in drei Verfahren unterschieden. Im Satzverfahren (Batch-Prozess) wird der Reaktor mit einer konstanten Substratmenge befüllt und die Mikroalgen bis zur Ernte kultiviert, eine Substratzugabe über die Kultivierungszeit findet nicht statt. Bei einer Substratzugabe während der Kultivierungszeit wird in das Zulaufverfahren (Fed-Batch-Prozess) unterschieden. Im kontinuierlichen Prozess werden kontinuierlich sämtliche Betriebsmedien zugeführt, bei gleichzeitiger Entnahme von Algensuspension. Der Laborstand ist dabei im Satzverfahren/Zulaufverfahren zu betreiben. Die Prozessbausteine des Satzverfahrens lassen sich dabei in eine Ladephase unter Nährstoffzufuhr und Startkultureintrag, eine Wachstumsphase bei Kohlenstoffdioxid-Versorgung und Bestrahlung, sowie der Ernte der Algensuspension zusammenfassen. Während der Wachstumsphase sind Temperatur und pH-Wert zu überwachen. Nach der Ernte der Algensuspension sind die Mikroalgen von der flüssigen Phase der Suspension zu trennen. Eine Herausforderung ist dabei der geringe Dichteunterschied, welcher bei hohen Lipidanteilen sehr gering ausfällt. Abtrennen durch Filtration und Trocknung sind möglich, eine Trennung durch Zentrifugen ist nur bedingt möglich.

Zur Auswahl von Anlagenkomponenten sind Anforderungen aus den Grundlagen und Laborbedingungen abgeleitet worden. Ein Strahlungseintrag ist durch künstliche Beleuchtung zu realisieren, um den Versuchsstand unabhängig der solaren Strahlung betreiben zu können. Dabei ist eine Photonenflussdichte größer gleich  $250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  auf der Reaktorinnenseite

herzustellen und ist im Photosynthetisch aktivem Spektrum von 400 – 700 nm zu wählen. Die Kohlenstoffdioxidversorgung ist über die Umgebungsluft bei  $0,1 - 0,2 L_{\text{Gas}} / (L_{\text{Medium}} \cdot \text{min})$  zu gewährleisten. Neben anderen Anforderungen ist eine Systemtemperatur zwischen 20 – 30°C einzustellen, um den Temperatureinfluss auf das Wachstumsverhalten untersuchen zu können. Der pH-Wert der Algensuspension ist im Bereich von 7 – 9 zu halten. Der Airlift-Plattenreaktor ist als Photobioreaktor über Bewertungskriterien der Anforderungsliste ausgewählt worden. In einer Marktanalyse sind Laborsysteme verschiedener Hersteller erfasst worden, welche die festgelegten Anschaffungskosten von 5000 € weit übersteigen. Die Grünalgen *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus spinosus* sind für den Laborstand ausgewählt worden. Diese weisen unterschiedliche Inhaltsstoffe auf und ermöglichen einen Vergleich des Wachstumsverhaltens von verschiedenen Algenarten. Die Verfügbarkeit von Algenarten ist ebenfalls stark begrenzt. Für die Nährstoffversorgung ist eine Zusammensetzung auf Basis einer Versuchsreihe der Universität Hamburg, sowie eine fertige Nährstofflösung ermittelt worden.

Eine Auswahl weiterer Systemkomponenten ist über ein erstelltes Airlift-Plattenreaktor-Modell erfolgt. Das Modell berücksichtigt ein Kultivierungsvolumen von 15 Litern, mit einer Bestrahlungsoberfläche von 1000 · 500 mm und einer Schichtdicke von 30 mm. Für die Bestrahlung der Algensuspension sind röhrenförmige LEDs (Lichtdioden), mit einer Einzelleistung von 12 Watt ausgewählt worden. Die benötigte Anzahl, sowie der Abstand ist über eine Berechnung der Photonenflussdichte erfolgt. Eine Erhöhung der Photonenflussdichte, im Zusammenhang mit Leuchtmittelanzahl und Bestrahlungsabstand, ist einstellbar. Für die Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Wachstumsverhalten sind zwei Heizelemente mit jeweils 100 Watt ausgewählt worden. Die benötigte Leistung konnte über eine Wärmeverlustberechnung bei 30°C ermittelt werden. Eine Begasung und Durchmischung der Algensuspension erfolgt über eine Begasungslanze vom Boden des Reaktors. Bezogen auf das Anlagenvolumen konnte ein Volumenstrom von 90 bis 180 Litern pro Stunde ermittelt werden und eine Membranen-Pumpe ausgewählt werden. Der Volumenstrom ist über die Pumpe einstellbar. Eine Ernte der Biomasse erfolgt über ein Ablassventil am Boden des Reaktors. Die Abtrennung der Suspensionsflüssigkeit ist über Filtration mit Filterpapier möglich, wodurch die restfeuchte Biomasse (Slurry) verbleibt. Eine Überwachung des Wachstumsverhaltens ist durch eine Probenentnahme am Reaktordeckel möglich und eine Auswertung über das Trockengewicht der Biomasse kann erfolgen. Die Überwachung der Temperatur und des pH-Wertes erfolgt durch zwei Thermoelemente und eine pH-Elektrode. Die erfassten Messdaten werden durch eine SPS und einen verbundenen Computer mit LabVIEW ausgewertet. Eine Regelung der Begasung, Beleuchtung und Beheizung erfolgt ebenfalls über die SPS in Verbindung mit LabVIEW.

Abschließend konnte auf Basis der Stoffbilanz eine Biomassemenge für einen Kultivierungszeitraum von einer Woche ermittelt werden. Unter Annahme des Energiegehaltes der beiden Mikroalgenarten konnte die Energiebilanz des Airlift-Plattenreaktor-Modell bestimmt werden. Durch den hohen Energieeintrag der Beheizung fällt der Wirkungsgrad mit 0,19% zu gering aus, für eine wirtschaftliche Kultivierung. Eine Beheizung ist allerdings sinnvoll, um das Wachstumsverhalten von Freiland-Photobioreaktoren unter solarer Bestrahlung simulieren zu können. Eine Verbesserung der Lichtaufnahmefähigkeit durch Optimierung der Reaktorgeometrie und das Einbringen von Baffles (Strömungsstörern) ist in nachfolgenden Arbeiten zu untersuchen. Weiterhin ist die Anreicherung der Umgebungsluft durch reines Kohlenstoffdioxid, zur Steigerung der Wachstumsrate, in Betracht zu ziehen. Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), wodurch die Algensuspension einen pH-Wert von unter 6 annehmen kann. Ein Ausgleich durch eine automatisierte alkalische Stoffzufuhr ist zu bestimmen. Die tatsächlichen Biomasseerträge aus dem Photobioreaktor bleiben durch Versuche abzuwarten.

## 9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Adam H.J., Adam M.: SPS-Programmierung in Anweisungslisten nach IEC 61131-3, Auflage 5 von Springer-Verlag Berlin, 2015
- [2] Benedix R.: Bauchemie – Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, Auflage 7 von Springer-Verlag Nature, 2020
- [3] Bley T.: Biotechnologische Energieumwandlung – Gegenwärtige Situation, Chancen und Künftiger Forschungsbedarf, Auflage 1 von Springer-Verlag Berlin, 2009
- [4] Borowitzka M., Moheimani N., Algae for Biofuels and Energy, von Springer-Verlag New York London, Seite 77, 2012
- [5] Chmiel H., Takors R., Weuster-Botz D.: Bioprozesstechnik, Auflage 4 von Springer-Verlag Deutschland, 2018
- [6] Dau H., Kurz P., Weitze M.: Künstliche Photosynthese - Besser als die Natur?, von Springer-Verlag Berlin, 2019
- [7] Hegewald E.: Phylogenetic studies of Scenedesmaceae, Institute of Chemistry and Dynamics of the Geosphere 6, Research Centre Jülich, 2000
- [8] Hindersin S. u.a.: Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors, Springer-Verlag Berlin, 2012
- [9] Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H.: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Technik und Verfahren, Auflage 3 von Springer-Verlag Berlin, 2016
- [10] Kaltschmitt M.: Energiesysteme und Energiewirtschaft - Folien zur Vorlesung, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg-Harburg, SoSe 2015
- [11] Kramer M.: Integratives Umweltmanagement – Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik, Auflage 1 von Springer Science+Business Media, 2010
- [12] Kurzweil P.: Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, Auflage 10 von Springer Science+Business Media, 2015
- [13] Moheimani N., u.a.: Biomass and Biofuels from Microalgae, Auflage 2 von Springer International Publishing Switzerland, Seite 3-4, 2015
- [14] Mütterlein B.: Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW, Auflage 2 von Springer-Verlag Science+Business Media, 2009
- [15] O. Verf.: Algaemaster 10 control, „<https://www.ika.com/de/Produkte-Lab-Eq/Photobioreaktor-csp-912/Algaemaster-10-control-cpdt-20009577/>“, Abgerufen am 13.01.2023
- [16] O. Verf.: Algenbiomasse als regenerativer Energieträger – Fraunhofer IGB, „<https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/algenbiotechnologie/algenbiomassenutzung.html>“, Abruf am 06.11.2022
- [17] O. Verf.: Bigelow - f/2 Medium form Guillard and Ryther
- [18] O. Verf.: Bioledex LED-Pflanzenlampe GoLeaf, „<https://www.lampenwelt.de/bioledex-led-pflanzenlampe-goleaf-tip65-stecker.html>“, Abruf am 10.01.2023
- [19] O. Verf.: EHEIM air200 – Technische Daten, „[https://eheim.com/de\\_DE/aquaristik/technik/luftpumpen/air/air200](https://eheim.com/de_DE/aquaristik/technik/luftpumpen/air/air200)“, Abgerufen am 14.01.2023
- [20] O. Verf.: EHEIM Luftpumpe 3702, „<https://www.meintierdiscount.de/Fische-EHEIM-Luftpumpe-3702-200-l-h,42219,493p.htm>“, Abgerufen am 14.01.2023
- [21] O. Verf.: Erneuerbare Energien in Zahlen – Umweltbundesamt, „<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick>“, Abruf am 06.11.2022
- [22] O. Verf.: Greisinger 600767 GE 101 pH-Elektrode, „<https://www.conrad.de/de/p/greisinger-600767-ge-101-ph-elektrode-greisinger-ph-elektrode-spitze-6mm-ge-101-1-st-131156.html>“, Abgerufen am 13.01.2023
- [23] O. Verf.: JUMO Thermoelement Fühler-Typ K, „<https://www.conrad.de/de/p/jumo-thermoelement-fuehler-typ-k-messbereich-temperatur-200-bis-1200-c-kabellaenge-details-2-5-m-fuehlerbreite-3-mm-184604.html>“, Abgerufen am 13.01.2023

- [24] O. Verf.: Kohlenstoffdioxid - Bepreisung für weniger Emissionen – Bundesregierung, „<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134>“, Abruf am 06.11.2022
- [25] O. Verf.: Laborpraxis Band 2 – Messmethoden, Auflage 6 von Springer International Publishing AG Switzerland, 2017
- [26] O. Verf.: Lichttransmission von Plexiglas – Transparenter als Glas, „<https://www.plexiglas.de/de/service/produktinfo/lichttransmission>“, Abruf am 12.01.2023
- [27] O. Verf.: Lipidreiche Algenbiomasse als regenerativer Energieträger – Fraunhofer IGB, „<https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/algenbiotechnologie/algenbiomassenutzung/lipidreiche-algenbiomasse.html>“, Abgerufen am 17.01.2023
- [28] O. Verf.: Phytoplankton *Chlorella vulgaris*, „<https://planktino.de/produkt/chlorella-vulgaris/>“, Abgerufen am 17.01.2023
- [29] O. Verf.: Phytoplankton Dünger, „<https://planktino.de/produkt/phytoplankton-duenger-nach-guillard/>“, Abgerufen am 17.01.2023
- [30] O. Verf.: Phytoplankton *Secenedesmus spinosus*, „<https://planktino.de/produkt/scenedesmus-sp/>“, Abgerufen am 17.01.2023
- [31] O. Verf.: Primärenergieverbrauch – Umweltbundesamt, „<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#primarenergieverbrauch-nach-energietragern>“, Abruf am 06.11.2022
- [32] O. Verf.: Produkte Subitec, „<https://www.subitec.com/forschung/produkte/>“, Abgerufen am 13.01.2023
- [33] O. Verf.: Schego PTC-Heizer Titanrohr 100W Amazon, „[https://www.amazon.de/Schego-PTC-Heizer-Titanrohr-energieeffizienter-Aquarium/dp/B0BPQMZZ5G/ref=sr\\_1\\_11?\\_\\_mk\\_de\\_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2X91DIOPD64AE&keywords=schego+heizelement&qid=1673536242&srefix=schego+heizelement%2Caps%2C73&sr=8-11](https://www.amazon.de/Schego-PTC-Heizer-Titanrohr-energieeffizienter-Aquarium/dp/B0BPQMZZ5G/ref=sr_1_11?__mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2X91DIOPD64AE&keywords=schego+heizelement&qid=1673536242&srefix=schego+heizelement%2Caps%2C73&sr=8-11)“, Abruf am 12.01.2023
- [34] O. Verf.: Superfood von der Fensterbank – Progressive Agrarwende, <https://progressive-agrarwende.org/superfood-von-der-fensterbank>“, Abgerufen am 20.11.2022
- [35] O. Verf.: Tellerseparator Funktionsweise, „<https://www.centrimax.de/separatoren/tellerseparator.html>“, Abgerufen am 04.01.2023
- [36] O. Verf.: Wärmeübergangskoeffizienten - Flüssigkeiten, „[https://www.schweizerfn.de/stoff/wuebergang\\_fluessigkeit/wuebergang\\_fluessigkeit.php](https://www.schweizerfn.de/stoff/wuebergang_fluessigkeit/wuebergang_fluessigkeit.php)“, Abruf am 12.01.2023
- [37] O. Verf.: xCUBIO High-End Mikroalgenforschung, „<https://bbi-biotech.com/produkte/fermenter-bioreaktoren/photobioreaktoren/>“, Abgerufen am 13.01.2023
- [38] Oliveri G., Salation P., Marzochella A.: Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications, *J Chem Technol Biotechnol* 89, 2014
- [39] Schmidt A.: Folien zur Vorlesung - Technische Thermodynamik 1, Department Maschinenbau und Produktion, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 06.05.2020
- [40] Schmidt A.: Folien zur Vorlesung - Wärme- und Stoffübertragung, Department Maschinenbau und Produktion, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 18.02.2020
- [41] Schmidt A.: Formelsammlung zur Vorlesung – Wärme- und Stoffübertragung Department Maschinenbau und Produktion, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 18.02.2020
- [42] Tipler P.A., u.a.: Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik, Auflage 8 von Springer-Verlag Berlin, 2019
- [43] Wesselak V., u.a.: Handbuch Regenerative Energietechnik, Auflage 3 von Springer-Verlag Berlin, 2017

- [44] Yongmanitchai W., Ward O. P., Growth of and Omega-3 Fatty Acid Production by *Phaeodactylum tricornutum* under Different Culture Conditions, Department of Biology, University of Waterloo, 1990

## Anhang

Wertetabelle Photonenflussdichte im Verhältnis zum Bestrahlungsabstand

<b>LED-Anzahl</b>	<b>h [mm]</b>	<b><math>E_{pf\ mittel}</math> [<math>\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})</math>]</b>
5	10	469
5	11	426
4	12	391
4	13	361
4	14	335
3	15	313
3	16	293
3	17	276
3	18	260
3	19	247
3	20	234

## Technisches Datenblatt Leuchtmittel

# Bioledex GoLeaf LED Pflanzenleuchte 90cm Vollspektrum TIP65-System IP65

IP8-09GR-264



- Röhrenförmige Bioledex GoLeaf LED Pflanzenleuchte mit TIP65 Anschluss-System und einem Vollspektrum-Licht für ein optimales Pflanzenwachstum.
- Wasserdichte, lineare 90cm LED Feuchtraumleuchte eignet sich ideal für Pflanzen-Beleuchtung in Gewächshäusern, für Indoor-Farming und Vertical-Farming Projekte.
- Die Leuchte eignet sich hervorragend für Pflanzenbeleuchtung in mobilen Regalsystemen oder festverbauten Schwerlastregalen.
- Einfache und schnelle Installation dank Stromanschluss-Stecksystem mit männlichen und weiblichen Steckern.
- Der Anschluss erfolgt von außen, und die Leuchte muss nicht aufgemacht werden.
- Gute Photonenausbeute mit 1,85  $\mu\text{mol/s/W}$  bei Vollspektrum 410-710nm.



Optional verfügbares Zubehör, separat nach Wunsch und Konfiguration zu bestellen:

- Befestigungs-Clips (Art.Nr. RT8-00H0-232)
- Anschlusskabel 1m mit Schalter (Art.Nr. IP8-K150-268)
- Verlängerungskabel 1m (Art.Nr. IP8-K100-269)
- T-Verbinder Kabel (Art. Nr. IP8-T2F0-270)

Wir beraten Sie gerne, damit Sie eine optimale Lösung für Ihre LED Pflanzenbeleuchtung erhalten.

Hersteller	Bioledex
Produktserie	GoLeaf TIP65
Produktart	Feuchtraumleuchte für Pflanzenbeleuchtung
Hersteller-Art.Nr.	IP8-09GR-264
EAN Nummer	4260510482642

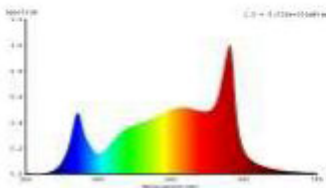
### Lichttechnische Daten

Lichtspektrum / Wellenlänge	Vollspektrum, kontinuierlich von 410 bis 710 nm
Photonenstrom, PPF	22,2 $\mu\text{mol/s}$
Effizienz	1,85 $\mu\text{mol/J}$
Lichtstrom	1100 lm
Bevorzugte Anwendung	Optimales vegetatives Wachstum
Bevorzugte Pflanzenarten	Gemüse, Salate, Blumen
Bevorzugte Anwendungsorte	Gewächshaus, Dunkelräume
Anwendung ohne Zusatz-/ Tageslicht	Ja, da Vollspektrum-Leuchte mit Weisslicht-Anteil
Abstrahlwinkel	160°
Dimmbar	Nein



### Technische Daten

Leistung	12,0 Watt
Spannung	220-240V ~ 50/60Hz
Netzgerät	Netzteil integriert
Anschlussart	Systemanschluss
Schutzart	IP65
Schutzklasse	II
Durchverdrahtung	Nein

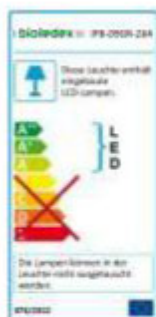


### Materialien & Maße

Gehäusefarbe	Weiss
Material Gehäuse	Polycarbonat
Gewicht	0,25 kg
Abmessungen	900 x Ø29 mm
Montageart	Anbau / Abgehängte Montage

### Umwelt & Lebensdauer

Betriebsdauer	30.000 Std.
Photonenstromerhalt	80% nach Nutzlebensdauer
Schaltzyklen	> 100.000
Anlaufzeit	< 1 Sek
Zündzeit	0,2 s
Energieeffizienzklasse	A++ - A
Gewichteter Verbrauch	12 kWh/1000h
Umgebungstemperatur	Bereich -30...+45°C





## Übersicht/Lieferumfang

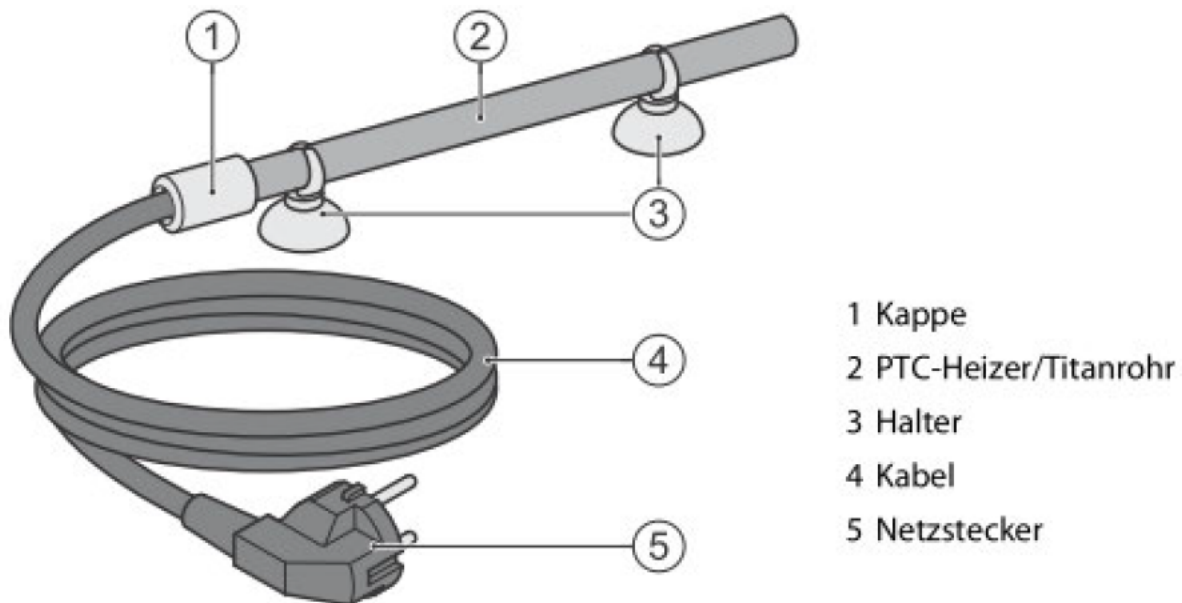


Abb. 1: Übersicht

## Technische Daten

**SCHEGO**® HT68840 - 300 W bei 20°C - 230 V~ - IP68 - max. 2 m  
PT014 - Batch N° - Date - S/N



Abb. 2: Beschriftung auf dem Heizstab (Beispiel)

### **i** INFO:

Herstellerangaben, Daten zur Identifizierung der Produktvariante, das CE-Zeichen und das Entsorgungssymbol befinden sich direkt auf dem Heizstab.

Netzspannung	230 V oder 120 V	
Leistungsaufnahme (kurzzeitig beim Einschalten)	PTC 100 W: ~ 200 W PTC 200 W: ~ 450 W	PTC 300 W: ~ 600 W PTC 600 W: ~ 950 W
Leistungsaufnahme (bei 20 °C)	PTC 100 W: ~ 100 W PTC 200 W: ~ 200 W	PTC 300 W: ~ 300 W PTC 600 W: ~ 600 W
Kabel	<b>bei 230 V:</b> H03VV-F 3G 0,75 mm <sup>2</sup> <b>bei 120 V:</b> SJT 3x 0,824 mm <sup>2</sup> (18 AWG)	
Kabellänge	1,5 m	
Heizstablänge	PTC 100 W: 150 mm PTC 200 W: 250 mm	PTC 300 W: 350 mm PTC 600 W: 550 mm
Heizstabdurchmesser	12 mm	

Schutzart	IP68	
Maximale Wassereintauchtiefe	2 m	
Empfohlene Leistung in Abhängigkeit der Wassermenge bei Raumtemperatur von 20 °C	PTC 100 W: bis 100 l PTC 200 W: 100 – 200 l	PTC 300 W: 200 – 300 l PTC 600 W: 300 – 600 l

## Bestimmungsgemäße Verwendung

Der Heizstab besteht aus Titan und ist zum Erwärmen von Wasser in Aquarien und Terrarien bestimmt.

Der Heizstab ist in den Varianten PTC 100 W, PTC 200 W, PTC 300 W und PTC 600 W erhältlich. Jede der Varianten kann je nach Auslieferungsort für eine Netzspannung von 230 V oder 120 V ausgelegt sein. Die Art des Kabels hängt von der Netzspannung ab.

### INFO:

Um welche Variante es sich bei Ihrem Heizstab handelt, sehen Sie aufgedruckt auf dem Heizstab (Abb. 2).

Der Heizstab muss mit einem Fehlerstromschutzschalter mit maximal 30 mA betrieben werden.

Die Anschlüsse des Heizstabs müssen sich in Innenräumen befinden.

Der Heizstab muss während des Betriebs immer vollständig von Wasser umgeben sein.

Der Heizstab ist nur für die Verwendung im Rahmen der technischen Grenzen vorgesehen ("Technische Daten" auf Seite 4), die sich je nach Variante unterscheiden.

## Sicherheitshinweise

### WARNUNG:

Der Heizstab wird mit elektrischer Spannung betrieben und erzeugt im Betrieb hohe Temperaturen, die bei Berührungen zu Verbrennungen und Sachschäden führen.

- Trennen Sie vor allen Arbeiten den Heizstab vom Stromnetz. Ziehen Sie dazu den Netzstecker (Abb. 1/5) aus der Steckdose und lassen Sie den Heizstab abkühlen, bevor Sie im Aquarium oder Terrarium hantieren.
- Lassen Sie den Heizstab auf Umgebungstemperatur abkühlen und trocknen, bevor Sie ihn berühren.
- Fassen Sie den Heizstab nur an der Kappe (Abb. 1/1) an.
- Lassen Sie den Heizstab nicht unbeaufsichtigt, wenn Kinder oder Personen in der Nähe sind, die die Gefahren nicht einschätzen können.
- Dieses Gerät kann von Kindern ab acht Jahren und darüber sowie von Personen mit verringerten physischen, sensorischen oder mentalen Fähigkeiten oder Mangel an Erfahrung und Wissen benutzt werden, wenn sie beaufsichtigt oder bezüglich des sicheren Gebrauchs des Geräts unterwiesen wurden und die daraus resultierenden Gefahren verstehen.

## Technisches Daten Membranpumpe



EHEIM air200

AUSGEWÄHLTER ARTIKEL

Beschreibung	air pump – Luft auf leise Art Die EHEIM air pump hat eine phantastische Erfolgsgeschichte....
Pumpenleistung pro Stunde bei 50 Hz von:	200 Liters
Förderhöhe bei 50 Hz ca. (H max):	2 m
Leistungsaufnahme bei 50 Hz von:	3.5 Watt
Schlauch Ø Druckseite:	4 mm
Höhe:	150 mm
Breite:	92 mm
Tiefe:	76 mm
Süßwasser:	Ja
Meerwasser:	Ja
Herstellergarantie:	3 Jahr(e)

JUMO GmbH & Co. KG

Hausadresse:

Lieferadresse:

Postadresse:

Telefon:

Telefax:

E-Mail:

Internet:



## Mantel-Thermoelemente nach DIN 43 710 und DIN EN 60 584

- Für Temperaturen von -200...+1200°C
- Biegsame Mantelleitung mit erschütterungsfestem Messeinsatz
- Schutzrohrdurchmesser ab 0,5mm
- Schnelle Ansprechzeit
- Anwendungsspezifische Einbaulänge

Mantel-Thermoelemente werden aufgrund ihrer Eigenschaften in Chemieanlagen, Kraftwerken, Rohrleitungen, im Motorenbau und auf Prüfständen eingesetzt. In die biegsame dünnwandige Mantelleitung sind die Thermodrähte in gepresstem feuerfestem Magnesiumoxid eingebettet.

Der gute Wärmeübergang zwischen Mantel und Thermopaar ermöglicht kurze Ansprechzeiten ( $t_{0,5}$  ab 0,15s) und hohe Messgenauigkeit. Der erschütterungsfeste Aufbau garantiert eine lange Lebensdauer. Der kleinste Biegeradius beträgt 5 x äußerer Durchmesser. Die Mindest-Einbaulänge beträgt bei  $\varnothing$  0,5 bis 2,0mm EL  $\geq$  50mm, bei  $\varnothing$  3,0 bis 6,0mm EL  $\geq$  100mm.

Serienmäßig sind die Thermopaare gegen den Mantel isoliert aufgebaut. In den Messeinsatz sind Thermopaare (Elemente) nach DIN EN 60 584 bzw. DIN 43 710 eingesetzt. Möglich sind auch Ausführungen mit zwei Thermopaaren.

**Prüfdruck:** Prüfung auf Dichtheit an der Messstelle bei 40 bar (Helium)

**Isolationswiderstand:** Thermopaar gegen Mantel bei Raumtemperatur und Längen < 1m 200M $\Omega$ , bei Längen  $\geq$  1m 200M $\Omega$  x m.



### Technische Daten

**Anschluss**

Leitungsenden blank abisoliert, mit Aderendhülsen, Steckhülsen oder mehrpoliger Steckverbindung (z.B. thermospannungsfreie Steckverbinder) lieferbar

**Ausgleichsleitung**

Silikon, Umgebungstemperatur -50...+180°C  
 PTFE, Umgebungstemperatur -190...+260°C  
 Metallgeflecht, Umgebungstemperatur -20...+350°C

**Schutzrohr**

Edelstahl 1.4541, Thermoelement Typ „L“ und Typ „J“  
 Inconel 2.4816 (Inconel 600), Thermoelement Typ „K“

**Messeinsatz**

Isolierter Aufbau:  
 1 x Fe-CuNi „J“, DIN EN 60 584, Kl. 2, Einsatztemperatur -200...+800°C  
 1 x Fe-CuNi „L“, DIN 43 710, Kl. 2, Einsatztemperatur -200...+800°C  
 1 x NiCr-Ni „K“, DIN EN 60 584, Kl. 2, Einsatztemperatur -200...+1200°C  
 2 x Fe-CuNi „L“, DIN 43 710, Kl. 2, Einsatztemperatur -200...+800°C  
 2 x NiCr-Ni „K“, DIN EN 60 584, Kl. 2, Einsatztemperatur -200...+1200°C

**Ansprechzeiten**

in Wasser mit 0,4m/s / in Luft mit 2m/s  
 $\varnothing$  0,5mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 0,15s,  $t_{0,9}$  = 0,30s / Luft  $t_{0,5}$  = 3,5s,  $t_{0,9}$  = 8,0s  
 $\varnothing$  1,0mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 0,20s,  $t_{0,9}$  = 0,60s / Luft  $t_{0,5}$  = 7,5s,  $t_{0,9}$  = 17,0s  
 $\varnothing$  1,5mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 0,40s,  $t_{0,9}$  = 0,90s / Luft  $t_{0,5}$  = 10,0s,  $t_{0,9}$  = 25,0s  
 $\varnothing$  2,0mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 0,80s,  $t_{0,9}$  = 2,60s / Luft  $t_{0,5}$  = 13,0s,  $t_{0,9}$  = 34,0s  
 $\varnothing$  3,0mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 1,00s,  $t_{0,9}$  = 2,90s / Luft  $t_{0,5}$  = 22,0s,  $t_{0,9}$  = 64,0s  
 $\varnothing$  4,5mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 2,50s,  $t_{0,9}$  = 6,50s / Luft  $t_{0,5}$  = 34,0s,  $t_{0,9}$  = 113,0s  
 $\varnothing$  6,0mm: Wasser  $t_{0,5}$  = 3,00s,  $t_{0,9}$  = 9,00s / Luft  $t_{0,5}$  = 55,0s,  $t_{0,9}$  = 170,0s

### Leitungswiderstände in $\Omega/m$ bei 20°C für Mantel-Thermoelemente

Durchmesser D in mm	1 Element Widerstand in $\Omega/m$	2 Elemente Widerstand in $\Omega/m$
<b>Thermopaar Fe-CuNi „L“</b>		
6,0	0,66	0,85
4,5	1,40	1,80
3,0	2,70	3,50
2,0	5,00	7,70
1,5	12,00	-
1,0	21,50	-
<b>Thermopaar Fe-CuNi „J“</b>		
6,0	0,54	-
3,0	2,10	-
2,0	8,60	-
1,5	15,00	-
1,0	34,00	-
<b>Thermopaar NiCr-Ni „K“</b>		
6,0	0,88	2,70
4,5	1,56	4,80
3,0	3,50	11,00
2,0	7,90	25,00
1,5	14,00	-
1,0	32,00	-
0,5	126,00	-



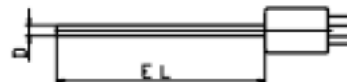
**Bestellangaben: Mantel-Thermoelemente nach DIN 43 710 und DIN EN 60 584**

**(1) Grundausführung**

901221/10 Mantel-Thermoelement mit blanken Anschlussdrähten



901221/20 Mantel-Thermoelement mit thermospannungsfreiem Standard-Flachstecker



**(2) Messeinsatz / Einsatztemperatur in °C**

x	x	1040	1 x Fe-CuNi „J“, Einsatztemperatur -200...+800°C, Mantelwerkstoff-Nr. 1.4541
x	x	1042	1 x Fe-CuNi „L“, Einsatztemperatur -200...+800°C, Mantelwerkstoff-Nr. 1.4541
x	x	1043	1 x NiCr-Ni „K“, Einsatztemperatur -200...+1200°C, Mantelwerkstoff-Nr. 2.4816
x		2042	2 x Fe-CuNi „L“, Einsatztemperatur -200...+800°C, Mantelwerkstoff-Nr. 1.4541
x		2043	2 x NiCr-Ni „K“, Einsatztemperatur -200...+1200°C, Mantelwerkstoff-Nr. 2.4816

**(3) Schutzrohrdurchmesser D in mm**

x		0,5	Ø 0,5mm, nur in Verbindung mit 1 x NiCr-Ni „K“
x	x	1	Ø 1mm
x	x	1,5	Ø 1,5mm
x	x	2	Ø 2mm
x	x	3	Ø 3mm
x	x	4,5	Ø 4,5mm
x	x	6	Ø 6mm

**(4) Einbaulänge EL in mm (50 ≤ EL ≤ 50000)**

x	x	100	100mm
x	x	200	200mm
x	x	300	300mm
x	x	400	400mm
x	x	500	500mm
x	x	...	Angabe im Klartext (Stufung 50mm)

**(5) Typenzusätze**

x	x	000	ohne Typenzusatz
x	x	309	nicht isolierter Aufbau (Element mit Boden verschweißt)

<b>Bestellschlüssel</b>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<b>Bestellbeispiel</b>	901221/10	- 1042	- 3	- 200	/ 000

# Technisches Daten pH-Elektrode

## pH-Elektroden



	GE 100	GE 101	GE 104	GE 108	GE 117	GE 120	GE 125	GE 151	GE 170	GE 173
<b>Messgröße</b>	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
<b>Messbereich</b>	0 ... 14 pH 0 ... 80 °C	2 - 11 pH 0 - 60 °C	2 ... 14 pH 0 - 80 °C	0 ... 14 pH 0 ... 80 °C	2 ... 11 pH 0 ... 60 °C	0 - 14 pH 0 - 60 °C	0 ... 14 pH 0 ... 70 °C	0 ... 14 pH -5 ... 80 °C	0 ... 14 pH 0 ... 130 °C	0 ... 14 pH 0 ... 80 °C
<b>Leitfähigkeit</b>	> 100 µS	> 100 µS	> 20 µS	> 100 µS	> 100 µS	> 200 µS	> 200 µS	> 100 µS	> 100 µS	> 50 µS
<b>Temperaturmessung</b>	nein	nein	nein	nein	integr. Pt1000	nein	integr. Pt1000	nein	nein	nein
<b>Wasserdicht</b>	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein
<b>Druckfest</b>	nein	nein	nein	6 bar	6 bar	nein	1 bar	nein	15 bar	6 bar
<b>Kabel</b>	1 m <sup>1)</sup>	1 m <sup>1)</sup>	1 m <sup>1)</sup>	2 m <sup>1)</sup>	2 m <sup>2)</sup>	1 m	2 m	1 m <sup>1)</sup>	ohne	1 m <sup>1)</sup>
<b>Elektrolyt</b>	3 mol/l KCL	3 mol/l KCL	3 mol/l KCL	Gel-Elektrolyt	Gel-Elektrolyt	Gel-Elektrolyt	Gel-Elektrolyt	3 mol/l KCL	Gel-Elektrolyt	Gel-Elektrolyt
<b>Diaphragma</b>	2 x Keramik	2 x Keramik	beweglicher Schliiff	2 x Keramik	2 x Keramik	2 x Keramik	1 x Keramik	1 x Keramik	3 x Keramik	Schliff
<b>Gewinde</b>	ohne	ohne	ohne	PG 13,5	PG 13,5	ohne	ohne	ohne	PG 13,5	PG 13,5
<b>Temperaturanschluss</b>	-	-	-	-	4 mm Banane	-	4 mm Banane	-	-	-
<b>Besonderheiten</b>	Low Cost-Universal-Elektrode	Spitze Ø 6 mm, kleines Probenvolumen	für ionenarme Medien	wartungsarm	temperaturkompensiert	Einstechelektrode	tauchbar, wasserdicht IP67	schwierige Messbedingungen, alkalibeständig	für extreme Bedingungen, bis 130 °C und 15 bar Druck	für Prozesschemie, Biochemie

<sup>1)</sup> Hinweis: beim Anschluss S7 wird das Kabel GEAK-2S7-BNC oder GEAK-5S7-BNC benötigt.  
Elektroden sind Verbrauchsgegenstände. Lebensdauer bei pfleglicher Behandlung: > 2 Jahre / Garantie: 12 Monate





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Höger

Vorname: Lukas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwurf eines Photobioreaktors für die Bilanzierung des biogenen Energiepotenzials im Labormaßstab

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:



Unt



Datum



Original